

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГАМОЦЬКИЙ РОМАН ОЛЕГОВИЧ

УДК 504.064.2

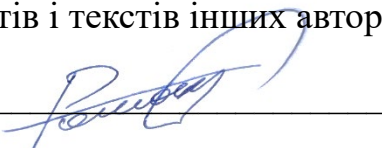
ДИСЕРТАЦІЯ
ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ
БУДІВЕЛЬ В ЗЕЛЕНІЙ ВІДБУДОВІ УКРАЇНИ

101 – Екологія

10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня **доктора філософії**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ **Р.О. Гамоцький**

Науковий керівник **Кривомаз Тетяна Іванівна**,
доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій захисту
навколишнього середовища та охорони праці Київського національного
університету будівництва і архітектури

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Гамоцький Р.О. Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в зеленій відбудові України

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки», за спеціальністю 101 – «Екологія». Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню енергетичної безпеки багатоповерхових будівель і вирішенню науково–прикладного завдання створення інтегрованої системи управління енергетичною безпекою багатоповерхових будівель у зеленій відбудові України, що поєднує аналітичні методи збору ключових показників, розрахункові та експериментальні підходи дослідження енергетичних втрат та впливу на зовнішнє середовище, а також систему прийняття відповідних заходів.

Відповідно до результатів оцінювання енергоспоживання житлового фонду України, узагальнених у звітах Міжнародного енергетичного агентства та Державного агентства з енергоефективності, встановлено, що багатоквартирний житловий сектор належить до найменш енергоефективних складових житлового фонду. Близько 60% цих будівель зведено до 1970–х років, вони забезпечують споживання орієнтовно третини кінцевої енергії країни, тоді як втрати теплової енергії у мережах і через огорожувальні конструкції перевищують 20%, що еквівалентно приблизно 3% валового внутрішнього продукту щорічно. З огляду на це, формування методології оцінки енергетичної безпеки будівель із урахуванням воєнних ризиків, децентралізації енергетики та екологічних обмежень набуває стратегічного значення для екологічної безпеки й стійкості енергосистеми.

У роботі узагальнено світовий досвід повоєнної відбудови житлового фонду, зокрема практики Німеччини, Нідерландів, Польщі та США, де

завдяки глибокій термомодернізації оболонки будівель, посиленню нормативів і фінансовій підтримці вдалося зменшити питомі витрати тепла до 50–75 кВт·год/м²·рік та скоротити енергоспоживання на 20–30% і більше. Цей висновок покладено в основу рекомендацій щодо переорієнтації української політики відбудови на принципи nZEB, широке використання відновлюваних джерел енергії, застосування розумних систем керування та гармонізованих з природним середовищем архітектурних рішень.

Проведений аналіз міжнародних практик показав, що значно раціональніше одразу будувати житло за високими енергоефективними стандартами, ніж згодом здійснювати ресурсоємну модернізацію. Найкращі міжнародні практики у сфері сталого розвитку та відбудови були критично осмислені й адаптовані до українських реалій, що дозволило сформувавши комплексні рекомендації для впровадження принципів зеленої відбудови України. Узагальнення досліджень міжнародних організацій (IEA, IRENA, Європейської комісії) показало, що комплексна термомодернізація та зелена реконструкція здатні зменшувати потребу в енергії до 70%, первинне енергоспоживання – приблизно до 60%, а витрати теплової енергії на опалення – на 50–59%.

Методологічною основою дисертації є розроблений багаторівневий підхід до оцінювання енергетичної безпеки житлових будівель, який інтегрує традиційні методи аналізу з сучасними інструментами оцінювання в умовах кризової невизначеності й включає три взаємопов'язані рівні: аналітичний, розрахунковий та експериментальний. На аналітичному рівні виконано оцінку актуальних воєнних загроз та ризиків для енергетичної системи, аналіз методів енергоаудиту, LCA, а також порівняння ключових показників енергоефективності з урахуванням регіональних особливостей енергозабезпечення. На розрахунковому рівні використано систему показників енергетичних паспортів і екологічних характеристик будівель для кількісної оцінки взаємозв'язку між споживанням енергії, викидами CO₂ та стійкістю до зовнішніх впливів, а також проведено порівняльний аналіз

життєвих циклів типових та енергоефективних будівель за методологією LCA. Експериментальний рівень включає розрахунки і створення математичних моделей енергетичного балансу будівель із використанням спеціалізованих програмних комплексів, теплотехнічні дослідження реальних об'єктів та тепловізійні обстеження для визначення фактичних теплових потоків, виявлення містків холоду й дефектних зон.

У роботі проаналізовано та рекомендовано до практичного застосування низку програмних комплексів (EnergyPlan, RETScreen, EnergyPlus, ENSI EAB, ENSI «Енергомонітор», PHPP, ArchiPHYSIK, Hottgenroth), які дають змогу моделювати енергетичні баланси, порівнювати сценарії термомодернізації, оцінювати економічну доцільність заходів (термін окупності, вплив на витрати та паливний баланс), формувати енергетичні сертифікати та планувати оптимальні поєднання технологій. Показано, що інтеграція таких інструментів із BIM-моделюванням та інтелектуальними засобами обліку (EMS, BEMS, «розумні» лічильники) створює підґрунтя для побудови цифрових двійників будівель, підвищує точність діагностики тепловтрат та спрощує прийняття управлінських рішень.

Як приклад практичного застосування методики проаналізовано енергоспоживання існуючої 7-поверхової житлової будівлі ЖК «Арт-Квартал Співоче» у м. Києві, для якої розраховано енергетичний паспорт, визначено річну питому потребу в енергії на опалення, охолодження та гаряче водопостачання на рівні $90,75 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$, а також визначено клас енергоефективності «D». Додатково оцінено вуглецевий слід будівлі ($81,7 \text{ кг CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{рік}$), обсяги втіленої енергії стінової конструкції на одному з етапів життєвого циклу. Порівняння життєвих циклів типової та енергоефективної забудови показало, що в енергоефективних будівлях витрати на енергію становлять $60\text{--}120 \text{ грн}/\text{м}^2\cdot\text{рік}$ проти $160\text{--}260 \text{ грн}/\text{м}^2\cdot\text{рік}$ у звичайних, викиди CO_2 – $50\text{--}90 \text{ кг}/\text{м}^2$ проти $160\text{--}250 \text{ кг}/\text{м}^2$, частка власного забезпечення з ВДЕ

сягає 25–40% проти менше ніж 5%, а тривалість життєвого циклу збільшується до 60–100 років проти 40–60 років.

Також проведено тепловізійне обстеження багатоповерхової будівлі, за результатами якого оцінено енергоефективність об'єкта дослідження. Додатково розглядалися тепловізійні обстеження будівель різних періодів забудови. Сюди входять сталінки, хрущовки, панельні будинки, сучасні об'єкти. З'ясовано, що більшість будинків, зведених до 2000 року, мають низький рівень енергоефективності: температура зовнішніх стін може сягати лише 3 °С через відсутність належного утеплення, застарілі світлопрозорі огороження та містки холоду. Уніфікація типових дефектів такої забудови допоможе в енергетичній оцінці подібних об'єктів та у виборі відповідних заходів енергоефективності.

Додатково застосовано двовимірне та тривимірне моделювання теплових потоків у вузлових зонах огорожувальних конструкцій, що дозволило виявити неефективні рішення, які не могли бути зафіксовані лише тепловізійною діагностикою. Моделювання вузлів розглянутої будівлі у програмних комплексах ТЕРМ 6 і TEMPER 6.14 виявило зони, де температура поверхні внутрішніх елементів становить 9,60–9,96 °С. Даний результат не відповідає нормативним вимогам і є нижчою за точку роси, що обґрунтовує необхідність глибокої реконструкції таких вузлів. Завдяки математичним моделям конструктиву будівель продемонстровано, що саме комплексне поєднання тепловізійної діагностики, безпілотних платформ і сенсорних мереж є найефективнішим інструментом просторової оцінки енергетичного стану забудови та визначення пріоритетних об'єктів для термомодернізації.

Розроблено ряд ключових рекомендацій по підвищенню енергетичної безпеки будівель та проведений аналіз очікуваних ефектів від децентралізації енергосистем, термомодернізації, розумних технологій, ВДЕ, резервних джерел живлення й систематичного моніторингу. Згідно наявних кейсів в Україні та ЄС ці заходи здатні зменшити споживання

енергії в будівлях на 40–60%, покрити до 70% їх електричних потреб, скоротити викиди CO₂ на 50–70%, знизити витрати домогосподарств на комунальні послуги на 30–40% і водночас підвищити енергетичну автономність та інвестиційну привабливість житла. Комплексне впровадження екологічних та ресурсозберігаючих заходів має розглядатися як один із ключових напрямів повоєнної модернізації житлового фонду.

Для врахування впливу зовнішніх чинників на реалізацію енергоефективних та екологічних заходів здійснено розрахунок за методологією багатокритеріального аналізу PESTEL, де визначено кількісні ваги політичних, економічних, соціальних, технологічних, екологічних і правових факторів, а також їхні кореляції. Виявлено домінування технологічних (22%) та політичних (20%) ризиків, а також доведено, що децентралізовані енергосистеми, термомодернізація, розумні технології та законодавча підтримка зелених технологій мають значно вищу сумарну вагу позитивного впливу порівняно з дизельними генераторами, які забезпечують лише тимчасову економічну та технологічну вигоду при критично низьких екологічних показниках. На цій основі запропоновано стратегічно орієнтуватися на пріоритет децентралізованих зелених технологій, постійне оновлення вагових коефіцієнтів та використання інтегрального показника енергетичної безпеки для оцінки ефективності управлінських рішень на локальному рівні.

Практичний внесок полягає в розробленні нового підходу поетапної методики оцінки енергетичної безпеки існуючого житлового фонду. Запропоновано сучасну управлінську систему, яка включає базову енергетичну сертифікацію, енергоаудит, погодинне енергомодельовання, еко–енергетичну оцінку, застосування аналітичних, розрахункових та експериментальних методів, впровадження ключових заходів підвищення енергетичної безпеки і зменшення негативного впливу на довкілля. Зокрема вона інтегрує моніторинг даних, багатокритеріальну оцінку, матрицю пріоритизації технологій та участь усіх стейкхолдерів (держави, операторів,

експертів, споживачів) і дозволяє об'єктивно порівнювати альтернативи за енергоефективністю, економічністю, екологічністю та масштабованістю. Застосування розробленої методики в умовах зеленої відбудови України забезпечує прозоре й послідовне прийняття рішень щодо пріоритетів модернізації, підвищує енергетичну автономність житлового фонду, зменшує енергетичну бідність та сприяє досягненню цілей сталого розвитку.

Результати дисертаційного дослідження були представлені для оцінки на підприємстві ТОВ «АТЛАНТ–БУД», ТОВ «Фірма «БудКомплект»», в Андрушківській сільській раді як органі місцевого самоврядування відповідної територіальної громади, а також впроваджено в навчальний процес при підготовці студентів спеціальності 101 «Екологія» КНУБА.

Ключові слова: сталий розвиток, енергетична безпека, відновлювані джерела енергії, зелена енергетика, зелені конструкції, стратегічне управління, енергоефективність, енергетичні мережі, цифрова трансформація, стейкхолдери, екологічна безпека, екологічний ефект, екологічний моніторинг, адаптація до змін клімату, громадська участь.

ABSTRACT

Hamotskyi R.O. Assessment of Energy Security of Multi–Story Buildings in Ukraine’s Green Reconstruction – Qualification scientific work (manuscript).

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 10 – «Natural Sciences», specialty 101 – «Ecology». Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the study of the energy security of multi-storey buildings and to solving the applied scientific task of developing an integrated energy security management system for multi-storey buildings in the green reconstruction of Ukraine, which combines analytical methods for collecting key indicators, computational and experimental approaches to the study

of energy losses and their impact on the external environment, as well as a system for implementing appropriate measures.

According to the results of the assessment of energy consumption in the Ukrainian housing stock, summarised in the reports of the International Energy Agency and the State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine, it has been established that the multi-apartment residential sector is among the least energy-efficient components of the housing stock. About 60% of these buildings were constructed before the 1970s; they account for approximately one third of the country's final energy use, while heat losses in the networks and through the building envelope exceed 20%, which is equivalent to about 3% of gross domestic product annually. Against this background, the development of a methodology for assessing the energy security of buildings that takes into account wartime risks, energy decentralisation and environmental constraints becomes strategically important for environmental safety and the resilience of the energy system.

The work generalises international experience in post-war reconstruction and thermal retrofitting of the housing stock, in particular the practices of Germany, the Netherlands, Poland and the United States, where deep modernisation of building envelopes, tightening of regulations and financial support have made it possible to reduce specific heat consumption to 50–75 kWh/m²·year and cut energy use by 20–30% or more. This conclusion underpins recommendations to reorient Ukrainian reconstruction policy towards nZEB principles, the wide use of renewable energy sources, the deployment of smart control systems and nature-based architectural solutions.

The analysis of international practice has shown that it is far more rational to construct housing in accordance with high energy-efficiency standards from the outset than to carry out resource-intensive retrofits later, which underlies the recommendations to orient Ukraine's reconstruction towards nZEB standards, the use of renewable energy, Smart House systems, BIPV technologies, heat pumps and nature-based architectural solutions. A synthesis of studies by international

organisations (IEA, IRENA, the European Commission) has shown that comprehensive thermal modernisation and green renovation can reduce the demand for delivered energy by up to 70%, primary energy consumption by roughly 60%, and heating energy consumption by 50–59%.

The methodological basis of the dissertation is a multi-level approach to the assessment of the energy security of residential buildings which integrates traditional analytical methods with modern assessment tools under conditions of crisis-related uncertainty and comprises three interrelated levels: analytical, computational and experimental. At the analytical level, current wartime threats and risks to the energy system are assessed, methods of energy auditing and LCA are analysed, and key energy-efficiency indicators are compared with due regard to regional features of energy supply. At the computational level, a system of building energy certificate indicators and environmental characteristics is used for the quantitative evaluation of the relationships between energy consumption, CO₂ emissions and resilience to external impacts, and a comparative life-cycle analysis of typical and energy-efficient buildings is performed according to the LCA methodology. The experimental level covers the calculation and development of mathematical models of the energy balance of buildings using specialised software packages, heat-engineering studies of real facilities and thermographic inspections to determine actual heat flows and to identify thermal bridges and defective zones.

The thesis analyses and recommends for practical use a number of software tools (EnergyPlan, RETScreen, EnergyPlus, ENSI EAB, ENSI «Energomonitor», PHPP, ArchiPHYSIK, Hottgenroth) that make it possible to model energy balances, compare thermal retrofitting scenarios, assess the economic feasibility of measures (payback period, impact on costs and fuel mix), prepare energy certificates and plan optimal combinations of technologies. It is shown that the integration of such tools with BIM modelling and intelligent metering systems (EMS, BEMS, smart meters) creates a basis for the construction of digital twins

of buildings, increases the accuracy of diagnosing heat losses and simplifies management decision-making.

As an example of the practical application of the methodology, the energy consumption of an existing seven-storey residential building in the “Art-Kvartal Spivoche” residential complex in Kyiv is analysed; its energy certificate is calculated and the annual specific energy demand for heating, cooling and domestic hot water is determined at 90.75 kWh/m², which corresponds to energy-efficiency class «D». In addition, the building’s carbon footprint (81.7 kg CO₂/m²·year) and the embodied energy of a wall structure at one of the life-cycle stages are assessed. The comparison of life cycles of typical and energy-efficient developments shows that in energy-efficient buildings energy costs amount to 60–120 UAH/m²·year compared with 160–260 UAH/m²·year in conventional buildings; CO₂ emissions are 50–90 kg/m² compared with 160–250 kg/m²; the share of self-supply from RES reaches 25–40% compared with less than 5%; and the life-cycle duration increases to 60–100 years versus 40–60 years.

A thermographic survey of a real building is also carried out, and on this basis the energy efficiency of the object under study is assessed. Thermographic inspections of buildings from different construction periods are additionally considered, including Stalin-era buildings, Khrushchevkas, panel houses and modern developments. This demonstrates that most buildings constructed before 2000 have a low level of energy efficiency: the exterior wall temperature can be as low as 3 °C due to insufficient insulation, outdated glazed structures and thermal bridges. The standardisation of typical defects in such buildings will help in the energy assessment of similar facilities.

Moreover, two-dimensional and three-dimensional modelling of heat flows in nodal zones of the building envelope is applied, which makes it possible to identify inefficient design solutions that cannot be detected by thermographic diagnostics alone. Modelling of the joints of the analysed building in the TERM 6 and TEMPER 6.14 software packages reveals zones where the surface temperature of interior elements is 9.60–9.96 °C. This result does not meet

regulatory requirements and is below the dew point, which substantiates the need for deep reconstruction of such nodes. This comprehensive study of mathematical models of building structures shows that only a combined use of thermographic diagnostics, unmanned platforms and sensor networks is the most effective tool for spatial assessment of the energy condition of development and for identifying priority buildings for thermal retrofitting.

A set of key recommendations for improving the energy security of buildings is developed and the expected effects of energy-system decentralisation, thermal modernisation, smart technologies, RES, backup power sources and systematic monitoring are analysed. According to existing case studies in Ukraine and the EU, these measures can reduce energy consumption in buildings by 40–60%, cover up to 70% of their electricity needs, cut CO₂ emissions by 50–70%, lower household utility bills by 30–40%, and at the same time increase the energy autonomy and investment attractiveness of housing. This demonstrates that the comprehensive implementation of such solutions should be regarded as one of the key directions of post-war modernisation of the housing stock.

To account for the influence of external factors on the implementation of energy-efficiency measures, the thesis applies PESTEL and multi-criteria analysis, determines quantitative weights of political, economic, social, technological, environmental and legal factors and their correlations. The dominance of technological (22%) and political (20%) risks is identified, and it is shown that decentralised energy systems, thermal modernisation, smart technologies and green legislative support have a significantly higher combined positive impact than diesel generators, which provide only temporary economic and technological benefits while exhibiting critically poor environmental performance. On this basis, it is proposed to orient strategy towards the priority of decentralised green technologies, continuous updating of weighting coefficients and the use of an integral energy security index to assess the effectiveness of management decisions at the local level.

The practical contribution of the dissertation lies in the development of a new staged methodology for assessing the energy security of the existing housing stock. A modern management system is proposed that includes basic energy certification, energy auditing, hourly energy modelling, eco-energy assessment, the use of analytical, computational and experimental methods, and the implementation of key measures to increase energy security and reduce negative environmental impacts. In particular, it integrates data monitoring, multi-criteria assessment, a technology prioritisation matrix and the involvement of all stakeholders (the state, operators, experts, consumers), and enables objective comparison of alternatives in terms of energy efficiency, cost-effectiveness, environmental performance and scalability.

The application of the developed methodology in the context of Ukraine's green reconstruction ensures transparent and consistent decision-making on modernisation priorities, increases the energy autonomy of the housing stock, reduces energy poverty and contributes to the achievement of sustainable development goals.

The results of the dissertation research were presented for evaluation at LLC «ATLANT-BUD», LLC «Firma BudKomplekt», and at the Andrushkivka Village Council as the local self-government body of the respective territorial community, and were also implemented in the educational process in the training of students majoring in 101 «Ecology» at Kyiv National University of Construction and Architecture (KNUCA).

Keywords: sustainable development, energy security, renewable energy sources, green energy, green structures, strategic management, energy efficiency, energy networks, digital transformation, stakeholders, environmental safety, ecological effect, environmental monitoring, climate change adaptation, public participation.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

а) статті в наукових виданнях, внесених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б» :

1. Гетун Г.С., Кошева В.М., **Гамоцький Р.О.**, Гончаренко А.О. Оцінка тепловтрат житлового будинку ЖК «Арт–квартал Співоче» // Управління розвитком складних систем. – 2020. – № 42. – С. 82–92. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.82-92>.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні оцінки тепловтрат огорожувальних конструкцій на основі поєднання термографії та квазістаціонарних розрахунків за фактичними даними експлуатації будинку ЖК «Арт–квартал Співоче».

2. Гетун Г.С., Кошева В.М., **Гамоцький Р.О.**, Гончаренко А.О. Вплив повітрообміну в приміщеннях на енергоефективність багатоквартирних житлових будинків // Енергоефективність в будівництві та архітектурі : наук.–техн. зб. / Київ. нац. ун–т буд–ва і архіт.; відп. ред. П.М. Куліков. – Київ : КНУБА, 2019. – Вип. 13. – С. 58–68. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.13.58-68>.

Особистий внесок здобувача полягає у виконанні чисельних розрахунків впливу параметрів повітрообміну на енерговитрати будинку, аналізі ефективності вентиляційних систем і формулюванні практичних рекомендацій.

3. Кривомаз Т.В., Чалий І.В., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.О., Циба А.М. Критерії ESG у зеленій відбудові України // Екологічна безпека та природокористування. – 2023. – Т. 48, № 4. – С. 5–20. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.5-20>.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні методичних засад для оцінки екологічної ефективності відновлюваних проектів у межах ESG–

підходу, аналізі впливу екологічних критеріїв на якість та стійкість будівельних рішень.

4. Кривомаз Т.В., **Гамоцький Р.О.** Диверсифікація енергетичних ризиків житлових багатоповерхових будівель за допомогою альтернативних джерел енергії // Наука та будівництво. – 2024. – Т. 38, № 4. – С. 64–71. – DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-9>.

Основний внесок здобувача полягає у моделюванні сценаріїв впровадження альтернативних джерел енергії для багатоповерхових будинків, аналізі їхньої ефективності й розробці практичних рекомендацій щодо децентралізованого енергозабезпечення.

5. Кривомаз Т.В., Ільченко І.О., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.**, Гетьман Є.Ю. Дослідження етапів розвитку інклюзивності побудованого середовища в Україні // Екологічна безпека та природокористування. – 2024. – Т. 50, № 2. – С. 6–18. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.6-18>.

Основний внесок здобувача полягає у аналізі нормативів інклюзивних рішень у забудові й міському середовищі.

6. Кривомаз Т.В., **Гамоцький Р.О.**, Циба А.М. Стратегії диверсифікації ризиків енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни // Екологічна безпека та природокористування. – 2025. – Т. 53, № 1. – С. 7–21. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.7-21>.

Особистий внесок здобувача полягає у моделюванні оптимальних структур децентралізованої енергогенерації для багатоповерхових будівель.

7. **Гамоцький Р. О.** Інтеграція екологічної безпеки в механізми протидії енергетичним загрозам житловим будівлям // Екологічна безпека та природокористування. – 2025. – Т. 4, № 4. – С. 43–56. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4>.

Особистий внесок здобувача полягає в дослідженні інтеграції екологічної безпеки в механізми протидії енергетичним загрозам житловим

будівлям і формуванні практичних рекомендацій для її реалізації.

8. **Гамоцький Р. О.** Технічні рішення забезпечення енергетичної стійкості будівель та громад під час війни // Техніка будівництва : науково-технічний журнал. Київ : КНУБА, 2025. № 43. С. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0614>.

Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні та розробленні комплексу технічних рішень, спрямованих на підвищення енергетичної стійкості будівель і громад в умовах воєнного стану.

б) статті у закордонних виданнях

9. Kryvomaz T., **Hamotskyi R.**, Tsyba A. Energy risks assessment and resilient strategies development considering the war in Ukraine // Journal of Science. – Lyon, 2025. – № 69. – P. 13–27. – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17046551>.

Основний внесок здобувача полягає у розробці моделей оцінки ризиків для багатопверхових житлових об'єктів, моделюванні систем децентралізованого енергопостачання за різних сценаріїв бойових дій.

10. Kryvomaz T., **Hamotskyi R.**, Tsyba A. (2025). The role of buildings thermographic monitoring in the environmental safety system. Modern engineering and innovative technologies, Issue 40, Part 1 – P. 132-137. DOI: 10.30890/2567-5273.2025-40-01-075
<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit40-01-075>.

Основний внесок здобувача полягає у обґрунтуванні екологічного значення тепловізійного моніторингу будівель та формуванні висновків щодо підвищення енергетичної та екологічної безпеки забудови.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. Жукова О.Г., **Гамоцький Р.О.** Оцінка екологічних ризиків при будівництві на урбанізованих територіях // Зелене будівництво : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції. – Миколаїв : Видавець Торубара В.В., 2019. – 228 с. – С. 159–160.

Основний внесок здобувача полягає у обґрунтуванні рекомендацій щодо мінімізації екологічних ризиків.

12. Кривомаз Т.І., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С. Екологічні фактори ESG у зеленій відбудові України // Матеріали II Міжнародної науково–практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»), Київ, 13–14 квітня 2023 р. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ : КНУБА, 2023. – 607 с. – С. 118–122. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/materialy-konferenciyi-zelene-budivnytvo-2023.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні методичних засад для оцінки екологічної ефективності відновлюваних проектів у межах ESG–підходу, аналізі впливу екологічних критеріїв на якість будівельних рішень.

13. **Гамоцький Р.О.** Енергетична безпека будівель в архітектурі відновлення України // Філософія науки, техніки і архітектури в гуманістичному вимірі : матеріали 4-ї Міжнародної науково–практичної конференції, 10–11 листопада 2023 р. – Київ : КНУБА, 2023. – 192 с. – С. 80–84. – Режим доступу: <https://knuba.edu.ua/philosophy-2023>.

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні сучасних критеріїв енергетичної безпеки будівель при проектуванні та формуванні рекомендацій для архітектурних рішень в умовах відновлення.

14. Кривомаз Т.І., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С., Циба А.М., Старжинський П.В. Важливі напрямки відбудови України // Міжнародна науково–практична конференція «Екологія, ресурси, енергія», Київ, КНУБА, 23–24 листопада 2023. – С. 19–20. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/ere-2023.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у оцінці екологічних і енергетичних ризиків у напрямках відбудови України.

15. Кривомаз Т.І., Циба А.М., Ільченко І.С., **Гамоцький Р.О.** Технології захисту урбанізованого середовища у зеленій відбудові України // Всеукраїнська науково–практична інтернет–конференція студентів,

аспірантів та молодих вчених «Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України». Харків, 2–3 листопада 2023 р. – С. 240–243. – Режим доступу: <https://beketov.edu.ua/conference/urbosystems-2023.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні технологій захисту урбанізованого середовища, а саме впровадження екологічного моніторингу, застосування ресурсо- та енергоощадних рішень у будівництві з урахуванням сталого розвитку та інтеграції ESG-критеріїв.

16. **Гамоцький Р.О.**, Кривомаз Т.І. Децентралізація енергетики під час воєнних дій // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – С. 72–76. – 469 с. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/04/greenconstruction-2024.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у аналізі моделі децентралізації енергетики в умовах воєнних загроз та розробці пропозицій щодо впровадження автономних енергосистем у міському середовищі.

17. **Гамоцький Р.О.**, Кривомаз Т.І. Енергоефективне відновлення пошкодженого житлового фонду міських громад // Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: матеріали IX Міжнародного молодіжного конгресу, 28–29 березня 2024 р., Україна, Львів. – Київ: Яроченко Я. В., 2024. – С. 148. – 246 с. – ISBN 978–617–7826–43–8. – DOI: 10.51500/7826–43–8. – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/feb/33847/zbirnykixmizhnarodnyumolodizhnyykongres28-29032024fin.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у розгляді принципів енергоефективного відновлення пошкоджених житлових будівель та розробці сценаріїв оптимізації їх енергозабезпечення.

18. Кривомаз Т.І., **Гамоцький Р.О.**, Циба А.М., Ільченко І.С. Диверсифікація ризиків енергозабезпечення багатопверхових житлових

будівель в умовах війни // Матеріали Міжнародної науково–практичної конференції «Енергія Ресурси Екологія» (Київ, 27–29 листопада 2024 р.). – Київ: КНУБА, 2024. – С. 105–106. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/ere-2024-ua.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у моделюванні та аналізі ризиків енергозабезпечення житлових багатоповерхових будівель.

19. Kryvomaz T.I., Tsyba A.M., **Hamotskyi R.O.** Climate aspects of ESG standards in the construction sector of Ukraine // Climate Services: Science and Education: Proceedings of the Second International Research-to-Practice Conference (Odesa, 16–18 April 2025). – Odesa : Odesa I.I. Mechnikov National University, 2025. – P. 40–41. – ISBN 978–966–186–334–6. – Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/1jXxm-ECGZBLd6kRG8NTyQkqN6GL-VhQD/view>.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці адаптивних критеріїв для практичної імплементації стандартів ESG.

20. **Гамоцький Р.О.**, Кривомаз Т.І. Досвід енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни в Україні // Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: X Міжнародний молодіжний конгрес, 27–28 березня 2025 р., Україна, Львів: Збірник матеріалів. – Київ: Яроченко Я. В., 2025. – С. 158. ISBN 978–617–7826–65–0. – DOI: <https://doi.org/10.51500/7826-65-0>. – Режим доступу: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2025/feb/38049/zbirnikhmi_zhnarodniymolodizhniykongres27-28032025fin.pdf.

Особистий внесок здобувача полягає у розгляді досвіду енергозабезпечення багатоповерхових будівель в умовах війни.

21. **Гамоцький Р.О.**, Кривомаз Т.І. Досвід українських міст у диверсифікації енергетичних ризиків // Збірник матеріалів IV Міжнародної науково–практичної конференції «Зелене будівництво–2025»: 9–11 липня 2025 р., Київ. – Київ: КНУБА, 2025. – С. 81–84. – Режим

доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/07/greenbuilding2025.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у розгляді прикладів диверсифікації енергетичних ризиків для міст України.

22. **Hamotskyi R.**, Kryvomaz T. Experience of Ukrainian cities in diversifying energy risks // Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference «Green Building–2025»: July 9–11, 2025, Kyiv. – Kyiv: KNUBA, 2025. – P. 53–56. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/07/greenbuilding2025-en.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у презентації досвіду українських міст та пошуку шляхів підвищення енергетичної незалежності.

23. Kryvomaz T., Tsyba A., **Hamotskyi R.** Digitization improve ESG and energy efficiency // Proceedings of the International Conference «European Green Dimensions: Fundamental, Applied, and Industrial Aspects», June 5–7, 2025, Mykolaiv. – Mykolaiv: PMBSNU, 2025. – P. 46. – Режим доступу: <https://pmbnsu.edu.ua/egd2025abstracts.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у аналізі впливу цифровізації на покращення ESG-показників та енергоефективності у будівельному секторі.

24. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.** Перспективи та ризики технологій відновлюваної енергії // V Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології», 20–21 травня 2025 р., Київ, КНУБА. – С. 138–141. – Режим доступу: http://esmt.knuba.edu.ua/?page_id=82.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні ризиків технологій відновлюваної енергії щодо їх інтеграції у міське середовище.

25. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.** Сучасні шляхи трансформації просторового розвитку міст // IV Міжнародна науково-практична конференція «Девелопмент нерухомості: інновації та трансформації», 29–30 травня 2025 р., Київ. – С. 71–74. – Режим доступу:

<https://gisut.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/CONFERENCE-PROCEEDINGS-2025.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у аналізі сучасних шляхів трансформації просторового розвитку міст.

26. Кривомаз Т., Циба А., **Гамоцький Р.** Проблеми відновлення застарілого та зруйнованого житлового фонду / Міжнародна науково-практична конференція «Енергія Ресурси Екологія», Київ, КНУБА, 3–5 грудня 2025. – С.112–113. – Режим доступу: <https://fise.knuba.edu.ua/fise/ecology-resource-energy/>.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі проблем відновлення зруйнованого житлового фонду та його реновації.

27. Kryvomaz T., Tsyba A., **Hamotskyi R.** Problems of renovation of obsolete and destroyed housing / 5th International scientific and practical conference «Energy. Resources. Ecology», Kyiv, KNUCA, December 3–5, 2025. – P. 74–75. – Режим доступу: <https://fise.knuba.edu.ua/fise/ecology-resource-energy/>.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі проблем відновлення зруйнованого житлового фонду та його реновації.

28. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С. Екологічне управління та планування у зеленому будівництві: методичні вказівки до виконання тестових завдань з дисципліни «Екологічне управління та планування у зеленому будівництві». – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – 28 с.

29. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С. Зменшення вуглецевого сліду як механізм адаптації до змін клімату: методичні вказівки до виконання тестових завдань з дисципліни «Зменшення вуглецевого сліду як механізм адаптації до змін клімату». – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – 24 с.

30. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С. Розробка будівельних проєктів в узгодженні з категоріями стійкості зеленого будівництва: методичні вказівки до виконання тестових завдань з дисципліни «Розробка будівельних проєктів в узгодженні з категоріями стійкості зеленого будівництва». – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – 27 с.

31. Кривомаз Т., Циба А., **Гамоцький Р.**, Ільченко І. Методологія наукових досліджень: методичні вказівки до виконання тестових завдань з дисципліни «Методологія наукових досліджень». – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – 11 с.

32. Kryvomaz T., Tsyba A., **Hamotskyi R.** Opportunities for the Ukrainian construction business in the european green course // European Green Dimensions: Fundamental, Applied, and Industrial Aspects / eds. O. Mitryasova, C. Staddon. – Mykolaiv : PMBSNU ; Bristol : UWE, 2025. – 304 p. – P. 119–130.

33. Кривомаз Т.І., Циба А.М., Ільченко І.С., **Гамоцький Р.О.** Зелене будівництво у відновленні України // Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання : колективна монографія за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції «Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання», м. Київ, 18 жовтня 2023 року / за ред. В. П. Плаван, А. О. Касич, О. О. Бутенко. – Київ : КНУТД, 2024. – 308 с. – С. 11–13.

ЗМІСТ

	АНОТОЦІЯ.....	2
	ВСТУП.....	25
Розділ 1	ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ	
	БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ	
1.1.	Сучасні проблеми декарбонізації та енергетичної безпеки...	33
1.2.	Міжнародний досвід післявоєнної відбудови та підвищення енергоефективності житлового сектору.....	37
1.3.	Стратегія розвитку енергетичного сектору України.....	42
1.4.	Шляхи підвищення енергетичної безпеки житлових будівель.....	47
	Висновки до розділу 1.....	56
Розділ 2	АНАЛІЗ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ	
	ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ	
	БУДІВЕЛЬ	
2.1.	Енергоаудити та енергетичні паспорти будівель на основі тепловізійних досліджень	58
2.2.	Методи автоматизованого дослідження енергоспоживання... 62	62
2.3.	Методи дослідження теплових потоків будівель за допомогою програмних комплексів.....	64
2.4.	Оцінка життєвого циклу будівлі.....	71
	Висновки до розділу 2.....	75
Розділ 3	РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ	
	ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ БУДІВЕЛЬ	
3.1.	Розрахунки енергетичного паспорту будівлі.....	77
3.1.1.	Теплопередача трансмісією.....	78
3.1.2.	Характеристики теплопередачі вентиляцією.....	81
3.1.3.	Характеристики внутрішніх теплонадходжень.....	83
3.1.4.	Характеристики сонячних теплонадходжень.....	84
3.1.5.	Сумарна теплопередача та теплові надходження.....	86

3.1.6.	Динамічні параметри.....	86
3.1.7.	Енергопотреба для опалення та охолодження.....	88
3.1.8.	Енергопотреби гарячого водопостачання	89
3.1.9.	Визначення класу енергоефективності будівлі.....	89
3.2.	Порівняння програмних засобів оцінки теплового балансу будівель.....	90
3.3.	Проведення тепловізійного аналізу будівлі.....	92
3.4.	Аналіз автоматичних систем моніторингу енерговитрат.....	99
3.5.	Впровадження нових систем моніторингу на базі ШІ.....	103
3.6.	Цифрове дослідження проблемних ділянок будівлі.....	107
3.6.1.	Цифрове дослідження двовимірних вузлових моделей.....	108
3.6.2.	Визначення приведених опорів теплопередачі вузлів.....	111
3.6.3.	Дослідження теплообміну конструкцій у 3D–моделях.....	112
3.7.	Додаткові розрахунки екологічних показників будівлі.....	116
3.8.	Визначення та порівняння життєвого циклу будівель.....	120
3.9.	Підходи у сценаріях відновлення України.....	127
	Висновки до розділу 3.....	132
Розділ 4	РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ЗАБЕЗПЕЧЕННЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ. КОНЦЕПЦІЯ СУЧАСНОЇ УПРАВЛІНСЬКОЇ СИСТЕМИ	
4.1.	Ключові рекомендації по забезпеченню енергетичної безпеки багатоповерхових житлових будівель.....	135
4.2.	Створення сучасної управлінської системи у сфері екологічного та енергетичного оцінювання та прийняття рішень.....	140
4.3.	Аналіз впливу глобальних ризиків на прийняття управлінських рішень за методологією PESTEL.....	157
	Висновки до розділу 4.....	161
	ВИСНОВКИ.....	163
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	166

Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації.....	192
Додаток Б. Листи підтримки дисертаційного дослідження.....	201
Додаток В. Дані для розрахунку енергетичного паспорту будівлі.....	205
Додаток Г. Програмні засоби аналізу та розрахунку енергетичних показників.....	211
Додаток Д. Дані та результати цифрового дослідження вузлів.....	214

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність дослідження обумовлена глобальними воєнними, економічними, кліматичними та енергетичними викликами на фоні зростання потреб суспільства щодо забезпечення стабільного розвитку та збереження енергетичних природних ресурсів. У період, коли Україна стикається з численними соціально–економічними та екологічними проблемами, питання енергетичної безпеки набуває нових вимірів, зокрема в контексті відновлення та модернізації житлового фонду.

Пріоритетним напрямком розвитку України є зелена відбудова, яка спрямована на сталий розвиток, підвищення енергоефективності будівель, зменшення впливу на навколишнє середовище і оптимізацію енергоспоживання. Багатоповерхові будівлі, які складають значну частину житлового фонду країни, потребують переосмислення в контексті енергетичної безпеки. Удосконалення підходів до проектування, будівництва та експлуатації таких будівель є необхідним для забезпечення енергоефективності, що є ключовим фактором у досягненні енергетичної незалежності та зниженні витрат на енергоресурси.

В Україні спостерігається тенденція до збільшення попиту на житло, зокрема в мегаполісах і великих містах, що супроводжується будівництвом нових багатоповерхових комплексів. Водночас, збереження ресурсів та зменшення навантаження на енергетичні системи стало важливим завданням для урядів, органів місцевого самоврядування та громадськості. Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель включає в себе аналіз існуючих стандартів, впровадження новітніх технологій, адаптацію будівель до умов змін клімату та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Крім того, енергетична безпека є важливим аспектом в контексті геополітичної ситуації в Україні, яка відчуває зовнішні загрози в енергетичній сфері, зокрема від залежності від зовнішніх постачальників

енергоресурсів. Тому оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель має бути комплексною, з урахуванням економічних, екологічних та технічних аспектів. Однією з головних задач є визначення шляхів зменшення споживання енергії в таких будівлях, що, в свою чергу, сприятиме зниженню негативного впливу на економіку та екологію країни, а також розроблення нового комплексного підходу в управлінні енергоспоживання будівель.

Актуальність дослідження також обумовлена необхідністю розробки нових стандартів та підходу для енергоефективного будівництва та реконструкції багатоповерхових будівель у період воєнних загроз, а також їх інтеграції в рамках зелених ініціатив та сталого розвитку. Це включає в себе оцінку не лише енергетичних витрат будівель, але й економічної доцільності застосування енергоефективних технологій, що знижують загальні витрати на експлуатацію будівель та поліпшують їх енергетичну незалежність.

Таким чином, дослідження та удосконалення підходів до оцінки енергетичної безпеки багатоповерхових будівель у зеленій відбудові України має важливе значення як з наукової, так і з практичної точки зору. Це дозволить визначити основні проблеми будівель та шляхи їх вирішення, що забезпечить не тільки зниження витрат на енергоресурси, але й підвищить енергоефективність на рівні держави.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційне дослідження виконано відповідно до «Державної програми термомодернізації будівель до 2030 року», «Національного плану дій з енергоефективності», «Національної стратегії низьковуглецевого розвитку», «Стратегії синергії енергоефективності, безпеки і сталого розвитку», «Енергетичної стратегії України на період до 2050 року (ЕСУ)», «Національної економічної стратегії на період до 2030 року (НЕС)», а також у межах тематики науково–дослідної роботи Київського національного університету будівництва і архітектури «Зелені стандарти побудованого середовища» (номер державної реєстрації 0121U111726).

Мета дослідження: удосконалити науково-методичні підходи щодо підвищення екологічності багатоповерхових будівель та формування комплексної стратегії шляхом оцінювання енергетичної безпеки в процесі зеленої відбудови України.

Об'єкт дослідження: система забезпечення енергетичної безпеки багатоповерхових житлових будівель в умовах зеленої відбудови України під час воєнного та післявоєнного періоду.

Предмет дослідження: теоретико–методологічні та прикладні аспекти оцінювання рівня енергетичної безпеки багатоповерхових будівель та шляхи її підвищення в контексті зеленої відбудови України.

Відповідно до мети роботи були поставлені наступні завдання досліджень:

1. Дослідити досягнення цілей сталого розвитку, насамперед забезпечення доступної та чистої енергії, пом'якшення наслідків зміни клімату та сталого розвитку міст і спільнот, шляхом обґрунтування еколого орієнтованих підходів, що забезпечують мінімізацію негативного впливу на довкілля.

2. Дослідити міжнародний та вітчизняний досвід забезпечення енергетичної безпеки та енергоефективності будівель і провести аналіз сучасного стану енергетичної безпеки будівель в Україні.

3. Оцінити методики визначення показників та критеріїв енергетичної безпеки багатоповерхових будівель з урахуванням специфіки зеленої відбудови.

4. Розробити комплексний управлінський підхід в дослідженні та покращенні теплообмінних процесів багатоповерхових будівель.

5. Запропонувати методичні рекомендації, стратегії, робочі моделі та методики підвищення енергетичної безпеки багатоповерхових будівель з урахуванням визначених ризиків енергетичної безпеки для поєднання стратегії енергонезалежності з урахуванням принципу «відбудувати краще, ніж було».

6. Визначити потенціал енергозбереження та декарбонізації фонду багатоповерхових будівель. Змоделювати сценарії енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в Україні з урахуванням принципів сталого розвитку.

Методи досліджень. У дослідженні застосовувались методи, що базуються на системному аналізі та загальних принципах, таких як об'єктивність, причинність та актуалізм. Економіко–статистичний аналіз – для оцінки поточного стану енергетичної безпеки. Методи експертних оцінок і теорії прийняття рішень – для розробки багатокритеріальної оцінки енергетичної безпеки будівель. Порівняльний аналіз – для дослідження закономірностей та особливостей енергетичної безпеки в різних умовах. Методи моделювання – для прогнозування стану енергетичної безпеки та розробки сценаріїв її забезпечення. Метод диверсифікації енергетичних ризиків – для визначення стратегій підвищення енергетичної безпеки в умовах воєнного та післявоєнного періоду.

Матеріалом дослідження стали дані нормативно–правової бази з питань енергетичної безпеки та енергоефективності будівель, статистичні дані щодо енергоспоживання, аналітичні звіти щодо стану енергетичної інфраструктури, показники енергоефективності наявного житлового фонду, дані моніторингу енергетичних ризиків у житловому секторі, матеріали щодо застосування альтернативних джерел енергії в багатоповерхових будівлях, практичні результати тепловізійних обстежень будівель.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційних досліджень полягає в розкритті особливостей забезпечення енергетичної безпеки в умовах війни та удосконаленні сучасних методів оцінки будівель з урахуванням екологічної складової їх функціонування.

Вперше розроблено концепцію забезпечення енергетичної безпеки багатоповерхових будівель, яка на відміну від традиційних підходів, враховує не лише показники енергоефективності, а й стійкість будівель до

аварійних та стабілізаційних відключень енергопостачання як невід'ємну складову енергетичної безпеки в умовах воєнних загроз.

Вперше обґрунтовано роль енергетичної безпеки окремих будівель як суттєвий елемент підвищення стійкості систем енергозабезпечення, що сприяє формуванню енергетичної безпеки держави в умовах енергетичного шантажу та кризових явищ за принципом сталого розвитку «діяти локально і мислити глобально».

Удосконалено науково-методичні підходи до забезпечення енергетичної безпеки багатоповерхових будівель на засадах концепції стійкості, які передбачають інтеграцію технічних рішень щодо підвищення автономності будівель, диверсифікації джерел енергопостачання та зменшення залежності від централізованих енергетичних систем.

Удосконалено управлінські підходи до прийняття рішень щодо енергоефективності та екологічності будівель в умовах воєнних загроз, що відрізняються від традиційних методів мирного часу згуртованістю стейкхолдерів та скоординованістю взаємодії.

Набуло подальшого розвитку дослідження принципу «насамперед, енергоефективність і екологічність» у системах оцінювання енергетичної безпеки багатоповерхових будівель під час планування відбудови. Визначення напрямків сучасних підходів до забезпечення енергетичної безпеки багатоповерхових будівель у час війни, що базуються на концепції стійкості.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

Розроблено та апробовано прикладний алгоритм комплексної оцінки енергетичної безпеки багатоповерхових будівель, який включає розрахунок енергоефективності, визначення проблемних зон на основі теплообмінних процесів, тепловізійне обстеження та подальший моніторинг енергетичного балансу після впровадження заходів.

Сформовано практичні рекомендації та технічні рішення щодо підвищення енергетичної безпеки багатоповерхової забудови в умовах

зеленої відбудови України, з урахуванням підвищення автономності та зниження енергозалежності.

Розроблено інструменти підтримки управлінських рішень, зокрема: схему моніторингу енерговитрат із використанням технологій штучного інтелекту; алгоритм прийняття енергоефективних рішень у процесі реконструкції та будівництва; підхід до впровадження енергоменеджменту будівель.

Запропоновано врахування екологічних критеріїв у системі оцінювання енергетичної безпеки будівель із застосуванням принципів аналізу життєвого циклу, що створює основу для прийняття екологічно обґрунтованих рішень під час реконструкції та нового будівництва.

Особистий внесок здобувача полягає в оцінці сучасного енергетичного та екологічного стану багатоповерхових будівель, удосконаленні системи оцінки для формування екологічно безпечного середовища в умовах антропогенного навантаження і військової агресії шляхом підбору та адаптації сучасних досягнень науки і техніки, а також у створенні нового підходу в контролі та управлінні функціонування будівель, що орієнтований на сталий післявоєнний розвиток. Основні результати дисертаційних досліджень представлені в наукових працях, які опубліковані в міжнародних та вітчизняних журналах.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, методів, результатів і рекомендацій дисертаційної роботи відповідають логічній послідовності у вирішенні поставлених завдань з визначенням методики досліджень та теоретичної послідовності. Основні результати цього дослідження опубліковані в рецензованих наукових фахових виданнях України та зарубіжжя, представлені на спеціалізованих конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи було викладено на II Міжнародній науково-практичній конференції «Green Construction» («Зелене будівництво») (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 13–

14 квітня 2023 р.), IV Міжнародній науково–практичній конференції «Філософія науки, техніки і архітектури в гуманістичному вимірі» (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 10–11 листопада 2023 р.), Всеукраїнській науковій конференції «Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання» (Київський національний університет технологій і дизайну, м. Київ, 18 жовтня 2023 р.), IV Міжнародній науково–практичній конференції «Екологія, ресурси, енергія» (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 23–24 листопада 2023 р.), Всеукраїнській науково–практичній інтернет–конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України» (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, 2–3 листопада 2023 р.), III Міжнародній науково–практичній конференції «Зелене будівництво» (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 16 квітня 2024 р.), IX Міжнародному молодіжному конгресі «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 28–29 березня 2024 р.), Міжнародній науково–практичній конференції «Енергія Ресурси Екологія» (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 27–29 листопада 2024 р.), Second International Research–to–Practice Conference «Climate Services: Science and Education» (Odesa I.I. Mechnikov National University, м. Одеса, 16–18 April 2025), X Міжнародному молодіжному конгресі «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, 27–28 березня 2025 р.), IV Міжнародній науково–практичній конференції «Зелене будівництво–2025» (КНУБА, м. Київ, 9–11 липня 2025 р.), International Conference «European Green Dimensions: Fundamental, Applied, and Industrial Aspects» (Petro Mohyla Black Sea National University, м. Миколаїв, 5–7 June 2025), V Міжнародній

науково–практичній конференції «Енергоощадні машини і технології» (КНУБА, м. Київ, 20–21 травня 2025 р.), IV Міжнародній науково–практичній конференції «Девелопмент нерухомості: інновації та трансформації» (м. Київ, 29–30 травня 2025 р.), VI Міжнародній науково–практичній конференції «Енергія. Ресурси. Екологія. Багатофункціональні еко– та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях» (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 3–5 грудня 2025 р.).

За результатами дослідження отримано листи підтримки результатів дисертаційного дослідження будівельною компанією ТОВ «АТЛАНТ БУД КОНСТРАКШН», ТОВ «ФІРМА «БУД- КОМПЛЕКТ»» для використання у проєктній, архітектурній, будівельній діяльності. Також результати дисертаційного дослідження були прийняті для роботи Андрушківською сільською радою, а також впроваджені в навчальний процес КНУБА при підготовці студентів спеціальності 101 «Екологія» з таких дисциплін: «Екологічне управління та планування у зеленому будівництві», «Зменшення вуглецевого сліду як механізм адаптації до змін клімату», «Розробка будівельних проєктів в узгодженні з категоріями стійкості зеленого будівництва», «Методологія наукових досліджень». Проведено лекцію «Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в зеленій відбудові України» та видано ряд методичних вказівок.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 33 наукові праці, з яких 10 статей, зокрема 8 – у фахових виданнях України, 2 – у закордонних фахових виданнях, 2 статті в колективних монографіях, 4 навчально–методичні видання, 17 публікацій в матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 221 сторінці і складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 133 сторінки друкованого тексту. Робота містить 14 таблиць, 24 рисунки, перелік використаних джерел із 156 найменувань, 5 додатків.

РОЗДІЛ 1

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ

1.1. Енергетична безпека в умовах глобальних загроз

Інтенсивне використання людством викопних видів палива, нераціональні моделі енергоспоживання та ресурсовикористання, а також неефективні способи виробництва і споживання, становлять ключові антропогенні чинники, що спричиняють зростання концентрації парникових газів у атмосфері Землі [151]. Згідно з даними WORLD DATA LAB, основними джерелами антропогенних викидів є сектори енергетики, промисловості, сільського господарства, транспорту та житла (рис. 1.1).

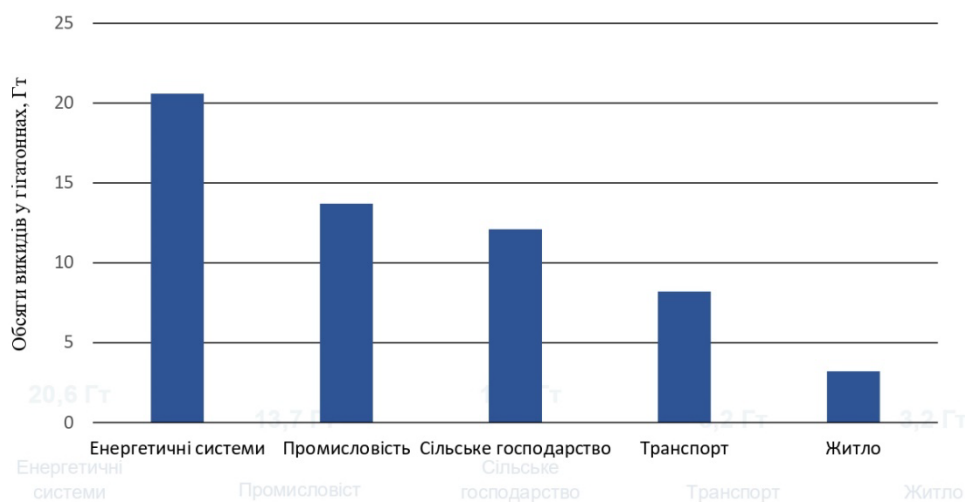


Рис. 1.1. Обсяги викидів у гігатоннах по секторам економіки.

Джерело: WORLD DATA LAB

Вплив антропогенного навантаження на природне середовище проявляється у зростанні частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ, зокрема посух, частих паводків та коливань температури. Комплексне вирішення цієї проблеми можливе лише за умови трансформації світової енергетичної, виробничої та споживчої парадигми, включно з переходом до

низьковуглецевих технологій у виробництві енергії, транспорті, будівництві. В сучасних умовах воєнних загроз проблема використання енергетичних ресурсів набула особливої гостроти, оскільки, поряд із завданнями забезпечення сталого розвитку, постає необхідність у оперативному, стійкому й раціональному функціонуванні систем енергозабезпечення для гарантування енергетичної безпеки держави.

Війна в Україні спричинила безпрецедентні виклики, з якими раніше не стикалася жодна держава сучасного світу, в тому числі і у сфері енергетики, будівництва та екології. Тому завдання пошуку ефективних системних підходів до забезпечення енергетичної безпеки в умовах зростання воєнних загроз на тлі кліматичної кризи постає перед українським суспільством як надзвичайно важливе та актуальне.

Енергетична безпека – це здатність держави, регіону чи громади стабільно забезпечувати потреби розвитку в паливно–енергетичних ресурсах належної якості. Вона ґрунтується на мінімізації реальних і потенційних загроз у сфері енергопостачання та гарантує доступність енергії як у звичайних умовах, так і під час надзвичайних ситуацій [114].

Досягнення енергетичної безпеки на будь–яких рівнях вимагає комплексного підходу, що охоплює різноманітні аспекти виробництва, постачання, споживання енергії. Це підтверджується визначенням енергетичної безпеки держави в Новій енергетичній стратегії України до 2020 року (НЕС–2020), яке було представлено наступною формулою: енергозаощадження й енергоефективність + власні енергоресурси (вугілля, природний газ, нафта, біомаса, ВДЕ) + диверсифікація імпорту + стратегічні резерви + інтеграція в енергетичний простір ЄС [107].

Енергетична політика ЄС визначає безпеку постачання, як стан забезпечення енергоресурсами, за якого основні майбутні енергетичні потреби мають бути задоволені завдяки спільному використанню внутрішніх енергетичних ресурсів та стратегічних резервів у прийнятних економічних умовах та з використанням диверсифікованих та стабільно

доступних зовнішніх джерел енергоресурсів. Саме диверсифікація джерел постачання енергоресурсів виступає одним із шляхів гарантування безпеки постачання [121].

В останні роки енергетична безпека низки країн суттєво погіршилась під впливом глобальних воєнних, економічних та кліматичних загроз. З початком повномасштабної російсько–української війни у 2022 році низка європейських країн обмежила імпорт російського природного газу санкційними заходами, що призвело до різкого зростання цін та суттєвого скорочення обсягів постачання. У травні 2022 року Європейська комісія представила план REPowerEU для швидкого зменшення залежності від російського імпорту палива та прискорення зеленого переходу [20, 58]. Втілення плану передбачає зниження або ліквідацію залежності ЄС від російського палива, яке використовується у якості економічної та політичної зброї. Крім того, відмова від використання викопних ресурсів є ключовим засобом запобігання кліматичним змінам.

Також європейська комісія встановила перспективні плани скорочення викидів парникових газів на 80% протягом наступних 40 років. Для цього запропоновано посилити довгострокові заходи щодо енергоефективності, включаючи збільшення додаткової обов'язкової цілі енергоефективності до 13%, для відновлюваних джерел енергії – до 45% до 2030 року у рамках пакета «Fit for 55» [138]. Також передбачається масове розширення та прискорення використання відновлюваних джерел енергії у виробництві електроенергії, промисловості, будівництві та транспорті. «Стратегія сонячної енергетики ЄС» подвоїть сонячну фотоелектричну потужність та встановить 600 ГВт до 2030 року. Порівняно з 2022 роком, у 2023 році галузь ВДЕ розширилась приблизно на 20%, побудувавши близько 500 ГВт сонячних, вітрових, акумуляторних накопичувачів у всьому світі [51].

Зниження витрат на ключові компоненти, зокрема сировину та транспортну логістику, а також активне розширення присутності на ринку виробників з Китаю, чинить істотний вплив на розвиток сектору вітрової

енергетики. Починаючи з 2023 року, спостерігається чітка кореляція між цінами на вітрові турбіни та загальними капітальними витратами, що дозволяє прогнозувати поступове їхнє вирівнювання та зниження у середньостроковій перспективі [10]. Водночас, домінування китайських виробників на глобальному ринку створює додаткові ризики, пов'язані з концентрацією постачання в межах одного географічного регіону, що створює загрозу монополізації та обмеження диверсифікації джерел закупівлі.

Усе більше держав-членів ЄС запроваджують нормативні обмеження щодо встановлення котлів на викопному паливі у новозбудованих житлових об'єктах, а також поступово вводять заборони на заміну існуючих нафтових і газових систем опалення [70]. У період з 2020 по 2021 роки світові обсяги продажу теплових насосів зросли на 13%, при цьому 34% від загального обсягу реалізації припадає на країни Європейського Союзу. Європейська комісія за ініціативи REPowerEU планує вдвічі швидше розгортання теплових насосів та заходів щодо інтеграції геотермальної та сонячної теплової енергії для модернізації централізованої та комунальної системи опалення. Теплові насоси розглядаються як ключовий інструмент декарбонізації житлового теплопостачання. Стверджується, що у короткостроковій перспективі інноваційні розробки будуть зосереджені на технологічних рішеннях, що сприяють зниженню початкових інвестиційних витрат, а також на впровадженні інтелектуальних і адаптивних функцій, які оптимізують процес встановлення та експлуатації теплових насосів [2].

Одним із ключових напрямів стратегій декарбонізації та диверсифікації джерел енергії стало відновлення та розширення використання ядерної енергетики, зокрема шляхом продовження експлуатації існуючих атомних електростанцій [87]. У результаті тривалих міжінституційних консультацій та політичних дебатів ядерну енергетику було офіційно включено до Таксономії сталої економічної діяльності Європейського Союзу [11]. Це рішення відкрило можливості для розвитку

новітніх ядерних технологій, зокрема малих модульних реакторів (SMR) та реакторів четвертого покоління. Очікується, що демонстраційні та перші комерційні зразки нових ядерних установок можуть бути введені в експлуатацію до 2035 року, тоді як масштабне розгортання передових конструкцій прогнозується не раніше 2040 року. Водночас ці технології стикаються з низкою викликів, зокрема у сфері ліцензування, формування ланцюгів постачання та економічної ефективності, що може стримувати темпи їхнього впровадження.

Як видно з наведених тенденцій, дедалі більше країн усвідомлюють, що підвищення рівня енергетичної безпеки є критично важливим. У відповідь на глобальні виклики країни прагнуть посилити та інституційно закріпити енергетичну безпеку шляхом диверсифікації джерел постачання, нарощування частки відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та модернізації критичної інфраструктури.

1.2. Міжнародний досвід післявоєнної відбудови та підвищення енергоефективності житлового сектору

Аналіз міжнародного досвіду післявоєнної реконструкції міст дозволяє окреслити низку практик, релевантних для забезпечення енергетичної безпеки в умовах війни та післявоєнного відновлення. У ширшому контексті до релевантних практик можна віднести й підходи до реконструкції житлового фонду після економічних та кліматичних криз. Такі програми, як енергоефективне відновлення пошкодженого житла та принцип «build back better», орієнтують відбудову не лише на відновлення втраченого, а на створення стійкого, енергоефективного та кліматично адаптованого житлового середовища.

Чисельні дослідження демонструють, що впровадження енергоефективних технологій у процесі відбудови житлової інфраструктури сприяє стабілізації енергопостачання для населення та зменшенню

залежності від централізованих джерел енергії. Зокрема, приклади повоєнної відбудови в Європі демонструють поєднання відновлення інфраструктури з модернізацією енергетичних систем, інтеграцією відновлюваних джерел енергії та принципів «зеленої» урбаністики.

Одним із перспективних напрямів відбудови та реновації житлового фонду є впровадження концепції будівель з нульовим енергоспоживанням (Zero Energy Buildings, ZEB, nZEB), які здатні суттєво знижувати антропогенне навантаження на довкілля та сприяти відновленню природних екосистем. Приклади енергетичної реновації від капітального ремонту до рівня nZEB в Естонії показують, що глибока реконструкція старих багатоквартирних будинків дозволяє досягти вимог енергоефективності з майже нульовим споживанням енергії. У рамках пілотного проєкту було здійснено глибоку реконструкцію типового багатоповерхового будинку із збірних залізобетонних панелей, що передбачала комплексне підвищення теплозахисних характеристик огорожувальних конструкцій та повну модернізацію інженерних систем. Завдяки оновленню nZEB, потреба в енергії, що постачається (енергія опалення + електроенергія), скоротилась приблизно на 70%, а потреба в первинній енергії – приблизно на 60% [39].

Окрім цього починаючи з 2000-х років Естонія через державну агенцію KredEx запустила спеціальні програми модернізації радянських багатоквартирних будинків із грантами (до 35–50% вартості) та пільговими кредитами на комплексну реновацію (утеплення фасадів, заміна вікон, вентиляція з рекуперацією) [37]. За рахунок цих інструментів модернізовано понад 100 тис. квартир, середнє енергоспоживання у відремонтованих будинках зменшилось приблизно на 40%, а в окремих проєктах – до 65%, що радикально підвищило енергонезалежність старого житлового фонду [36].

У контексті реновації житлового фонду слід відзначити досвід Нідерландів. З 1970-х років, реагуючи на нафтові кризи, країна ввела вимоги до теплоізоляції будівель, а з 1995 року – показник EPC (енергетичний показник будівлі), який поступово посилювали. У 2013 році

в межах «Energy Agreement for Sustainable Growth» було встановлено ціль майже нульового споживання енергії в новобудовах до 2020 року та масову реновацію існуючого фонду, зокрема підвищення енергокласу щонайменше на дві сходинки для сотень тисяч будинків [47]. Такий підхід з акцентом на утеплення, гібридні теплові насоси, енергетичне маркування й цільові програми для соціального житла дав 20–30% зниження споживання енергії у відремонтованих будівлях та суттєве скорочення залежності від газу [46]. Також дослідження механізмів підвищення енергоефективності у некомерційному житловому секторі Нідерландів продемонструвало економічну доцільність використання природного освітлення, як енергоефективного елементу проектування, що використовується в будівлях nZEB. Відзначено зростання попиту на низьковуглецеві житлові будинки з боку домогосподарств і представників будівельних компаній [155].

Дослідження рішень австралійських домогосподарств щодо модернізації житла до рівня nZEB показують, що така модернізація покращує енергетичний баланс будівель, підвищує комфорт проживання, є економічно доцільною та стимулює стійкий попит на подібні рішення [43].

Після нафтової кризи 1973 року США у 1976 році створили федеральну програму Weatherization Assistance Program (WAP) для «післякризового» підвищення енергоефективності житла малозабезпечених шляхом утеплення, герметизація, модернізація опалення за коштів держави [4]. За десятиліття програма охопила понад 8 млн домогосподарств, даючи типові заощадження енергії 20–30% на будинок, зниження рахунків і підвищення енергетичної безпеки вразливих груп населення. Дослідження демонструє збільшення доданої вартості продажної ціни для енергоефективних / зелених будинків у межах приблизно 2–8% залежно від ринку, типу сертифікації та локальних умов. [155].

У 1990–х–2000–х роках Німеччина після об'єднання й модернізації повоєнного житлового фонду запустила масштабні програми термомодернізації через банк KfW та послідовне посилення будівельних

норм EnEV (1995, 2002, 2007, 2009) [48]. Державні пільгові кредити й гранти на утеплення, заміну вікон, модернізацію систем опалення вимагали досягнення стандартів, близьких до новобудов. Це дало зниження питомого споживання тепла до рівня 50–75 кВт·год/м²·рік та суттєве скорочення викидів CO₂ [23]. Аналіз ефективності інструментів енергетичної безпеки житлового сектору Німеччини свідчить про високий рівень нормативної інтеграції принципів енергоефективності у житлове будівництво, а також демонструє масштабність програм модернізації. Дослідження показують, що німецька модель орієнтована на поєднання технічних рішень з фінансовими стимулами, що дозволяє досягати стабільних показників енергозбереження у житловому секторі [145].

Позитивних показників внаслідок теплової модернізації житла змогла досягти також Польща. Вона у 1998 році запустила Thermomodernization and Renovation Fund – одну з перших у Європі систем держпідтримки термомодернізації будівель (субсидії до кредитів на утеплення, заміну систем тепlopостачання, модернізацію джерел тепла) [56]. У 1999–2012 роках за підтримки фонду реалізовано близько 25 тис. проєктів із інвестиціями, що у кілька разів перевищили обсяг грантів. Це зменшило витрати домогосподарств на тепло на 30–40%, покращило технічний стан 50–100 тис. будівель і дало скорочення споживання вугілля та пов'язаних викидів [5].

Проєкти зеленого будівництва, реалізовані у місті Краків, Малопольського регіону Польщі, позиціонуються у стратегічних документах як «engine room». Стратегія розвитку міста до 2030 року базується на концепції «Smart City», що включає шість ключових складових, кожна з яких має безпосередній вплив на енергетичну стійкість міського середовища: Smart People (високий рівень кваліфікації мешканців); Smart Environment (впровадження заходів з оптимізації енергоспоживання, зменшення викидів); Smart Governance (формування системи управління з участю всіх користувачів міського простору); Smart Living (доступ до

державних послуг, якісної освіти, охорони здоров'я); Smart Economy (підтримка креативних індустрій, інновацій, гнучкий ринок праці); Smart Mobility (розвиток транспортних систем) [148].

У дослідженні, присвяченому реконструкції міст колишнього Поморського воєводства Польщі, наголошується на важливості поетапного планування, адаптації архітектурних рішень до сучасних вимог енергоефективності та залучення місцевих ресурсів. Автори зазначають, що досвід Польщі у сфері післявоєнного відновлення може бути використаний як основа для формування стратегій реконструкції українських міст [38].

Ряд наукових досліджень розглядає також вплив демографічних, економічних та культурних змін на структуру енергоспоживання у житловому секторі. Досвід Швеції показує, що енергоефективність житла розглядається не ізольовано, а в комплексі з демографічною політикою, екологічними цілями, фінансовими стимулами та якістю життя мешканців. У програмах модернізації житлового фонду поєднуються утеплення, розвиток централізованого теплопостачання й ВДЕ з інструментами соціального захисту, орендною політикою та збереженням культурної цінності забудови [155, 8].

У роботах, присвячених реконструкції житла в Боснії і Герцеговині, Косово, Азербайджані, Руанді, Північному Іраку, Еритреї та Лівані, підкреслюється, що ефективність післявоєнних програм відбудови може суттєво обмежуватись інституційними та організаційними проблемами: слабкі державні інститути, корупційні ризики, нестача управлінських і професійних спроможностей, складність реалізації великих інфраструктурних проєктів, залежність від зовнішнього фінансування, дефіцит кваліфікованих кадрів у будівельному секторі, порушення логістичних ланцюгів та обмежений доступ до будівельних матеріалів [113].

Проведений нами аналіз міжнародних тенденцій свідчить про збереження глобального курсу на екологічну трансформацію. Це проявляється у сталому розвитку енергоефективного будівництва та

впровадженні ресурсозберігаючих технологій. Адаптація цього досвіду та науково–практичних досліджень є доцільним для підвищення енергозабезпечення житлового сектору України.

1.3. Стратегія розвитку енергетичного сектору України

Війна в Україні стала джерелом безпрецедентних викликів, з якими ще не стикалася жодна країна, в тому числі і у сфері енергетики, будівництва та екології. Ще у довоєнний період Україна прагнула стати повноцінним членом ЄС та прийняла зобов'язання у сфері кліматичної та енергетичної політики. Процес євроінтеграції було узгоджено із цілями Європейського зеленого курсу (EU Green Deal, EGD) по зменшенню викидів CO₂ на 55% до 2030 року та досягненню кліматичної нейтральності континенту до 2050 року [146]. Головною метою Енергетичного союзу є забезпечення споживачів сталими, безпечними, доступними та конкурентоспроможними енергоресурсами, а також стимулювання наукових досліджень та інновацій шляхом залучення інвестицій. [93, 94]. Україна, як учасник Європейського енергетичного співтовариства виконувала і продовжує виконувати зобов'язання у п'яти ключових напрямках: енергетична безпека, енергоефективність, декарбонізація економіки, а також дослідження, інновації та забезпечення конкурентоспроможності [137]. Цілісна та послідовна стратегія України передбачає розвиток енергоефективності та відновлюваної енергетики, що відповідає не лише вимогам Угоди про асоціацію з ЄС, але й 17 цілям сталого розвитку, вісім з яких спрямовано на кардинальні зміни в енергетичній політиці (рис. 1.2) [73].

Хоча до повномасштабного вторгнення темпи впровадження реформ залишалися помірними, Україна демонструвала послідовний прогрес у сфері клімату та енергетики. У 2011 році, після приєднання до Договору про Енергетичне співтовариство, почалася імплементація директив ЄС щодо оцінки впливу на навколишнє середовище, системи торгівлі викидами

парникових газів, розвитку відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та контролю промислових викидів [111].



Рис. 1.2. Глобальні цілі сталого розвитку пов'язані з енергетичною політикою. Джерело: Держенергоефективності, 2023

Україна була однією з перших країн, які ратифікували Паризьку угоду у 2016 році [104]. У 2019 році наша держава розпочала адаптацію політики до засад Європейської Зеленої Угоди шляхом впровадження інструментів кліматичної політики, низьковуглецевої промисловості, зелених фінансів, енергоефективності та зеленого водню. У 2021 для координації роботи зеленого переходу було розпочато роботу над системою торгівлі викидами вуглецю (ETS) [65].

До повномасштабного вторгнення, українська енергосистема на 70% поповнювалась чистою електроенергією, що не спричиняє викидів CO₂, завдяки значній ролі атомних і гідроелектростанцій, а також стрімкому зростанню частки відновлюваних джерел енергії, яка на 2021 рік досягла 14,3% (таблиця.1.1) [110].

Таблиця 1.1

Встановлена потужність електростанцій України, по роках, ГВт.

Джерело: ГС «УВЕА», НЕК «Укренерго», 2021

Рік	Сумарна встановлена потужність, ГВт	АЕС, ГВт	АЕС, %	ТЕС ГК, ГВт	ТЕС ГК, %	ТЕЦ та інші ТЕС, ГВт	ТЕЦ та інші ТЕС, %	ГЕС та ГАЕС, ГВт	ГЕС та ГАЕС, %	ВЕС, СЕС та БіоЕС, ГВт	ВЕС, СЕС та БіоЕС, %
2014	55,1	13,8	25,1	27,7	50,3	6,6	12,0	5,9	10,6	1,1	2,0
2015*	54,8	13,8	25,2	27,8	50,7	6,5	11,8	5,9	10,7	0,8	1,5
2016	55,3	13,8	25,0	27,8	50,3	6,5	11,8	6,2	11,2	1,0	1,7
2017**	51,7	13,8	26,7	24,6	47,5	5,9	11,5	6,2	12,0	1,2	2,3
2018	49,7	13,8	27,8	21,8	43,9	6,1	12,3	6,2	12,6	1,7	3,4
2019	54,4	13,8	25,4	21,8	40,0	6,1	11,2	6,3	11,6	6,4***	11,8
2020	54,7	13,8	25,2	21,8	39,8	6,1	11,1	6,3	11,5	6,6	12,1
2021	56,1 ¹	13,8	24,6	21,8	38,8	6,1	10,8	6,3	11,2	8,1	14,3

Агресія росії спричинила системне руйнування відновлюваної енергетики України через цілеспрямовані удари по критично важливих енергетичних об'єктах, серед яких значну частку становлять сонячні та вітрові електростанції, зосереджені у південних і південно-східних регіонах, що стали зонами інтенсивних бойових дій (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Пошкоджені російськими військами українські об'єкти ВДЕ.

Джерело: ГС «УВЕА», компанії з ВДЕ, 2022

Окупація територій із високою концентрацією зелених станцій призвела до фактичного виведення їх з експлуатації, що суттєво знизило частку відновлюваних джерел у національному енергобалансі [139]. Внаслідок систематичних атак на об'єкти електрогенерації, високовольтні лінії та трансформаторні підстанції, енергетичний сектор зазнав масштабних втрат та частково втратив виробничі можливості. Атомна та гідроенергетика України також зазнали істотних втрат через повне відключення Запорізької АЕС і руйнування Каховської ГЕС. Внаслідок масованих атак РФ на енергетичну інфраструктуру України, було значно пошкоджено або знищено більшу частину високовольтних ліній електропередач і підстанцій, а також завдано шкоди об'єктам системи тепlopостачання. Щоденні обстріли з боку росії продовжують руйнувати критичну інфраструктуру країни [124].

Війна також вплинула на виробничі потужності традиційної енергетики, що додатково підсилює залежність від викопного палива. Після втрати Україною двох третин власного видобутку внаслідок окупації частини Донецької та Луганської областей постала нагальна потреба диверсифікувати імпорт вугілля з інших держав [3]. Водночас зменшення запасів органічних енергоресурсів і високий рівень викидів від ТЕС і ТЕЦ зумовлюють критичну необхідність прискорення переходу до відновлюваних джерел енергії [134].

Від'єднання від об'єднаної енергосистеми росії та Білорусі з одночасною інтеграцією до енергетичної системи ЄС ENTSO–E стали важливим стратегічним рішенням на шляху зміцнення енергетичної незалежності України [29]. Навіть попри війну, Україна змогла відокремити енергетичні підприємства, запустила конкурентні ринки газу та електроенергії, поставила цілі та розробила плани дій щодо розвитку відновлюваної енергетики та підвищення енергоефективності будівель, запровадила європейську практику оцінки впливу на навколишнє середовище та створила правову базу для система моніторингу, звітності та

верифікації викидів парникових газів (MRV) [28]. Стратегічний план реконструкції передбачає не лише відновлення зруйнованої інфраструктури, але й оцінює відбудову як можливість створення нової системи управління ресурсами, що відповідає принципам сталого розвитку, енергетичної безпеки та кліматичної нейтральності [49].

Серед ключових стратегій зміцнення енергетичної безпеки України виділяють: диверсифікацію джерел постачання енергоресурсів, підвищення енергоефективності, розвиток відновлюваних джерел енергії, удосконалення енергетичної інфраструктури, розширення імпорتنих альтернатив, зміцнення нормативно-правової бази, поглиблення міжнародної співпраці, підвищення енергетичної автономії регіонів, розбудову екологічно ефективного транспорту, а також посилення кібербезпеки. Подальше оновлення енергетичного сектору України згідно Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України має базуватися на трьох ключових напрямках: забезпеченні енергетичної безпеки країни, інтеграції України до ЄС та виконанні міжнародних зобов'язань в єдиній стратегії, що поєднує енергоефективність, декарбонізацію та розвиток відновлюваних джерел енергії (рис. 1.4) [73].



Рис. 1.4. Стратегічне поєднання енергоефективності, декарбонізації та ВДЕ. Джерело: Держенергоефективності, 2023

1.4. Шляхи підвищення енергетичної безпеки житлових будівель

Найкращим і практично обов'язковим напрямом забезпечення енергетичної безпеки України в умовах військової агресії та післявоєнної кризи є диверсифікація енергетичних ризиків, суттєвою складовою якої є енергозабезпечення житлових багатоповерхових будівель в процесі їх відбудови, реконструкції та планування.

У загальному вигляді диверсифікація охоплює три аспекти: 1) диверсифікацію джерел постачання енергії (енергоносіїв); 2) диверсифікацію постачальників енергоносіїв; 3) диверсифікацію локацій окремих енергетичних об'єктів за просторовим (географічним, територіальним) принципом [64, 50]. Диверсифікація джерел постачання енергії передбачає використання комбінації та можливості взаємозаміни різноманітних джерел енергії, видів енергоресурсів, паливних циклів по виробленню енергії чи тепла. Взаємодія з різними постачальниками енергії унеможливує монополізацію ринку однією компанією. Це ж стосується не тільки сфери безпосереднього виробництва енергії, але й обслуговування всієї системи її постачання до споживачів. Просторова або географічна диверсифікація передбачає територіальний розподіл локацій окремих енергетичних об'єктів таким чином, щоб їх функціонування не могло бути порушено внаслідок однієї події, локальної катастрофи, несправності або збою [64].

Енергетична безпека будівель впливає на низку ключових аспектів їх функціонування, включаючи сталість експлуатації, комфорт мешканців, загальну стійкість інфраструктури та стан довкілля [82]. Вона дозволяє значно зменшити енерговитрати, адже ефективні сучасні рішення для ізоляції, опалення, кондиціонування повітря та освітлення сприяють ощадному використанню ресурсів і знижують витрати на комунальні послуги. Енергоефективні будинки наразі відрізняються стійкістю до змін цін на енергію, що гарантує більшу фінансову стабільність для сімей і

підприємств та мінімізує негативний вплив енергетичних криз. Крім фінансових переваг, такі будівлі спричиняють менші викиди парникових газів завдяки нижчому споживанню енергії, тим самим допомагаючи виконувати глобальні кліматичні зобов'язання нашої країни.

Одним з ключових напрямків підвищення енергетичної безпеки є сфера зеленої трансформації українських міст, яка включає оновлення житлового фонду, інфраструктури та будівель, а також реалізацію проєктів із будівництва житла, що не потребує споживання енергії. Це впливає з результатів дослідження житлового фонду ЄС, де на будівлі припадає приблизно 40% використаної електроенергії та понад половина витрат природного газу. Водночас цей сектор є джерелом близько 35% усіх парникових викидів (рис. 1.5). Важливим фактором залишається вік будівель: майже 35% споруд були зведені понад пів століття тому, а близько 75% усіх будівель мають низьку енергоефективність [122].

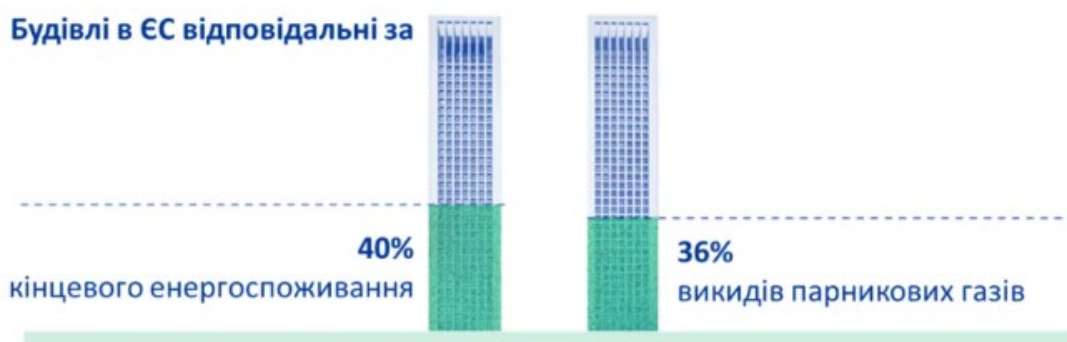


Рис. 1.5. Частка енергоспоживання та викидів будівель в ЄС.

Джерело: Рада ЄС, 2024

Більшість ініціатив по відбудові міст мають спільні риси, серед яких: необхідність створення чистої енергії; ефективне використання всіх необхідних для життєдіяльності ресурсів (води, повітря, енергії, продуктів харчування тощо); розвиток екологічного транспорту (електричні та велотранспортні засоби) і максимальне сприяння використанню

громадського транспорту; охорона та розширення парків і зелених зон в містах; екологічна освіта та популяризація сталого природокористування та здорового способу життя; будівництво нових будинків за принципами пасивного будівництва та модернізація старих будівель на енергоефективні [126, 97]. Ці тенденції узгоджується з ключовими принципами зеленої післявоєнної відбудови, спрямованої на забезпечення сталого розвитку української економіки та громад. Передусім відновлення має ґрунтуватися на пріоритеті інтересів населення та орієнтуватися на формування зеленої економіки, що передбачає зменшення вуглецевого сліду, підвищення енергоефективності, раціональне використання природних ресурсів і впровадження екологічно чистих технологій виробництва.

Враховуючи важливість оптимізації параметрів окремих будівель, окремої уваги заслуговує планування у містах і громадах груп об'єктів, які функціонують у межах єдиного енергетичного середовища. Дослідження засвідчують, що інтелектуальне планування житлових районів з урахуванням їхнього енергетичного потенціалу дозволяє досягати енергетичного нейтралітету або навіть енергопозитивного балансу, що є стратегічно важливим у контексті декарбонізації міського середовища [40].

Важливою основою реновації житлового фонду міст є його термомодернізація, тому уряд України активно впроваджує програми по зменшенню енергоспоживання через утеплення будівель і модернізацію опалювальних систем. Наприклад, програми «Енергодім» та «Теплі кредити» дозволяють домогосподарствам і ОСББ зменшувати споживання енергії на 20–50% завдяки модернізації систем опалення та утепленню. Загалом, енергомодернізація житлового сектору є важливою частиною стратегії по досягненню енергонезалежності України, що передбачає значні інвестиції для оновлення близько 80% усіх багатоквартирних будинків до 2050 року [69].

Втрати енергії відбуваються також під час транспортування енергії від виробників до споживачів. В Україні такі втрати оцінюються в 21 млрд

кВт/год на рік, або за іншими дослідженнями становлять близько 14% електроенергії, яка передається і розподіляється [68]. Цей технологічний прогрес може значно підвищити ефективність системи передачі, зокрема за рахунок нових провідників та покращення ліній електропередач у містах. За даними Мінрегіону, втрати тепла відбуваються на всіх етапах: 15% на районних котельнях і когенераційних установках, 20% під час розподілу тепла та 50% споживання тепла в будівлях [119]. Станом на 2021 рік втрати становили 21,1%, що вказує на суттєву проблему енергоефективності в системах опалення країни [89].

За даними Мінрегіону, втрати енергії в житловому секторі дорівнюють близько 3% ВВП України щорічно [142]. Будівлі в Україні споживають найбільшу частку кінцевих енергоресурсів і водночас вони містять найбільший потенціал для підвищення енергоефективності. Згідно з дослідженням Світового банку, Україна може скоротити споживання тепла на 50% [72, 142]. Це можна зробити шляхом встановлення теплових пунктів з температурним контролем, впровадження енергоефективних заходів для покращення оболонки будівлі, встановлення розподільників тепла, зменшення пропозиції витрати за рахунок зменшення втрат мережі та збільшення використання ТЕС.

В Україні останніми роками спостерігається тенденція до скорочення енергоспоживання у житловому секторі. Водночас значна частина населення все ще стикається з проблемою підтримання належного рівня тепла в оселях, саме тому подальша відбудова України має здійснюватися із системним використанням європейських екологічних інструментів планування, що забезпечує закриття необхідних енергетичних потреб та інтеграцію екологічних пріоритетів у стратегії розвитку територій. Важливим доповненням до цього є посилення ролі органів місцевого самоврядування та інститутів громадської участі, відкритість і прозорість ухвалення рішень, а також ефективне управління й раціональне

використання ресурсів донорських фондів для формування екологічно стійкої економіки [144].

До ключових напрямів енергоефективної реновації відносять запровадження систем обліку й регулювання енергоспоживання, а також модернізацію інженерного обладнання та конструктивних рішень будівель: утеплення зовнішніх стін і покрівель, заміну застарілих світлопрозорих огорожувальних конструкцій на вікна з підвищеними показниками теплозахисту, оптимізацію та оновлення систем опалення, гарячого водопостачання, вентиляції, кондиціонування та освітлення [108]. Технології Smart House («інтелектуальний будинок») включають комплексний набір технічних засобів і програмного забезпечення, що здатні будувати інтегрованої системи автоматизації інженерних підсистем. До таких підсистем відносяться опалення, водопостачання, кондиціонування, освітлення, підсистеми доступу, охорони і безпеки, аудіо–відеотехніки (мультирум), благоустрій і ряд інших [80]. Аналіз залежності витрат на енергоресурси багатоквартирного житлового будинку від рівня впровадження енергоефективних систем показує, що зменшити витрати на транспортування енергії та експлуатацію систем можливо лише завдяки впровадженню автоматизованої системи керування усіма технічними елементами будівлі. Інтеграція енергоощадних технологій та інноваційної системи «Розумний будинок» у процес будівництва житлових комплексів дозволяє суттєво знизити споживання енергоресурсів і зменшити фінансові витрати [81].

Міжнародний досвід проектування автономних енергоефективних житлових комплексів з багатоповерховими будівлями, що використовують альтернативні джерела енергії, свідчить про доцільність впровадження сонячних батарей та BIPV панелей, які інтегруються у конструкцію будівель, зокрема в покрівельні системи, навіси, козирки, фасади та вікна, виконуючи функції фотоелектричних елементів і несучих конструкцій [152]. Відзначають важливість встановлення рекуператорів для використання

тепла відпрацьованого повітря, а також впровадження заходів щодо запобігання проникненню теплого повітря через вікна, двері, балкони, а у приміщеннях рекомендовано застосування приладів контролю їх внутрішніх температур [54]. Додатковою складовою енергостабільності житла може слугувати інтеграція з місцевими відновлюваними і альтернативними джерелами енергії, а також періодична перевірка ефективності та відповідності інженерних систем вимогам чинного законодавства.

Завдяки енергоефективним технологіям, використанню ВДЕ, раціональному використанню води, екологічно чистим матеріалам, оптимальному ландшафтному дизайну та управлінню відходами, зелені будівлі дозволяють знижувати викиди парникових газів, зменшувати споживання природних ресурсів та утворення відходів [140, 12].

Повторне використання відходів як джерела енергії й матеріалів є одним із ключових інструментів досягнення цілей сталого розвитку. У сфері енергетики це передусім стосується перетворення твердих побутових відходів і біомаси на біопаливо (біогаз, тверде біопаливо, RDF–паливо тощо). Спалювання або переробка таких відходів у спеціалізованих установках дозволяє заміщувати викопні енергоносії, зменшувати обсяг сміття, що потрапляє на полігони, та скорочувати викиди парникових газів за рахунок більш контрольованого циклу «відходи – енергія». У будівельному секторі після демонтажу чи реконструкції споруди будівельні відходи можуть бути подрібнені й використані як заповнювач для нових бетонних сумішей, основа дорожніх покриттів або вторинна сировина для нових будівельних виробів [19]. Це зменшує потребу в первинних природних ресурсах, скорочує енерговитрати на їх видобуток і переробку та знижує екологічне навантаження на довкілля.

Скорочення енергоспоживання за рахунок впровадження енергоощадних технологій сприятиме зменшенню залежності від імпорту енергоресурсів [135]. Україна може активно підтримувати енергоефективні ініціативи через стимулювання інвестицій, впровадження відповідних

нормативів і стандартів, а також організацію освітніх заходів, спрямованих на популяризацію енергозбереження.

Відновлення України орієнтовано на принципи сталого розвитку з урахуванням Європейського зеленого курсу. Такий підхід отримав назву «зелена відбудова», основною метою якої є відновлення економічних і соціальних процесів із одночасною модернізацією країни для досягнення балансу між інтересами суспільства, бізнесу та навколишнього середовища. Принципи зеленої відбудови включають активне залучення всіх зацікавлених сторін, застосування передових технологій і методів управління, а також підвищення енергоефективності економіки через збільшення частки енергії, отриманої з відновлюваних джерел [92, 105].

Розвиток і впровадження енергоефективних технологій має поєднуватися з якісним моніторингом енергоспоживання, оскільки саме вимірювані дані дають змогу оцінити їхній реальний внесок у зміцнення енергетичної безпеки. Коректний облік та аналіз споживання енергії дозволяють виявляти вузькі місця, визначати пріоритетні напрями інвестицій і відокремлювати ефект технічних рішень від впливу зовнішніх чинників. На основі таких даних доцільно формувати раціональні управлінські рішення: коригувати режими споживання, оптимізувати структуру паливно–енергетичного балансу, обирати найбільш результативні заходи модернізації та планувати їх поетапне впровадження з постійним відстеженням динаміки показників.

Водночас сучасні методики оцінювання енергетичної безпеки мають інтегрувати не лише техніко–економічні параметри, а й воєнні ризики та політичні пріоритети держави, оскільки структура енергоспоживання і доступність ресурсів істотно залежать від безпекового середовища та стратегічних рішень уряду. При використанні нових підходів потрібно розділити регіони України, які після війни будуть знаходитися в стані відносної безпеки, та ті які межують з країною агресором, бо обстріли таких територій можуть бути постійними, як наприклад в Ізраїлі [75].

Оцінка енергетичної ефективності будівель є важливим інструментом для визначення рівня їх енергоспоживання, виявлення слабких місць та розробки оптимальних рішень для зниження витрат ресурсів. Проведення таких оцінок дозволяє зрозуміти, які саме будівлі споживають надмірну кількість енергії, які конструктивні особливості або застарілі технології цьому сприяють, а також визначити найбільш ефективні способи модернізації [91, 77]. Без належного аналізу стану будівель складно оцінити масштаби проблеми та розробити ефективні заходи з підвищення їхньої енергоефективності. Програми енергетичного моніторингу та сертифікації дозволяють виявити найкритичніші проблеми та оцінити економічну доцільність тих чи інших заходів [103, 74].

Оцінити енергоефективність будівель можна за допомогою енергетичного аудиту, сертифікації та аналізу споживання ресурсів. Енергетичний аудит включає інспекцію будівлі, аналіз конструктивних особливостей, перевірку ізоляції, вікон, систем опалення, вентиляції та кондиціонування. Використовуються тепловізійні обстеження для виявлення тепловтрат, а також тестування повітропроникності. Сертифікація енергоефективності оцінює будівлю за певними стандартами та класифікує її за рівнем енергоспоживання. Також аналізують фактичне споживання електроенергії, газу та води, що дозволяє визначити потенціал для оптимізації та підвищення енергоефективності [154, 115, 153].

Проведення енергоаудиту є надзвичайно важливим для багатоповерхових будинків, оскільки це дозволяє значно зменшити споживання енергії. Він сприяє підтриманню оптимальної температури у приміщеннях та допомагає ефективніше оцінювати енергозберігаючий потенціал будівлі [79]. Підготовка енергоаудиторів для проведення енергоаудитів та створення ефективних систем енергоменеджменту в містах сприяє оптимальному використанню енергетичних ресурсів і втіленню заходів з енергоефективності. Це дозволить знизити енергоємність економіки, зменшити негативний вплив на клімат за рахунок скорочення

викидів CO₂ та зменшити витрати на комунальні послуги завдяки зниженню теплових втрат у будівлях [136].

Для країн Європейського Союзу з 1995 року проведення енергоаудитів та складання енергетичних паспортів є обов'язковим для кожної новобудови. Енергетичний паспорт забезпечує потенційних користувачів інформацією про рівень енергоспоживання будівлі та ефективність використання енергії в ній. У ЄС розробка енергетичних паспортів базується на двох основних підходах: теплотехнічному проектуванні будівлі та кваліметричному контролі енергетичних параметрів об'єкта в експлуатації. Обов'язково враховується коефіцієнт теплопередачі будівлі, який є інтегральним показником теплозахисту та відображає загальні тепловтрати через усі зовнішні конструкції, приведені до одиниці їхньої поверхні [147].

Окрім енергоаудитів, існують інші методи дослідження енергоефективності, серед яких ключову роль відіграє енергетичне моделювання енергоспоживання та теплових потоків. Воно базується на цифровому аналізі процесів, що відбуваються в будівлі або інженерній системі, з урахуванням конструктивних особливостей, матеріалів, кліматичних умов і поведінки користувачів [7]. Такий метод дозволяє прогнозувати ефективність енергоспоживання, визначати теплові втрати, оптимізувати роботу систем опалення, вентиляції та кондиціонування ще на етапі проектування. На основі результатів моделювання здійснюється сертифікація будівель за міжнародними системами, такими як BREEAM чи LEED, що оцінюють рівень енергоефективності, комфорт і екологічність споруди.

Сучасні кризові явища в енергетичних системах сприяють розвитку інтегрованих рішень, що поєднують використання сонячної енергії, теплових насосів і електричного транспорту. Такий підхід відповідає тенденціям децентралізації енергопостачання та зростання енергоефективності. Застосування енергоефективних технологій є дієвим інструментом зеленого будівництва, який сприяє екологічній трансформації

будівель та інфраструктури. В процесі післявоєнної реконструкції Україна має стати оновленою сучасною державою з модернізованою промисловістю та міцною громадською інфраструктурою, що зміцнить її конкурентоспроможність у глобальній економіці.

Окрім впровадження енергоефективних рішень, необхідно сформувати цілісний підхід до відбору, послідовності досліджень та реалізації заходів в умовах воєнних загроз і необхідності дотримання принципів зеленого відновлення. За таких умов недостатньо окремих технічних або локальних проєктів, натомість потрібна системна методологія, яка б поєднувала оцінку ризиків, пріоритизацію інвестицій та екологічні критерії сталого розвитку. Це зумовлює необхідність розробки комплексного підходу до управління енергетичною стійкістю, що передбачає узгоджену взаємодію всіх ключових учасників: виробників енергії, споживачів, аудиторських та експертних структур, а також органів державної влади й місцевого самоврядування.

Висновки до розділу 1

1. Енергетична безпека є ключовим чинником національної стійкості, економічного зростання та безпеки держави в умовах зростаючих геополітичних та техногенних викликів. Ефективне управління енергетичною безпекою та стабільне енергозабезпечення набуває критичного значення і потребує комплексного підходу, що охоплює оцінку ризиків, рівня енергетичної незалежності, ресурсної ефективності та інноваційного потенціалу. Ключовими стратегічними напрямками виступають диверсифікація джерел енергії, розвиток відновлюваної енергетики, модернізація інфраструктури та впровадження енергоощадних технологій.

2. Встановлено, що житловий фонд, як в країнах Європи так і України має значні споживання та слугує одним з головним факторів

нераціональних енерговитрат. Ключовими стратегічними напрямками згідно яких потрібно підвищувати енергетичну безпеку є диверсифікація джерел енергії, розвиток відновлюваної енергетики, модернізація інфраструктури та впровадження енергоощадних технологій.

3. Впровадження енергоефективних технологій є ключовим фактором забезпечення енергетичної безпеки багатоповерхових будівель, а використання сучасних матеріалів, інноваційних систем опалення, вентиляції та кондиціонування дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання будівель та підвищити їхню автономність.

4. Оцінювання енергоефективності будівель може здійснюватися за різними методами та критеріями, що дозволяє отримати комплексне уявлення про рівень споживання енергоресурсів та потенціал їхнього зменшення. Оптимізація енергоспоживання будівель, застосування систем повторного використання ресурсів та впровадження сучасних стандартів екологічного проектування дозволяють суттєво зменшити негативний вплив на довкілля.

5. Підтримка децентралізації енергосистеми є критично важливою в умовах війни, коли централізовані енергетичні об'єкти стають вразливими до атак, що може призводити до масштабних перебоїв в електропостачанні. Децентралізовані енергетичні рішення, такі як локальні відновлювані джерела енергії (сонячні та вітрові електростанції), малі когенераційні установки, автономні системи зберігання енергії та мікромережі, забезпечують більшу стійкість енергосистеми та підвищують енергетичну безпеку.

6. Визначено стратегічний напрям розвитку енергозабезпечення будівель у країнах ЄС та України, що базується на використанні ВДЕ та декарбонізації виробництва енергії. Визначено напрями оцінки енергетичної безпеки, серед яких енергоаудити, вимірювання споживання, розрахункові і експериментальні методи дослідження стану будівель.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ

2.1. Енергоаудити та енергетичні паспорти будівель на основі тепловізійних досліджень

Практичним методом оцінки енергетичної безпеки й ефективності існуючих будівель є проведення енергетичних аудитів, які передбачають детальний аналіз енергоспоживання будівлі та розробку рекомендацій щодо підвищення її енергоефективності. Енергоаудит – це перевірка та аналіз потоку енергії в будівлях, щоб допомогти визначити енергетичні втрати та потенціал для економії енергії. Енергетичні аудити надають детальну інформацію про використання енергії і потенціал економії. Під час таких аудитів використовуються різні інструменти та методи, включаючи тепловізійні обстеження, аналіз теплових втрат та оцінку ефективності систем опалення, вентиляції та кондиціонування. Аудиторський звіт не тільки оцінює, а й документує діяльність користувачів і потенціал економії енергії, надає рекомендації щодо інвестицій [150, 133, 33].

В Україні енергоаудити є важливим інструментом підвищення енергоефективності будівель. На державному рівні їх проведення регулюється Законом України «Про енергетичну ефективність», а також іншими нормативними актами, які відповідають вимогам Європейського Союзу в рамках імплементації Директиви 2012/27/ЄС [101, 149].

Енергетичний паспорт будівлі є базовим інструментом оцінки її енергетичної безпеки, оскільки містить систематизовані дані про розрахункове та фактичне енергоспоживання, тепловтрати, ефективність огорожувальних конструкцій та інженерних систем. На його основі можна кількісно визначити рівень енергоефективності будівлі, ступінь її залежності від зовнішніх енергоресурсів і потенціал зниження споживання

енергії, що є критично важливим для оцінювання вразливості об'єкта до енергетичних ризиків. Саме тому розрахунок енергоспоживання шляхом складання енергетичного паспорта будівлі дозволяє отримати ключові показники енергоефективності. Розрахунковий підхід викладено у ДСТУ 9190:2022 «Енергоефективність будівель. Методологія визначення енергетичних витрат на опалення, кондиціонування, вентиляцію, освітлення та постачання гарячої води» [98].

На основі отриманих даних будівлі присвоюється відповідний клас енергоефективності (від А – найефективнішого, до G – найменш ефективного), що дозволяє оцінити поточний стан об'єкта та визначити необхідні заходи для його модернізації, скорочення енергоспоживання та зменшення витрат. Присвоєння класу енергоефективності є завершальним етапом в енергодослідженні будівлі, оскільки це узагальнює всі отримані дані про її енергоспоживання та теплові характеристики. Цей показник є основою для видачі відповідного сертифіката енергоефективності, який підтверджує рівень енергозбереження будівлі та визначає можливі заходи з підвищення її ефективності. Визначення класу енергоефективності дозволяє скласти енергетичні рейтинги будівель на ринку нерухомості.

Рейтинг енергоефективності формує важливу складову при порівнянні об'єктів нерухомості, оскільки будівлі з вищим класом енергоефективності (наприклад, клас А) характеризуються меншими витратами на енергію, кращою теплоізоляцією та екологічністю, що робить їх привабливими для інвесторів і споживачів. Будівлі з високим класом енергоефективності зазвичай мають більший попит на ринку, а їхня ринкова вартість може бути вищою за будівлі з низьким класом, оскільки в довгостроковій перспективі вони забезпечують економію на енергоносіях і мають менший вплив на навколишнє середовище. Даний підхід доцільно використовувати у зеленій відбудові, оскільки це дозволяє потенційним покупцям або орендарям оцінити не лише вартість самого об'єкта, але й його довгострокові енергетичні витрати.

Для якісного енергоаудиту вже існуючих будівель, широко застосовуються також тепловізійні зйомки, які є складовою експериментального етапу обстеження будівель і орієнтовані на виявлення прихованих дефектів огорожувальних конструкцій та інженерних мереж. Використання тепловізійної діагностики як базового інструменту енергоаудиту дає змогу візуалізувати розподіл температур, ідентифікувати містки холоду, ділянки з недостатньою теплоізоляцією, некоректну роботу віконних і дверних блоків, а також локалізувати зони витоків тепла та пошкоджень трубопроводів.

Доцільно розглядати тепловізійні обстеження не лише як разовий етап енергоаудиту, а як обов'язковий компонент системи постійного моніторингу стану будівлі, що дозволяє своєчасно виявляти деградацію конструкцій і зростання тепловтрат. В умовах воєнних загроз та підвищених ризиків пошкодження інфраструктури тепловізійні зйомки дають можливість оперативно оцінювати технічний стан будівель, підтримувати їхню енергоефективність і, відповідно, сприяти зміцненню енергетичної безпеки критичних об'єктів та житлового фонду.

Тепловізійні зйомки дозволяють виявити основні проблемні зони, через які відбувається неконтрольований відтік тепла, та розробити відповідні заходи для їх усунення. Втрати тепла в опалюваних будівлях відбуваються переважно через дисперсію теплової енергії крізь зовнішні огорожувальні конструкції. Інтенсивність цього процесу зростає зі збільшенням різниці температур між внутрішнім і зовнішнім повітрям. Додатковий вплив на тепловтрати має посилене проникнення холодного повітря ззовні через конструктивні елементи будівлі, що зумовлено дією вітрового тиску та різноманітними аеродинамічними явищами [141]. Завдяки використанню тепловізора можна отримати теплове зображення будівлі, яке візуалізує температурні перепади на поверхнях і виявляє ділянки, де тепло виходить найінтенсивніше [41]. Хоча даний метод відображає лише поверхневу температуру конструкцій, його поєднання з

детальним аналізом дозволяє встановити причини втрат теплової енергії та запропонувати ефективні рішення щодо їх усунення.

В даному дослідженні виконано тепловізійний аналіз для житлової будівлі ЖК «АРТ–квартал Співоче», розташованого в місті Київ, для якої складено енергетичний паспорт, що дозволило поєднати розрахункові показники енергоспоживання з фактичними даними про тепловтрати огорожувальних конструкцій. Такий підхід застосовано з метою розробки комплексної методики прийняття рішень для споживачів та енергоменеджерів щодо пріоритизації енергоефективних заходів і планування інвестицій у модернізацію будівлі. Це дозволяє спрямовувати інвестиції в ті рішення, які дають найбільший ефект зі зниження споживання енергії та підвищення енергетичної ефективності будівлі загалом.

Житлові будинки ЖК «Арт–квартал Співоче», згідно з класифікацією ДБН В.2.2–15–2019 «Житлові будинки. Основні положення» [84], віднесені до II категорії (соціальне житло). Для додаткової оцінки енергоефективності проведено додаткове дослідження зон підвищених енергетичних втрат у зовнішніх конструкціях та розроблено рекомендації щодо їх утеплення. Для оцінки тепловтрат будівлі застосовано тепловізор Testo 881–2 (рис. 2.1) з наступними технічними характеристиками: діапазон вимірюваних температур – $20 \div 350$ °C; точність вимірювань – ± 2 % або ± 2 °C; розмір ІЧ–детектора – 160×120 пікселів; температурна чутливість – менше 80 мК; спектральний діапазон – $7,5 \div 14$ мкм [143].



Рис. 2.1. Тепловізор Testo 881–2

Застосування цього підходу дає змогу спростити процедуру первинної оцінки енергетичної безпеки об'єктів, оперативно визначати пріоритетні напрями реновації та адаптувати зелені рішення до особливостей конкретних типів забудови.

2.2. Методи автоматизованого дослідження енергоспоживання

Ведення обліку використання енергоресурсів, зокрема електроенергії, природного газу та теплової енергії, є невід'ємною складовою енергетичних систем. Будь-які заходи з підвищення енергоефективності неможливо повною мірою оцінити без детальних даних щодо рівня споживання енергії. Вимірювання показників відіграє ключову роль у процесах моніторингу та аналізу ефективності впроваджених енергоощадних рішень. Крім того, облік споживання енергоресурсів сприяє формуванню коректних рахунків за використану енергію та створює необхідні умови для раціонального планування інвестицій у підвищення енергоефективності.

Одним із поширених підходів є впровадження систем енергетичного менеджменту, які забезпечують постійний моніторинг та аналіз енергоспоживання. Такі системи можуть включати програмні продукти для збору даних, моделювання енергетичних характеристик та прогнозування споживання [154]. Програмні засоби моніторингу енергоспоживання забезпечують автоматизований збір, зберігання та аналіз даних про споживання енергії в реальному часі, даючи змогу відстежувати пікові навантаження, виявляти аномалії та оперативно реагувати на перевитрати, що є основою системи управління енергетичною безпекою будівель. У межах комплексного підходу до оцінки енергетичної безпеки такі програмні рішення дозволяють поєднати результати енергоаудиту, тепловізійних обстежень і фактичних показників лічильників у єдиній аналітичній системі. Це спрощує прийняття управлінських рішень щодо модернізації будівель,

оптимізації режимів роботи інженерних систем і планування інвестицій у підвищення енергоефективності.

Використання автоматизованих систем моніторингу забезпечує збір та аналіз даних у режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на відхилення від нормального режиму роботи та вживати заходів для оптимізації споживання енергії. Для оцінки енергоспоживання будівлі використовують такі прилади, як пірометри, гігрометри, газоаналізатори та реєстратори даних.

У межах даного дослідження було проаналізовано принципи роботи низки спеціалізованих програмних комплексів для підтримки енергоаудиту та управління енергоспоживанням. Розглянуто можливості їх використання як енергоаудиторами, так і кінцевими споживачами енергії для розрахунку енергобалансів, моделювання сценаріїв реновації та оцінки економічної ефективності. Аналіз та порівняння функціоналу таких програмних продуктів, як EnergyPlan, RETScreen, EnergyPlus, ENSI EAB Software, ENSI Енергомонітор дозволив оцінити їх потенціал у комплексному підході до оцінювання енергетичної безпеки будівель для вибору найкращого рішення в управлінні енерговитратами.

Впровадження системи дистанційного моніторингу передбачає передачу даних з лічильників, встановлених на об'єкті, для подальшого аналізу та обробки енергоменеджером [27, 125]. Для реалізації системи автоматизованого контролю енергоспоживання необхідно модернізувати вузли обліку теплової енергії, або замінити їх на сучасніші аналоги, або доповнити додатковими пристроями, що забезпечують дистанційне зчитування та передачу даних на автоматизоване робоче місце (АРМ) енергоменеджера. Інтелектуальні системи контролю електроенергії мають значні переваги як для енергетичного сектору, так і для кінцевих споживачів, оскільки сприяють зменшенню експлуатаційних витрат та підвищенню ефективності управління.

Інтелектуальні лічильники дозволяють комунальним підприємствам не лише відстежувати обсяг спожитих ресурсів, але й забезпечувати автоматизоване виставлення рахунків, ефективне управління електромережею, водопостачанням, газом і системами опалення. Ці прилади також сприяють зменшенню викидів CO₂, оскільки вони забезпечують точний контроль і оптимізацію енергоспоживання будівель від традиційних джерел енергії. Завдяки автоматичному моніторингу та аналізу споживання енергії мешканці та власники будівель можуть виявляти надмірні витрати та усувати неефективне використання електроенергії, опалення чи кондиціонування. Поєднання інтелектуальних лічильників із програмами моніторингу є основою для комплексного й ефективного підходу до управління енергоспоживанням.

2.3. Методи дослідження теплових потоків будівель за допомогою програмних комплексів

Оцінка ефективності та якості проектування будівель неможлива без глибокого аналізу їх енергетичного балансу, теплових потоків та рівня енерговитрат. Зворотний підхід до такого аналізу – дослідження енергетичних характеристик уже експлуатованих будівель, що дає змогу розробити обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації об'ємно–планувальних рішень багатоквартирних житлових комплексів та вибору найбільш ефективних конструктивних систем для їх огорожувальних елементів.

Важливим аспектом є точне визначення втрат теплової енергії через конструктивні елементи будівлі та інженерні мережі. Для цього пропонується використовувати сучасні програми моделювання теплообміну, що забезпечують наочне уявлення про динаміку теплових процесів та дозволяють отримати необхідні вихідні дані для розрахунків, наприклад ТЕРМ 6 і TEMPER 6.14. Застосування таких методів дозволяє своєчасно

ідентифікувати потенційні дефекти конструкцій, що можуть негативно позначитися на тепловому режимі та енергоефективності будівлі в майбутньому.

На основі даних оцінки конструктивних елементів будівлі з використанням математичного моделювання процесів теплообміну, проведено порівняння і розрахунок теплофізичних характеристик шарів фасадних систем для визначення їх внеску у загальні тепловтрати та стійкість до накопичення вологи. За допомогою цифрового моделювання кутових вузлів будівлі встановлено, що саме в цих зонах найчастіше формуються містки холоду та локальні дефекти мікроклімату, що є критичними для оцінки енергетичної безпеки.

Рівняння складені за аналогією із законами Кірхгофа для розрахунків і цифрового дослідження проходження теплового потоку через стіни у вузлах і зонах містків холоду. Огороджувальні конструкції розглянуто як мережу термічних опорів, де тепловий потік відіграє роль «струму», різниця температур – «напруги», а термічний опір шарів і включень – «електричного» опору. Відповідно, для кожної ділянки стіни чи вузла застосовується аналог «закону Ома для тепла» $Q = \Delta T / R_{th}$, а баланс потоків у вузлах моделі виконується за першим законом Кірхгофа: сума вхідних теплових потоків дорівнює сумі вихідних. Така постановка дає змогу описувати як послідовне проходження тепла крізь шари конструкції (штукатурка – утеплювач – стіна тощо), так і паралельні шляхи теплопередачі, характерні для містків холоду (наприклад, одночасне проходження потоку через утеплювач і монолітний бетонний елемент).

У простих випадках цей підхід реалізовано у вигляді спрощених інженерних розрахунків, де термічні опори шарів об'єднано за правилами послідовного й паралельного «з'єднання», а отриману еквівалентну величину використано для визначення густини теплового потоку. У більш складних ситуаціях, типових для кутів, примикань перекриттів, віконних перемичок, стиків панелей або зон пошкодженого утеплювача, рівняння

балансу теплових потоків реалізуються вже в числових 2D/3D моделях. У дослідженнях теплового потоку через конструкції будівель два рівняння за аналогією з законами Кірхгофа дають базу для всіх RC-моделей: вузлове рівняння (баланс енергії в точці/зоні) та гілкове рівняння (зв'язок потоку й різниці температур через опір).

Вузлове рівняння застосовується у кожному вузлі термічної схеми будівлі. До таких вузлів належать внутрішнє повітря приміщення, поверхні огорожувальних конструкцій з внутрішнього та зовнішнього боку, а також точки всередині шарів стін, покриттів чи перекриттів, якщо йдеться про багатошарові або складні системи. Крім того, вузловий підхід використовується для опису теплових процесів у віконних елементах – рамах, склопакетах, відкосах і стиках.

$$\sum Q_{\text{вх}} - \sum Q_{\text{вих}} = C_{\theta} \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{вх}}$ – теплові потоки, що надходять у вузол (Вт), це може бути потік від сусідніх вузлів через стіни, вікна, перекриття, приплив вентиляції, внутрішні джерела теплоти (опалення, люди, техніка); $Q_{\text{вих}}$ – теплові потоки, що виходять з вузла (Вт), це втрати через огорожувальні конструкції, витяжну вентиляцію, перетік у сусідні зони або в ґрунт; C_{θ} – термічна ємність вузла (Дж/К), для повітря зони це теплоємність повітря в приміщенні, для масивної конструкції – теплоємність відповідного об'єму стіни/перекриття; $\frac{dT}{dt}$ – швидкість зміни температури вузла (К/с); показує, як швидко змінюється температура через дисбаланс між надходженням і відведенням теплоти.

У стаціонарному випадку $C_{\theta} \cdot \frac{dT}{dt} = 0$, і рівняння спрощується до $\sum Q_{\text{вх}} = \sum Q_{\text{вих}}$ – чистий баланс теплових потоків у вузлі.

Це рівняння дає змогу записати повний енергетичний баланс кожного вузла: фіксується, скільки теплоти надходить у нього через огороження, вентиляційні потоки або внутрішні джерела, такі як люди, обладнання чи системи опалення, і скільки теплоти при цьому відводиться. На основі цих

даних можна будувати спрощені моделі у вигляді RC–мереж (1R1C, 2R2C, nR–nC), які широко використовуються для керування інженерними системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, оптимізації режимів опалення і охолодження, а також для прогнозування теплових навантажень будівлі.

Аналогове за законам Кірхгофа гілкове рівняння застосовується для опису кожної теплової гілки, що з'єднує два вузли в RC–мережі будівлі. Це можуть бути різні ділянки: шар стіни між вузлами «внутрішня поверхня» і «середина шару» або «зовнішня поверхня», теплопередача між повітрям приміщення і поверхнею через конвекційний і радіаційний опір, а також передачі між зовнішньою поверхнею стіни чи вікна і зовнішнім повітрям. Окрім основних шляхів теплопроводу, гілкове рівняння застосовується у випадку містків холоду, де є обхідні гілки з меншим термічним опором, і для розрахунку теплового зв'язку між сусідніми приміщеннями або між приміщенням і ґрунтом.

$$Q_{ij} = \frac{T_i - T_j}{R_{\theta,ij}}, \quad (2.2)$$

де Q_{ij} – тепловий потік між вузлами i та j (Вт), додатний у вибраному напрямку (наприклад, від вузла i до j); T_i , T_j – температури вузлів i та j (К або °С), це може бути температура повітря в приміщенні й температура внутрішньої поверхні стіни, температура внутрішньої й зовнішньої поверхонь огороження, температури в двох сусідніх шарах конструкції тощо; $R_{\theta,ij}$ – термічний опір між вузлами i та j (К/Вт), включає провідність, конвекцію й/або випромінювання.

Розрахунок теплових потоків через стіни в сучасних програмних комплексах ґрунтується не лише на підходах аналогічним законам Кірхгофа для електричних схем, але водночас використано комплекс фізичних законів і чисельних методів, щоб відтворити реальну поведінку будівельних конструкцій у різноманітних умовах. Основу становить класичний закон Фур'є для теплопровідності, який описує, як тепло розповсюджується крізь

матеріали залежно від їхньої теплопровідності, товщини та площі. Цей закон реалізується для багатошарових, а часто й анізотропних чи складної форми стін, причому для кожного шару враховується його власний термічний опір. Для поверхонь, що межують із зовнішнім або внутрішнім повітрям, застосовується закон Ньютона для конвекції – він визначає інтенсивність теплообміну між твердою поверхнею й рідиною або газом через градієнт температур і коефіцієнт теплообміну. Якщо присутнє інфрачервоне випромінювання (наприклад, між різними шарами чи на зовнішній поверхні конструкції), враховують також закон Стефана–Больцмана, який описує тепловий потік, що випромінюється чи приймається поверхнею.

Крім фізичних рівнянь, у програмному забезпеченні реалізовано числові підходи: найчастіше це метод скінченних елементів (FEM), завдяки якому складна область розбивається на маленькі елементи сітки, для кожного з яких розраховується локальний баланс енергії. Таким чином формується система рівнянь, яка відповідає сумарному балансу теплоти у всій досліджуваній ділянці. Всі ці рівняння доповнюються граничними умовами: фіксовані температури, теплові потоки, конвекційні чи радіаційні умови. За необхідності враховується акумулювання теплоти в матеріалах (теплоємність), що потрібно для нестационарних задач, коли важливий вплив масивності стіни та затримка зміни температури.

Додатково в складних програмах можуть моделювати гігротермічні явища (рух вологи разом із теплом), різного типу містки холоду, взаємодію з ґрунтом, сонячну радіацію, внутрішні тепловиділення. Розрахунок теплових потоків через сучасні огорожувальні конструкції поєднує універсальні фізичні принципи, актуальну теплофізику матеріалів і потужну обчислювані методи, а головне – можливість врахувати складну геометрію, реальні експлуатаційні умови й динаміку теплових процесів.

Використано комплекс THERM 6 для двовимірного моделювання теплових потоків у площині огорожувальних конструкцій та TEMPER 6.14

для тривимірного аналізу просторових вузлів, зокрема кутових з'єднань і стиків [66, 120]. Застосування цих інструментів дало змогу деталізовано оцінити розподіл температур, ідентифікувати містки холоду та обґрунтувати раціональні конструктивні рішення з погляду енергетичної безпеки будівлі.

Дослідження теплотехнічних параметрів стикових вузлів конструкцій здійснено на основі вже існуючого конструктиву однієї з житлових багатоквартирних будівель ЖК «Арт Квартал Співоче» у місті Київ, згідно відповідних нормативних показників [86, 84]. Характеристики утеплення та конструктивні особливості стін обрано згідно з актуальними рекомендаціями [117]. Для зовнішніх огорожувальних елементів опалюваних будівель, а також для внутрішніх конструкцій, що розділяють приміщення з різницею температури повітря 3 °С і більше, дотримано встановлених нормативних вимог:

$$R_{\Sigma np} \geq R_{q \min}; \Delta t_{np} \leq \Delta t_{cz}; \tau_{v \min} > t_{\min};$$

де $R_{\Sigma np}$ – приведений опір теплопередачі для непрозорої або частково прозорої огорожувальної конструкції. Для термічно однорідних конструкцій визначається безпосередньо як опір теплопередачі, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$; $R_{q \min}$ – допустиме граничне значення опору теплопередачі для непрозорих конструктивних елементів, їх частин, або для світлопрозорих огорожувальних конструкцій, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$; Δt_{np} – це температурний перепад між повітрям у приміщенні та усередненою температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, °С; Δt_{cz} – різниця температур, допустима за санітарно–гігієнічними вимогами, °С; $\tau_{v \min}$ – мінімальна температура внутрішньої поверхні в зонах теплопровідних включень, °С; t_{\min} – мінімальна температура на внутрішній поверхні конструкції за умови розрахункових температур внутрішнього та зовнішнього повітря, °С, що при розрахункових параметрах повітря дорівнює 10,7 °С.

Враховано крайові вузли будівельних конструкцій, оскільки вони є найбільш вразливими місцями з точки зору тепловтрат, зокрема кути, стики

стін з перекриттями, віконні та дверні прорізи тощо. Вони можуть створювати містки холоду, що знижує загальний тепलोзахист будівлі та може призводити до появи конденсату і розвитку небезпечних пліснявих грибів.

Температурний розподіл у цих ділянках визначено згідно з ДБН В.2.6–31:2021 [86]. Моделювання температурних полів здійснювалося з урахуванням кліматичних умов міста Києва, при цьому розрахункова температура зовнішнього повітря становила -22°C . Параметри мікроклімату в приміщенні приймалися такими: температура $+20^{\circ}\text{C}$, відносна вологість повітря 55%.

Для оцінки тепलोзахисту таких зон застосували коефіцієнт приведенного опору теплопередачі $R_{\Sigma np}$, який враховує додаткові теплові втрати через містки холоду. Приведений опір теплопередачі R_{np} є ключовим показником при проєктуванні енергоефективних будівель і дозволяє точно оцінити їхню тепलोзахисну здатність. Він дозволяє враховувати вплив не тільки основного матеріалу стіни, а й наявність містків холоду (наприклад, стиків, армованих зон, перемичок тощо) та оцінити ризик випадання конденсату всередині конструкцій [128].

Згідно з ДБН В.2.6–31:2021, мінімальні значення приведенного опору теплопередачі для крайових вузлів повинні бути не нижчими за:

- кути будівель – не менше $0,6\text{--}0,8 \text{ м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$;
- стики стін з перекриттями – не менше $0,7\text{--}0,9 \text{ м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$;
- стики стін із віконними та дверними прорізами – не менше $0,55\text{--}0,7 \text{ м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$.

Температура внутрішніх поверхонь стін у кутах приміщення повинна бути достатньо високою, щоб уникнути утворення конденсату та появи цвілі. Згідно з ДБН В.2.6–31:2021, температура внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій (зокрема, в кутах) не повинна бути нижчою за температуру точки роси при нормальних умовах експлуатації.

Температура, при якій починається конденсація вологи, залежить від відносної вологості повітря. Наприклад:

- при вологості 50% і температурі повітря $+20^{\circ}\text{C}$ точка роси $\approx 9,3^{\circ}\text{C}$;
- при вологості 60% і температурі $+20^{\circ}\text{C}$ точка роси $\approx 12^{\circ}\text{C}$.

У нашому випадку вологість повітря прийнята 55%, згідно чого точка роси буде $10,7^{\circ}\text{C}$.

Розрахунок температурного режиму огорожувальних конструкцій виконано з використанням мінераловатних плит як утеплювача, з розрахунковим коефіцієнтом теплопровідності λ_B у межах $0,039\text{--}0,05$ Вт/(м·К). Залежно від прийнятого значення теплопровідності утеплювача, подано дані щодо приведеного опору теплопередачі для основних конструктивних вузлів та всієї стіни загалом.

Окрім програмних продуктів, безпосередньо використаних у дослідженні, у практиці моделювання теплових потоків будівель можуть широко застосовуватись низка спеціалізованих програмних комплексів. До найбільш професійних, що реалізують розрахунок теплопередачі, моделювання роботи інженерних систем і формування річного енергетичного балансу належать «PHPP» (Passive House Planning Package), Hottgenroth, Optima, ArchiPHYSIK та GRAPHISOFT EcoDesigner STAR. Виконано цільовий аналіз зазначених програмних комплексів для оцінки їх функціональних можливостей та придатності до застосування в умовах війни для інтеграції в системи розрахунків теплотехнічних та енергоефективних характеристик будівель.

2.4. Оцінка життєвого циклу будівлі

Життєвий цикл (Life Cycle Assessment, LCA) об'єкта охоплює всі основні етапи існування будівлі і враховує низку показників, що відображають її економічні, енергетичні та екологічні характеристики. До них належать витрати та ресурси, необхідні для проєктування і будівництва,

тобто капітальні витрати. Важливим компонентом є енергоспоживання на всіх етапах життєвого циклу, включаючи споживання електроенергії, тепла й води. Також враховуються експлуатаційні витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням і проведенням ремонтів, а також витрати, що виникають при модернізації або реконструкції об'єкта. Оцінюються викиди парникових газів в CO₂, еквіваленті (вуглецеві викиди) та інші екологічні впливи на усіх етапах існування будівлі. Ураховуються витрати й наслідки ліквідації або утилізації, зокрема проведення демонтажу, повторного використання матеріалів і рекультивації території. Важливим показником є також тривалість служби окремих елементів будівлі та міжремонтні цикли. У комплексі розглядаються показники стійкості, довговічності, обсяги утворених відходів і загальний вплив на довкілля.

Для розрахунків вуглецевого сліду рекомендовано притримуватись методики Whole Life Carbon Assessment (WLCA). Вона дозволяє комплексно оцінити вуглецеві викиди протягом усього життєвого циклу будівлі, починаючи з видобутку матеріалів, їх транспортування та будівництва, і закінчуючи експлуатацією, ремонтом, оновленням і остаточною утилізацією чи демонтажем (Рис. 2.2).

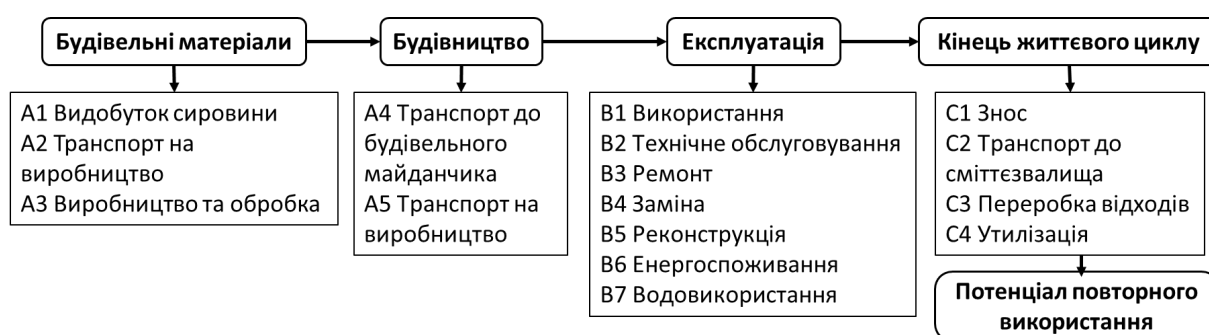


Рис. 2.2. Етапи життєвого циклу будівлі

Цей підхід охоплює всі прямі та непрямі джерела парникових газів, забезпечуючи повну прозорість щодо реального вуглецевого сліду об'єкта. Основна мета полягає у визначенні найбільш вуглецеємних етапів

життєвого циклу та пошуку шляхів декарбонізації вибраних процесів для подальшого зменшення впливу на навколишнє середовище.

Методологічна основа WLCA базується на міжнародних стандартах, таких як EN 15978:2011, ISO 14040/44, а також галузевих рекомендаціях, включно з RICS Whole Life Carbon Assessment for the Built Environment (2023) та фреймворком EC Level(s). Стандарти визначають модулі оцінки, структуру етапів життєвого циклу (виробництво, будівництво, експлуатація, кінець життєвого циклу, потенційні майбутні переваги/витрати) та вимоги до якості й достовірності даних. Це дозволяє забезпечити порівнюваність результатів та підвищити достовірність прийнятих управлінських рішень у сфері сталого будівництва та інфраструктури. WLCA використовує модульний підхід, в залежності від конкретного циклу життя будівлі («A–D») [71].

Розрахунок викидів CO₂ протягом життєвого циклу багатоповерхової будівлі враховує виробництво залізобетонних панелей для несучих стін, оскільки саме цемент і бетон генерує найбільший обсяг втіленого вуглецю будівлі. На кожен кубічний метр залізобетону зазвичай припадає від 240 до 300 кг викидів, тож для всієї будівлі визначаються об'єм стін і перекриттів і множаться на цей коефіцієнт [52]. Наступним важливим етапом є виробництво мінераловатної плити для зовнішнього утеплення, де викиди залежать від площі фасаду і товщини утеплювача і застосовується середній показник близько 100–200 кг CO₂ на м³ матеріалу [22]. Структура багатошарової ізоляції, додаткові армовані захисні шари і клейова основа мають власні внески у загальний слід споруди: оздоблення та допоміжні розчини, зокрема декоративна штукатурка, потребують орієнтуватися на 50–80 кг CO₂ на м³ матеріалу, що напряду залежить від площі та товщини шару [26]. Істотну роль у загальному балансові вуглецевих викидів відіграє транспортний етап і будівельно–монтажні роботи. Внесок цієї фази – це енерговитрати на доставку матеріалів на будмайданчик, механізми монтажу, а також технічне забезпечення процесу зведення, які разом

створюють приблизно 5–10% від усього промислового викиду CO₂ для будівлі такого масштабу [34].

На подальших етапах при ремонтах, модернізації та технічному обслуговуванні до оцінки викидів в час експлуатації додається ще 5–10% від отриманої суми викидів, що суттєво залежить від ефективності використаних технологій і політики управління ресурсами [9]. Завершальний етап життєвого циклу, утилізація або знесення будівлі, також формує вагомий вуглецевий слід, де враховуються енерговитрати й викиди при транспортуванні і переробці конструкцій, утилізації залишків цементу, бетону та утеплювача, а також повторне використання матеріалів. Ця стадія часто оцінюється як 5–15% від усіх втілених викидів споруди залежно від рівня впровадження принципів циркулярної економіки й переробки на місцевому рівні [24].

Розрахунок вуглецевого сліду будівлі протягом усього життєвого циклу є методологічно складним і ресурсоємним процесом, оскільки охоплює етапи видобутку сировини, виробництва матеріалів, будівництва, експлуатації, реновації та демонтажу. Попри громіздкість таких оцінок, їх доцільно включати до комплексного підходу до оцінювання енергетичної безпеки, оскільки вуглецевий слід безпосередньо пов'язаний із структурою енергоспоживання об'єкта та його впливом на кліматичні ризики.

Виконано орієнтовний розрахунок вуглецевого сліду для окремого елемента конструкції будівлі, щоб продемонструвати, які саме кількісні показники можна отримати за допомогою такого аналізу. Розрахунок кількості втіленої енергії виконано для етапу будівництва (модулі А4–А5), тобто враховані сукупні енерговитрати на виробництво, транспортування і монтаж основних матеріалів, таких як залізобетон, утеплювач, штукатурка. Методика розрахунку (сума енерговитрат по конструктивних елементах, додавання монтажно–транспортного коефіцієнта) відповідає ДСТУ 9190:2022, ДСТУ EN ISO 13790, Методичним рекомендаціям щодо LCA будівель та стандартам екологічної сертифікації Green Building Council.

Для дослідження життєвих циклів будівлі у роботі використано порівняльний підхід із елементами сценарного моделювання: зіставлено базовий сценарій «типової» будівлі з удосконаленим сценарієм енергоефективної будівлі з врахуванням воєнних загроз за ключовими показниками енергоспоживання, витрат протягом життєвого циклу та тривалості експлуатації. Такий підхід дає змогу кількісно оцінити потенціал економії ресурсів, зменшення вуглецевого сліду та підвищення енергетичної безпеки завдяки переходу від традиційних до енергоефективних рішень. Показники життєвого циклу звичайної будівлі суттєво відрізняються від аналогічних параметрів енергоефективної будівлі, особливо щодо енергетичних і екологічних характеристик. Навіть часткове оцінювання емісій CO₂ може слугувати основою для порівняння альтернативних конструктивних рішень і підготовки обґрунтованих стратегій управління для зеленої реновації та підвищення енергетичної безпеки.

Висновки до розділу 2

1. Представлено багатокomпонентне рішення для оцінки енергоефективності будівель, що базується на методах енергетичного аудиту для проведення повного циклу енергетичного обстеження, включно з розрахунком енергетичного паспорту, визначенням класу енергоефективності, виконанням тепловізійних зйомок та аналізом тепловтрат через огорожувальні конструкції і типові дефектні зони, що забезпечує комплексну оцінку фактичного стану будівлі та обґрунтування заходів з підвищення її енергоефективності.

2. Запропоновано комплексний підхід до оцінки енергетичної безпеки будівель, що поєднує результати енергоаудиту, тепловізійних досліджень, програмні засоби моделювання (EnergyPlan, RETScreen, EnergyPlus, ENSI EAB, ENSI Енергомонітор) та перспективне

впровадження інтелектуальних лічильників як основи системи енергетичного менеджменту будівель.

3. Доведено доцільність використання спеціалізованих програмних комплексів для дво- та тривимірного моделювання теплових потоків і вузлів огорожувальних конструкцій, зокрема TEPМ 6 та TEMPER 6.14, а також проаналізовано принципи розрахунку професійних програмних продуктів і визначено необхідність їх порівняльної оцінки, включно з PHPP (Passive House Planning Package), Hottgenroth, Optima, ArchiPHYSIK і GRAPHISOFT EcoDesigner STAR, що забезпечує підвищення точності теплотехнічних розрахунків та обґрунтований вибір інструментів для оцінки енергоефективності та енергетичної безпеки будівель.

4. Обґрунтовано ефективність розрахунку орієнтованого показника вуглецевого сліду окремих конструктивних елементів будівлі з використанням методики Whole Life Carbon Assessment з побудовою порівняльної моделі життєвих циклів «типової» та енергоефективної будівлі з урахуванням воєнних загроз, що забезпечує можливість кількісної оцінки потенціалу ресурсної економії, декарбонізації та підвищення енергетичної безпеки на всіх етапах життєвого циклу будівель.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ БУДІВЕЛЬ

3.1. Розрахунки енергетичного паспорту будівлі

Розрахунок енергетичних паспортів будівель рекомендовано застосовувати при оцінці енергетичної безпеки проєктів відбудови багатоповерхових будівель. Методику розрахунку обґрунтовано на прикладі будівлі житлового комплексу «Арт квартал Співоче», розташованому у місті Києві. Це багатосекційна багатоповерхова будівля панельного типу, що налічує сім поверхів. Висота кожного рівня становить 3 метри, а загальна висота споруди від підлоги першого поверху до стелі сьомого сягає 21 метра. Додатково, проміжок від сьомого поверху до верхньої точки ліфтової шахти дорівнює 3 м. Типове планування поверхів представлено на рис. 3.1.

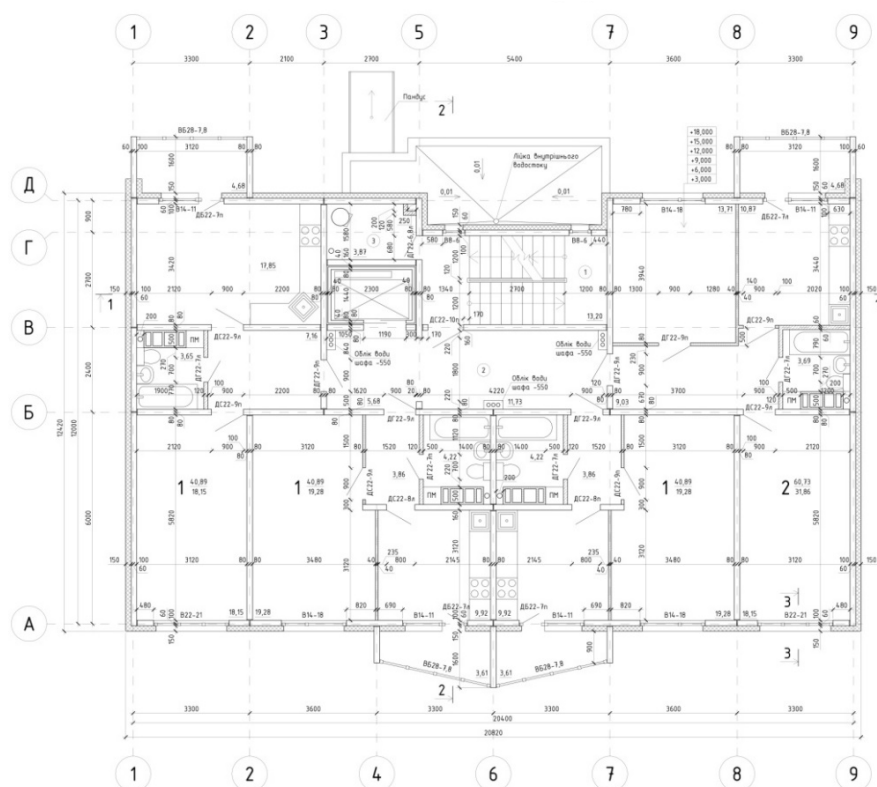


Рис. 3.1. План типового поверху розглянутої будівлі

Габаритні розміри споруди, виміряні за внутрішнім контуром, складають 11,8×20,2 метра. Відомості про площу зовнішніх конструкцій будівлі узагальнено у таблиці 3.1. Фасад будівлі, де розташований головний вхід, зорієнтований на північ, а його азимутальні кути становлять: Північ А(9–1) – 8°, Схід А(А–Д) – 98°, Південь А(1–9) – 188°, Захід А(Д–А) – 278°.

Таблиця 3.1

Площі зовнішніх огорожень розглянутої будівлі

№ поз.	Вид огорожувальної конструкції	Загальна площа, A_i , м ²
1	Зовнішні стіни по внутрішньому обміру з урахуванням площі відкосів вікон та дверей Пн А(9–1)=8° Сх А(А–Д)=98° Пд А(1–9)=188° Зх А(Д–А)=278°	449,932 253,354 304,678 256,054 1264,018
2	Суміщене покриття	233,356
3	Перекрыття над неопалювальним підвалом	233,356
4	Світлопрозорі конструкції, в т.ч. орієнтовані на: Пн А(9–1)=8° Сх А(А–Д)=98° Пд А(1–9)=188° Зх А(Д–А)=278°	124,5 0 144,06 0
5	Зовнішні двері Пн А(9–1)=8° Пд А(1–9)=188°	6,72 2,1
6	Загальна площа зовнішніх огорожень	2008,11

Кондиціонована площа будівлі (сума площ семи поверхів по внутрішньому обміру, включаючи внутрішні стіни та перегородки) $A_f = 1661,473$ м². Кондиціонований об'єм будівлі (від підлоги до стелі) $V = 4943,61$ м³.

3.1.1. Теплопередача трансмісією

Для проведення розрахунків передбачено, що приведений опір теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій $R_{\Sigma np}$, м²·К/Вт, відповідає встановленим нормативам у таблиці В.1, (додаток В), згідно ДБН

В.2.6–31:2016 «Теплова ізоляція будівель» [86]. Коефіцієнти теплопередачі трансмісією через окремі огорожувальні конструкції, що розраховані за формулою $H_{tr,i} = A_i/R_{qmin}$, наведено в таблиці 3.2. При розрахунках теплопередачі через світлопрозорі елементи ефект нічної ізоляції не враховувався. Коефіцієнти теплопередачі трансмісією через некондиціоновані об'єми не визначались.

Таблиця 3.2

Коефіцієнти теплопередачі трансмісією

№ поз.	Вид огорожувальної конструкції	$A_i, \text{м}^2$	$R_q, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$U=1/R_q, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$b_{tr,x,H}$	$b_{tr,x,C}$	$H_{tr,H} = H_{tr,C}, \text{Вт}/\text{К}$
1	Зовнішні стіни	754,61	4,119	0,242	1	1	182,61
2	Суміщене покриття	233,356	9,659	0,103	1	1	24,03
3	Світлопрозорі конструкції	268,56	1,51	0,662	1	1	177,78
4	Зовнішні двері	8,82	1,4	0,714	1	1	6,29
5	Перекриття над неопалювальним підвалом	233,356	4,274	0,233	1	1	54,37

Узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією для режиму опалення і охолодження, становить:

$$H_{tr,H} = H_{tr,C} = H_D + H_g + H_U + H_A, \quad (3.1)$$

$$H_{tr,H} = 182,61 + 24,03 + 177,78 + 6,29 + 54,37 = 445,08 \text{ Вт/К.}$$

Узагальнений коефіцієнт теплопередачі, що враховує теплопередачу трансмісією між суміжними будівлями розраховують за формулою:

$$H_A = H_{iA} \cdot b_A, \quad (3.1)$$

де H_{iA} – безпосередній узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією між кондиціонованим об'ємом/зоною та суміжною будівлею, Вт/К, визначають згідно з формулою (3.2) з поправочним коефіцієнтом $b_{tr,x} = 1$.

$$H_{iA} = b_{tr,x} \sum A_i U_i, \quad (3.2)$$

де A_i – площа i -го елемента оболонки будівлі, m^2 ; U_i – приведений коефіцієнт теплопередачі i -го елемента оболонки будівлі, $Вт/(m^2 \cdot K)$, що становить:

$$U_i = 1/R_{\Sigma pi}, \quad (3.3)$$

де $R_{\Sigma pi}$ – приведений опір теплопередачі i -го елемента оболонки будівлі, $m^2 \cdot K/Вт$, що для непрозорих елементів визначають згідно з ДСТУ Б В.2.6–189 «Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель» [116]. Для світлопрозорих елементів приймається за відповідними стандартами; $b_{tr,x}$ – поправочний коефіцієнт, що становить 1.

Корегуючий коефіцієнт b_A розраховують для кожного окремого місяця за формулою:

$$b_A = \frac{\theta_i - \theta_a}{\theta_i - \theta_c}, \quad (3.4)$$

де θ_i – розрахункова (задана) температура кондиціонованого об'єму/зони, $20^\circ C$; θ_a – температура внутрішнього повітря суміжної будівлі, $20^\circ C$; θ_e – розрахункова температура зовнішнього середовища, $-22^\circ C$.

Отримано $H_A = 0$, таким чином теплопередача між сусідніми будівлями враховуватись не буде. Також у роботі прийmemo відсутність некондиціонованих об'ємів ($H_U = 0$).

Сумарна теплопередача трансмісією Q_{tr} , що наведена в таблиці 3.3, розрахована згідно формули:

$$Q_{tr} = H_{tr} (\theta_{int} - \theta_e) t, \quad (3.5)$$

де $\theta_{int} = 20^\circ C$ – температура внутрішнього повітря для періоду опалення та $\theta_{int} = 26^\circ C$ – для періоду охолодження; θ_e – середньомісячна температура зовнішнього середовища, $^\circ C$, наведена в таблиці 3.3; t – тривалість місяця, год, наведена в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Визначення теплопередачі трансмісією

Місяць року	Розрахунковий параметр			Сумарна теплопередача трансмісією Q_{tr} , кВт·год, при	
	θ_e , °C	t , год	$H_{tr} \cdot t$	опаленні	охолодженні
Січень	-4,7	744	331139,5	8179,14	10165,98
Лютий	-3,6	672	299093,7	7058,61	8853,17
Березень	1,0	744	331139,5	6291,65	8278,48
Квітень	9,0	720	320457,6	3525,03	5447,77
Травень	15,2	744	331139,5	1589,46	3576,30
Червень	18,3	720	320457,6	544,77	2467,52
Липень	19,8	744	331139,5	66,22	2053,06
Серпень	19,0	744	331139,5	331,13	2317,97
Вересень	13,9	720	320457,6	1954,79	3877,53
Жовтень	8,1	744	331139,5	3940,56	5927,39
Листопад	1,9	720	320457,6	5800,28	7723,02
Грудень	-2,5	744	331139,5	7450,63	9437,47

3.1.2. Характеристики теплопередачі вентиляцією

Для проведення розрахунків прийнято, що вентиляційна система житлового будинку відповідає вимогам ДБН В.2.5-67 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [85] і функціонує на основі природної вентиляції. Показник повітрообміну, враховуючи як вентиляцію, так і інфільтрацію, встановлений на рівні мінімально допустимої кратності для багатоквартирних житлових будівель, що становить $n = 0,8 \text{ год}^{-1}$.

У проєктній системі вентиляції будівлі не передбачено встановлення теплоутилізаційних пристроїв. Додаткові елементи, такі як природне охолодження та нічна вентиляція в певні періоди, не враховуються. Функція центрального попереднього нагріву та охолодження повітря, що подається через вентиляційну систему, не передбачена.

Сумарна теплопередача трансмісією через огорожувальні конструкції, Q_{ve} визначається за такою формулою:

$$Q_{ve} = H_{ve} (\theta_{int} - \theta_e) t, \quad (3.6)$$

де $\theta_{int} = 20^{\circ}\text{C}$ – температура внутрішнього повітря для періоду опалення та $\theta_{int} = 26^{\circ}\text{C}$ – для періоду охолодження; θ_e , $^{\circ}\text{C}$ та t , год – те саме, що наведено в таблиці 3.2.

Значення загального коефіцієнту теплопередачі вентиляцією розраховується за формулою:

$$H_{ve} = \rho_c (\sum b_{ve} q_{ve}), \quad (3.7)$$

де ρ_c – теплоємність повітря одиниці об'єму, дорівнює 0,33 Вт·год/(м³·К); b_{ve} – температурний поправочний коефіцієнт, прийнято $b_{ve} = 1$; q_{ve} – усереднена за часом витрата повітря, м³/год, визначається за формулою:

$$q_{ve} = n \cdot 0,9 \cdot V = 0,8 \cdot 0,9 \cdot V, \quad (3.8)$$

де V – кондиціонований об'єм, м³.

Сумарна теплопередача вентиляцією Q_{ve} , що наведена в таблиці 3.4, розрахована за формулою, яка після спрощень приймає вигляд:

$$Q_{ve} = H_{ve} (\theta_{int} - \theta_e) t = 0,33 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot V (\theta_{int} - \theta_e) t$$

$$Q_{ve} = 0,24 \cdot V (\theta_{int} - \theta_e) t$$

Таблиця 3.4

Визначення теплопередачі вентиляцією

Місяць року	Розрахунковий параметр			Сумарна теплопередача вентиляцією Q_{ve} , кВт·год, при	
	θ_e , $^{\circ}\text{C}$	t , год	$0,24 \cdot V \cdot t$	опаленні	охолодженні
1	2	3	4	5	6
Січень	-4,7	744	882731,002	21803,46	27099,84
Лютий	-3,6	672	797305,421	18816,41	23600,24
Березень	1,0	744	882731,002	16771,89	22068,28
Квітень	9,0	720	854255,808	9396,81	14522,35
Травень	15,2	744	882731,002	4237,11	9533,49
Червень	18,3	720	854255,808	1452,23	6577,77
Липень	19,8	744	882731,002	176,55	5472,93
Серпень	19,0	744	882731,002	882,73	6179,12
Вересень	13,9	720	854255,808	5210,96	10336,50
Жовтень	8,1	744	882731,002	10504,50	15800,88
Листопад	1,9	720	854255,808	15462,03	20587,56
Грудень	-2,5	744	882731,002	19861,45	25157,83

3.1.3. Характеристики внутрішніх теплонадходжень

Внутрішні теплові надходження від джерел тепла всередині будинку Q_{int} , Вт·год, протягом заданого місяця визначаються за такою формулою:

$$Q_{int} = (\sum \Phi_{int} A_f) t, \quad (3.9)$$

де A_f – кондиціонована площа будівлі, м²; t – те саме, що наведено в таблиці 3.2 та 3.3, год. Величини усереднених теплових потоків приймаються згідно ДСТУ 9190:2022 «Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні».

Сумарне значення середнього теплового потоку для багатоквартирного житлового будинку, враховуючи графік експлуатації, визначається відповідно до даних таблиці В.2 (додаток В):

$$\Phi_{int} = (1,8 + 2 + 2)(112/168) = 3,86 \text{ Вт/м}^2$$

Результати розрахованих помісячних розрахунків внутрішніх теплонадходжень наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Внутрішні теплонадходження

Місяць року	Розрахунковий параметр	Внутрішні теплонадходження вентиляцією Q_{int} , кВт·год, при	
	t , год	опаленні	охолодженні
Січень	744	4771,48	4771,48
Лютий	672	4309,72	4309,72
Березень	744	4771,48	4771,48
Квітень	720	4617,56	4617,56
Травень	744	4771,48	4771,48
Червень	720	4617,56	4617,56
Липень	744	4771,48	4771,48
Серпень	744	4771,48	4771,48
Вересень	720	4617,56	4617,56
Жовтень	744	4771,48	4771,48
Листопад	720	4617,56	4617,56
Грудень	744	4771,48	4771,48

3.1.4. Характеристики сонячних теплонадходжень

Надходження теплової енергії від сонячного випромінювання до будівлі впродовж кожного місяця, Q_{sol} (Вт·год), визначається як:

$$Q_{sol} = (\sum \Phi_{sol}) t, \quad (3.10)$$

де Φ_{sol} – усереднений за часом тепловий потік сонячного випромінювання, Вт; t – те саме, що наведено в таблицях 3.3, 3.4 та 3.5, год.

Враховано лише надходження тепла від сонячного випромінювання через вікна, тому розрахункова методика далі надається у спрощеному форматі.

$$\Phi_{sol} = F_{sh} \cdot A_{sol} \cdot I_{sol} - F_r \cdot \Phi_r, \quad (3.11)$$

де F_{sh} – понижувальний коефіцієнт затінення перешкодами для еквівалентної площі інсоляції. Приймається відсутність перешкод, тому $F_{sh} = 1$; F_r та Φ_r – відповідно коефіцієнт форми та додатковий тепловий потік внаслідок випромінювання в атмосферу. Для вікон не враховуються; A_{sol} – еквівалентна площа інсоляції поверхні вікна з даною орієнтацією, що визначається за формулою:

$$A_{sol} = F_{sh,gl} \cdot g_{gl} (1 - F_F) A_{w,p}, \quad (3.12)$$

де $F_{sh,gl}$ – понижувальний коефіцієнт затінення для рухомих засобів. Засоби рухомого затінення у даній будівлі відсутні, тому $F_{sh,gl} = 1$; g_{gl} – загальний коефіцієнт пропускання сонячної енергії світлопрозорої частини елемента, тобто склопакета у нашому варіанті, розраховується за формулою:

$$g_{gl} = 0,9 \cdot g_n, \quad (3.13)$$

де g_n – коефіцієнт загального пропускання сонячної енергії, визначається за таблицею В.3 (Додаток В).

Світлопрозорі елементи, що застосовуються для застосування будівель, включають віконні та балконні блоки, виготовлені на основі ПВХ-профілів із встановленими двокамерними склопакетами. У конструкції передбачено два енергозберігаючі покриття, нанесені на внутрішню поверхню скла. Для

цього типу застосування коефіцієнт загального проникнення сонячної енергії при нормальному падінні променів, відповідно до таблиці В.3 при потрібному склінні (Додаток В), дорівнює $g_n = 0,7$. F_F – це коефіцієнт, що характеризує частку площі обрамлення, що визначається зі співвідношення між площею його проекції та загальною проекцією застосованого елемента. За відсутності точних параметрів прийнято використовувати значення $F_F = 0,3$.

Формула для розрахунку надходження сонячного тепла, розроблена з урахуванням зазначених вище припущень, приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Phi_{sol} &= A_{sol} \cdot I_{sol} = 0,9 g_n (1 - 0,3) A_{w,p} \cdot I_{sol} = 0,9 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot A_{w,p} \cdot I_{sol} = \\ &= 0,441 \cdot A_{w,p} \cdot I_{sol}. \end{aligned}$$

де: $A_{w,p}$ – площі вікон за сторонами світу, приймаються за даними таблиці 2.1. Для фасаду з північної сторони – $A_{w,Пн} = 124,5 \text{ м}^2$; фасад з південної сторони – $A_{w,Пд} = 144,06 \text{ м}^2$; I_{sol} – середньомісячна сонячна радіація за сторонами світу, що приймається за даними таблиці В.4. Дані розрахованих сонячних теплонадходжень наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Сонячні теплонадходження при опаленні й охолодженні

Місяць року	Параметр										
	Пн		Сх		Пд		Зх		$\Sigma \Phi_{sol}$, кВт	t	Q_{sol} , кВт·год
	I_{sol}	Φ_{sol}	I_{sol}	Φ_{sol}	I_{sol}	Φ_{sol}	I_{sol}	Φ_{sol}			
Січень	13	713,76	21	0	50	3176,52	22	0	3,89	744	2894,37
Лютий	24	1317,7	36	0	70	4447,13	38	0	5,76	672	3873,97
Березень	35	1921,6	58	0	90	5717,74	61	0	7,64	744	5683,71
Квітень	39	2141,3	77	0	92	5844,80	73	0	7,99	720	5749,98
Травень	56	3074,6	104	0	101	6416,57	99	0	9,49	744	7061,47
Червень	67	3678,6	111	0	96	6098,92	105	0	9,78	720	7039,82
Липень	61	3349,1	108	0	98	6225,98	104	0	9,58	744	7123,92
Серпень	40	2196,1	93	0	106	6734,22	89	0	8,93	744	6644,22
Вересень	29	1592,2	70	0	102	6480,10	66	0	8,07	720	5812,08
Жовтень	19	1043,1	38	0	75	4764,78	37	0	5,81	744	4321,13
Листопад	11	603,94	17	0	39	2477,68	17	0	3,08	720	2218,78
Грудень	9	494,14	14	0	35	2223,56	15	0	2,72	744	2021,97

3.1.5. Сумарна теплопередача та теплові надходження

Для кожного місяця сумарну теплопередачу (Q_{ht} , кВт·год, – для режиму $Q_{H,ht}$ опалення, $Q_{C,ht}$ – для режиму охолодження) визначають за формулою:

$$Q_{ht} = Q_{tr} + Q_{ve}, \quad (3.14)$$

Розрахунки представлено в таблиці 3.6 для режиму опалення, для режиму охолодження – у таблиці В.9.

Сумарні теплові надходження Q_{gn} , кВт·год, ($Q_{H,gn}$ – для опалювального періоду, $Q_{C,gn}$ – для режиму охолодження) у кожній зоні будівлі для кожного місяця розраховуються за такою формулою:

$$Q_{gn} = Q_{int} + Q_{sol}, \quad (3.15)$$

Розрахунки представлено в таблиці 3.7 для режиму опалення, для режиму охолодження – у таблиці В.10.

3.1.6. Динамічні параметри

Для режиму опалення безрозмірні співвідношення надходжень і втрат теплоти визначаються за наступною формулою:

$$\gamma_H = \frac{Q_{H,qn}}{Q_{H,ht}}, \quad (3.16)$$

Отримані розрахунки представлено в таблиці В.9.

Часова константа будівлі розраховується без урахування додаткової вентиляції від нічного та/або природнього охолодження за спрощеною формулою:

$$\tau = \frac{C_m}{H_{tr} + H_{ve}}, \quad (3.17)$$

де $H_{tr,H} = 445,08$ Вт/К; $H_{ve} = 0,24 \cdot V = 0,24 \cdot 4943,61 = 1186,46$ Вт/К; C_m – внутрішня теплоємність будівлі, Вт·год/К, розраховується за формулою:

$$C_m = C \cdot A_f, \quad (3.18)$$

де C – внутрішня теплоємність будівлі або зони будівлі на одиницю площі, Вт·год/(м²·К), приймається згідно з таблицею В.5.

Будівля відноситься до категорії «середній» відповідно до таблиці В.5, тому її внутрішня теплоємність на кожен квадратний метр площі складає $C = 50$ Вт·год/(м²·К). З урахуванням цього визначаємо C_m .

$$C_m = C \cdot A_f = 50 \cdot 1661,473 = 83073,65 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{К}$$

Часова константа будівлі для режиму опалення буде:

$$\tau = \frac{C_m}{H_{tr} + H_{ve}} = \frac{83073,65}{445,08 + 1186,46} = 50,91 \text{ год}$$

Безрозмірний числовий параметр α_H визначили за формулою:

$$\alpha_H = \alpha_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} = 1 + \frac{50,91}{15} = 3,39, \quad (3.19)$$

Коефіцієнт ефективності використання теплових надходжень для опалення $\eta_{H,gn}$, який не має розмірності, визначається окремо для кожного місяця за такими розрахунковими виразами:

якщо $\gamma_H > 0$ та $\gamma_H \neq 1$:	$\eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{\alpha_H}}{1 - \gamma_H^{\alpha_H + 1}},$
якщо $\gamma_H = 1$:	$\eta_{H,gn} = \frac{\alpha_H}{\alpha_H + 1},$
якщо $\gamma_H < 0$ та $Q_{H,gn} > 0$:	$\eta_{H,gn} = 1 / \gamma_H,$
якщо $\gamma_H \leq 0$ та $Q_{H,gn} \leq 0$:	$\eta_{H,gn} = 1.$

Формула вибрана відповідно співвідношення надходжень і втрат теплоти γ_H і числового параметра α_H . Розраховані значення $\eta_{H,gn}$ наведено в таблиці В.9.

Для **режиму охолодження** безрозмірні співвідношення надходжень і втрат теплоти визначаються за наступною формулою:

$$\gamma_C = \frac{Q_{c,qn}}{Q_{c,ht}}, \quad (3.20)$$

Отримані розрахунки представлено в таблиці В.10.

Часову константу будівлі розраховано без урахування додаткової вентиляції від нічного та/або природнього охолодження за спрощеною формулою:

$$\tau = \frac{C_m}{H_{tr} + H_{ve}}, \quad (3.21)$$

де $H_{tr,C} = 445,08$ Вт/К; $H_{ve} = 0,24 \cdot V = 0,24 \cdot 4943,61 = 1186,46$ Вт/К; C_m – внутрішня теплоємність будівлі, Вт·год/К, розраховується за формулою:

$$C_m = C \cdot A_f, \quad (3.22)$$

де C – внутрішня теплоємність будівлі або зони будівлі на одиницю площі, Вт·год/(м²·К), приймається згідно з таблицею В.5 (додаток В). За аналогічним попереднім розрахунком для режиму охолодження $\tau = 50,91$ год.

Безрозмірний числовий параметр α_H визначається за наступною формулою:

$$\alpha_C = \alpha_{C,0} + \frac{\tau}{\tau_{C,0}} = 1 + \frac{50,91}{15} = 3,39, \quad (3.23)$$

Коефіцієнт використання надходжень для охолодження $\eta_{C,gn}$, який не має розмірності, визначається окремо для кожного місяця за такими розрахунковими виразами:

якщо $\gamma_C > 0$, $\gamma_C \neq 1$ та $Q_{C,int} > 0$:	$\eta_{C,ls} = \frac{1 - \gamma_C^{-\alpha_C}}{1 - \gamma_C^{-(\alpha_C + 1)}}$,
якщо $\gamma_C > 0$, $\gamma_C \neq 1$ та $Q_{C,int} \leq 0$:	$\eta_{C,ls} = 1$,
якщо $\gamma_C = 1$:	$\eta_{C,ls} = \frac{\alpha_C}{\alpha_C + 1}$,
якщо $\gamma_H \leq 0$ та $Q_{H,gn} \leq 0$:	$\eta_{C,ls} = 1$.

Обираємо формулу відповідно на основі співвідношення надходжень і втрат теплоти γ_C і числового параметра α_C . Розраховані значення $\eta_{C,ls}$ представлено в таблиці В.10.

3.1.7. Енергопотреба для опалення та охолодження

Енергопотреби для опалення окремо для кожного місяця, $Q_{H,nd}$, кВт·год, за умови постійного опалення, розраховують за формулою:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,ht} Q_{H,gn}, \quad (3.24)$$

Отримані розрахунки представлено в таблиці В.9.

Енергопотреби для охолодження окремо для кожного місяця, $Q_{C,nd}$, кВт·год, за умови постійного охолодження, розраховують за формулою:

$$Q_{C,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} Q_{C,ht}, \quad (3.25)$$

Отримані розрахунки представлено в таблиці В.10.

3.1.8. Енергопотреби гарячого водопостачання

Річні питомі потреби енергії для гарячого водопостачання визначено відповідно до даних таблиці В.6 (додаток В) і для багатоквартирних житлових будинків складають 20 кВт·год/м². Враховуючи питомі річні енергопотреби ГВП розраховали загальні енергопотреби ГВП за формулою:

$$Q_{DHW,need} = 20 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \cdot A_f = 20 \cdot 1661,473 = 33229,46 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (3.26)$$

3.1.9. Визначення класу енергоефективності будівлі

Питома річна енергопотреба для опалення, охолодження та ГВП, визначається за такою формулою:

$$EP = (Q_{H,nd} + Q_{C,nd} + Q_{DHW,nd}) / A_f, \quad (3.27)$$

$$EP = (103052,28 + 14498,68 + 33229,46) / 1661,473 = 90,75 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2.$$

Нормативна максимальна питома енергопотреба згідно з таблицею В.7 (Додаток В) становить $EP_{max} = 83 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$. Відхилення в % розрахункової питомої енергопотреби (EP) від максимально допустимого значення (EP_{max}) становить:

$$[(EP - EP_{max}) / EP_{max}] \cdot 100\% = [(90,75 - 83) / 83] \cdot 100\% = 9,33\%$$

Рівень енергетичної ефективності, визначений на основі співвідношення з таблицею В.8, відповідає категорії «D».

Сумарна річна енергопотреба становить:

$$103052,28 + 14498,68 + 33229,46 = 150780,42 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

За даного спрощеного розрахунку рівень енергоефективності даної будівлі відповідає класу «D», що не задовольняє вимоги ДБН В.2.6–31 «Теплова ізоляція будівель» [86]. Необхідно здійснити заходи для покращення енергоефективності та доведення її до нормативного рівня класу «C».

У межах розрахунку енергетичного паспорту здійснюється аналіз теплотехнічних характеристик усіх огорожувальних конструкцій – стін, покрівлі, підлоги, вікон і дверей, що визначають здатність будівлі утримувати теплоту. Паралельно враховувались показники споживання теплової, електричної та холодної енергії, а також параметри роботи інженерних систем – опалення, вентиляції, кондиціонування, гарячого водопостачання та освітлення. Важливою складовою розрахунку є моделювання обміну теплоти між внутрішнім і зовнішнім середовищем будівлі. Енергетичний паспорт виступає не лише як узагальнений технічний документ, а й як аналітична основа для прийняття рішень у сфері енергоменеджменту.

3.2. Порівняння програмних засобів оцінки теплового балансу будівель

Для розрахунків та впровадження оцінки енергоефективності доцільно використовувати сучасні програмні інструменти, що моделюють тепловий баланс будівлі з урахуванням огорожувальних конструкцій, інженерних систем, клімату, дозволяють визначати річні та питомі енерговитрати, клас енергоефективності, потенціал економії та формувати енергетичні паспорти й сертифікати згідно зі стандартами EN ISO 13790/52016 і національними вимогами. Важливим є також використання інструментів Building Information Modelling (BIM) [60], яке прискорює

реконструкцію існуючих будівель, забезпечує точне моделювання енергоспоживання, автоматизований збір даних (зокрема через IoT-датчики) та оптимізацію режимів експлуатації.

Наприклад, існують такі сучасні програмні засоби, як динамічні симулятори будівель, що дають змогу детально моделювати їх енергетичну поведінку. До них належить EnergyPlus – потужний безкоштовний програмний двигун для моделювання енергоспоживання будівлі, мікроклімату приміщень та роботи систем опалення, вентиляції й кондиціонування, який широко застосовують науковці та проєктанти [17]. Також використовуються IDA ICE, DIBS, SimBldPy – це динамічні моделі, побудовані на методології стандартів EN ISO 13790 та EN ISO 52016–1, які дозволяють розраховувати теплові навантаження, потребу в охолодженні, параметри вентиляції та показники теплового комфорту в будівлях [53, 17].

Пакет PHPP використовується для проєктування та сертифікації пасивних будівель, розрахунку теплового балансу, потреб на опалення/охолодження, первинної енергії та аналізу варіантів реконструкції з урахуванням економічної ефективності. Нова версія програми *PHPP 9* дозволяє порівнювати різні варіанти проєктів, включаючи їх економічну ефективність, що дає змогу оцінити вплив герметичності, механічної та природної вентиляції, ефективності вікон, а також визначити умови ізоляції, вентиляції та герметизації, які відповідатимуть вимогам сертифікації EnerPHit. Оскільки цей інструмент також враховує економічний ефект, він дає змогу оцінити енергетичну безпеку будівель на основі конкретних показників, оскільки ці два параметри взаємопов'язані [35].

Програмний комплекс Hottgenroth дає змогу моделювати 3D-системи, роботу фотоелектричних установок, теплових насосів і тепловий баланс будівлі, тоді як ArchiPHYSIK, інтегрований з ArchiCAD і SketchUp, забезпечує розрахунки для енергетичних сертифікатів, акустичних та екологічних показників [78]. EcoDesigner STAR (Graphisoft) поєднує BIM і BEM, дозволяючи швидко формувати й порівнювати варіанти

енергетичного балансу будівлі в середовищі ArchiCAD, попри спрощене врахування теплообміну між зонами. Optima орієнтована на ранні стадії проєктування, забезпечує оперативну оцінку енергоефективності та економіки рішень, включаючи альтернативні джерела енергії, а ETU-Planer – на розрахунок теплового навантаження, параметрів систем опалення й візуалізацію теплового балансу [15].

Серед програм для енергетичних сертифікатів та паспортів відзначимо AX3000 Energy Performance Certificate – BIM-орієнтоване рішення для розрахунку енерговитрат і формування сертифіката енергоефективності будівлі, з інтеграцією будівельних норм різних країн. Також є Design SAP (Elmhurst), BuildDesk (U, Carbon Checker) та адаптований для роботи в Україні PETRA Tool [18].

Порівняння проаналізованих методик та програмних засобів наведено в Додатку Г.

3.3. Проведення тепловізійного аналізу будівлі

Тепловізійне обстеження зовнішніх огорожувальних конструкцій житлового комплексу III ЖК «Арт-квартал Співоче» було проведено у січні при температурі повітря $-10,4^{\circ}\text{C}$. На рис. 3.2 відображені результати інфрачервоного термографічного дослідження тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції у таких ділянках: глухі стіни без віконних прорізів біля ліфтових шахт і на торцях секцій (рис. 3.2, а, ж); стіни з маленькими віконними отворами в районі сходових кліток (рис. 3.2, а, б); стіни з невеликими та великими (вітражними) вікнами у кімнатах і заксленими лоджіями на всю висоту, які не опалюються (рис. 3.2, в, д); стіни з великими вікнами, розташовані біля деформаційного шва між секціями 6 і 7 (рис. 3.2, е); стіни біля деформаційного шва між секціями 5 і 6, що утворюють кути з впадинами, з протилежних сторін будівлі (рис. 3.2, б, ж); стіни з маленькими вікнами (рис. 3.2, г, є). Температурні показники

поверхонь зовнішніх стін та віконних прорізів коливалися від $+2,5^{\circ}\text{C}$ до $-6,0^{\circ}\text{C}$, при цьому середня температура становила -4°C . Вища температура на поверхні огорожувальних конструкцій свідчить про активний теплообмін між їх внутрішніми та зовнішніми шарами, що вказує на недостатній рівень теплоізоляції.

Найбільші тепловтрати (температура $+2,5^{\circ}\text{C}$) спостерігаються в зоні деформаційних швів між секціями 2 і 3 (рис. 3.2, а), а також між секціями 4 і 6 в області, де утворюється кут, що поглиблюється. У цих місцях температура змінюється від 0°C до $+2,2^{\circ}\text{C}$ знизу вгору (рис. 3.2, б). Причиною цього є те, що при з'єднанні сусідніх секцій будівлі з окремими несучими торцевими стінами виникають виступаючі кути, де теплові втрати значно більші порівняно з плоскими стінними поверхнями. Можливо, що технологія утеплення деформаційних швів була порушена під час будівництва [83, 129]. Середня температура на поверхнях склопакетів складає $-2,5^{\circ}\text{C}$, як і температура на периметрі віконних рам. Це вказує на цілком типову і сумісну температуру зовнішньої поверхні вікна з нормальною теплоізоляцією. На рис. 3.1, ж, видно надмірні тепловтрати, що виникають через недостатню теплоізоляцію огорожувальних конструкцій лоджії (вікна з одинарними склопакетами, бічні стіни, плити підлоги та стелі), температура яких варіюється в межах $+1 \div +2,2^{\circ}\text{C}$. Мешканці квартири переобладнали лоджію в опалювальне приміщення, порушивши при цьому проєктні вимоги. Найбільші тепловтрати спостерігаються в зонах деформаційних швів між секціями будівлі та в кутових ділянках, де температура варіюється від 0°C до $+2,2^{\circ}\text{C}$. Також були зафіксовані значні втрати тепла в зонах розташування великих вітражів у житлових кімнатах. Для зниження тепловтрат через віконні прорізи вітражів рекомендується заміна віконних рам на конструкції з більшим опором теплопередачі не менше $0,75 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ та додатковою ізоляцією. Для покращення характеристик зовнішніх стін, особливо в зонах деформаційних швів можна передбачити застосування пружних герметиків по всій висоті швів.

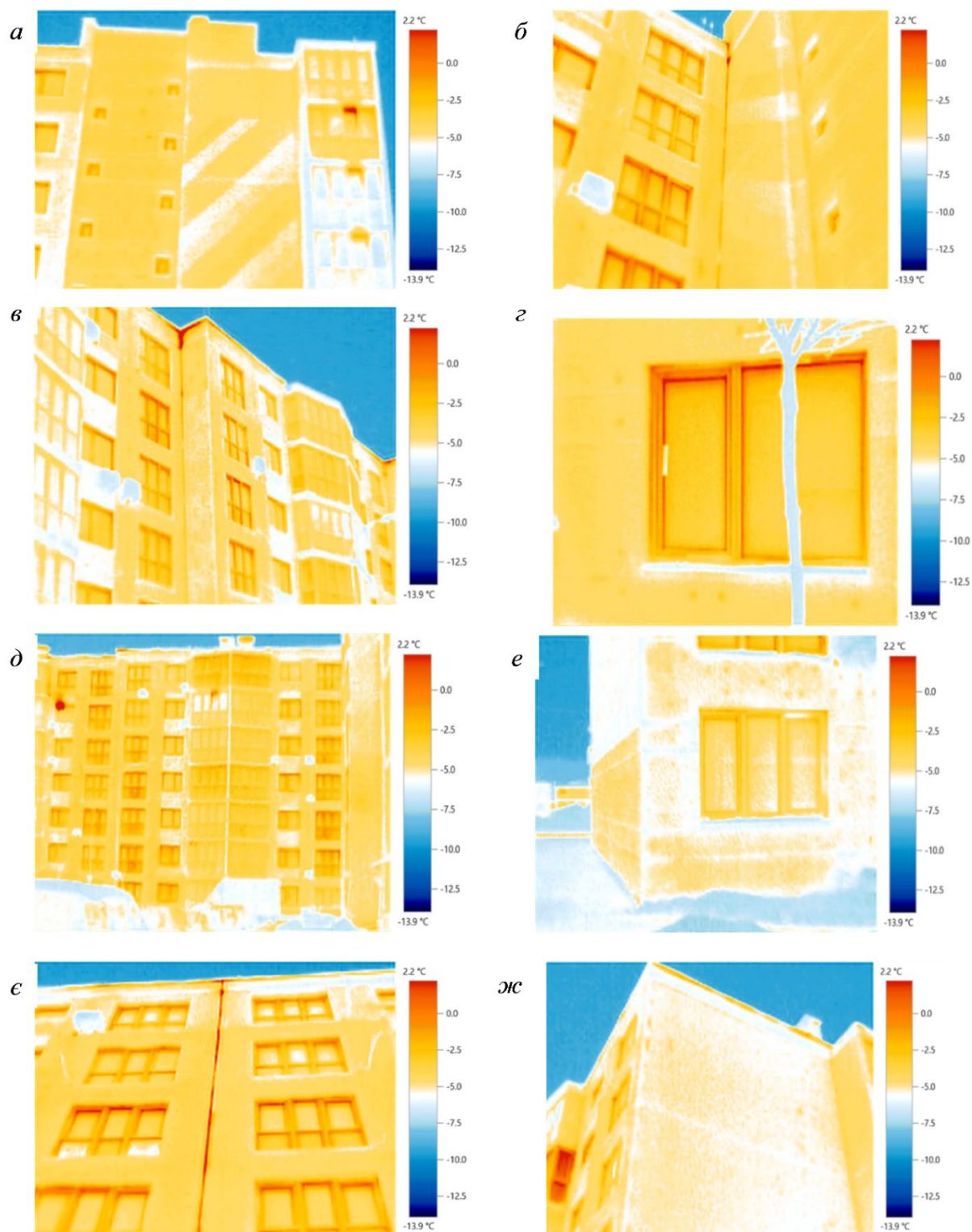


Рис. 3.2. Результати інфрачервоного термографічного обстеження житлового будинку №3: а – стіни сходової клітки та ліфтового відділення 7 секції; б, ж – деформаційний шов між 4 та 5 секціями (западни в кутах з обох боків); в, д – стіни, вікна та вітражі 2 секції; г – вікно 2 секції; е – стіни виступаючого кута 1 секції; є – деформаційний шов між 2 та 3 секціями

В місцях, де відбуваються втрати тепла через западаючі та виступаючі кути будівлі, а також у точках примикання внутрішніх стін до зовнішніх, доцільно збільшити товщину утеплювального шару. Тепловізійне дослідження показало, що тепловтрати будівлі не є критичними та відповідають рівню типової забудови.

Звісно, дослідження тепловтрат через використання тепловізорів не є повністю точними, оскільки існує ймовірність, що деякі вузли з значними тепловтратами можуть бути не виявлені. Разом з тим для аналізу існуючих об'єктів і надання рекомендацій щодо утеплення стиків зовнішніх огорожувальних конструкцій, тепловізійні дослідження є досить ефективними.

Діагностика допомагає оцінити відповідність споруди нормативам енергоефективності шляхом порівняння реальних теплових втрат та опору теплопередачі із нормативними показниками. Це опосередковано визначає екологічну якість будівлі, оскільки менш енергоефективні споруди потребують більшого використання ресурсів та виробляють більше викидів від опалювальних систем. Ідентифікація точок втрат енергії дозволяє оптимізувати споживання паливних ресурсів, скоротити енергетичні затрати, зменшити викиди парникових газів та інших шкідливих речовин у атмосферу.

У сфері енергетики та урбаністики методи тепловізійної діагностики для якісної оцінки передбачаємо в сукупності з аналізом викидів, енергоспоживання й мікроклімату споруд, щоб створити модель впливу будівель на локальне середовище.

Для ефективного управління екологічними ризиками необхідно систематизувати виявлені дефекти за критеріями: тип конструкції, стадія виникнення (проекування, будівництво, експлуатація), ступінь впливу на теплозахист, мікроклімат і екологічні показники. Наприклад, містки холоду часто виникають у місцях стиків між панелями, вузлах кріплення вікон, дверей,

або в місцях проходження інженерних комунікацій. Неякісний монтаж утеплювача призводить до зниження його ефективності, а порушення герметичності – до фільтрації повітря та зростання тепловтрат.

На основі систематизації дефектів можна розробити структуру бази екологічних ризиків, яка включає:

- Перелік типових дефектів і їх вплив на енергоефективність та екологічні показники.
- Класифікацію ризиків за ступенем небезпеки (низький, середній, високий).
- Рекомендації щодо усунення дефектів та запобігання їх повторному виникненню.
- Оцінку екологічних наслідків (збільшення емісій, витрати ресурсів, вплив на здоров'я мешканців).

Така база дозволить не лише вчасно виявляти та усувати дефекти, а й розробляти проактивні заходи для забезпечення екологічно безпечної експлуатації споруд. Наприклад, регулярне тепловізійне обстеження допомагає виявляти приховані дефекти, а аналіз даних – прогнозувати потенційні екологічні ризики.

Важливим доповненням до оцінки стану будівель у сучасних умовах є врахування екологічних наслідків дефектів, спричинених воєнними діями. Механічні ушкодження огорожувальних конструкцій та несучих елементів призводять до формування або різкого посилення містків холоду, що виникають у зонах вибухів, локальних руйнацій стін і перекриттів, а також у місцях аварійних підсилень. Втрата герметичності через тріщини, заломы, розриви й фрагментацію конструкцій змінює повітропроникність огорожень, що, у свою чергу, впливає на тепловий режим приміщень, вологісний баланс і умови для розвитку цвілі та біопошкоджень. Одночасно пошкодження шарів утеплювача, паро- та гідроізоляції – як часткове, так і повне руйнування – призводить до зниження опору теплопередачі, накопичення вологи в конструкціях та прискореного зносу матеріалів.

Окремий блок ризиків пов'язаний із забрудненням внутрішніх поверхонь і порожнин будівель токсичними речовинами, до яких належать залишки вибухових речовин, важкі метали, нафтопродукти, а також мікропил, що утворюється внаслідок інтенсивних руйнацій. Такі забруднювачі можуть мігрувати в повітря приміщень, пори матеріалів, ґрунт і системи водовідведення, формуючи довготривалі загрози для здоров'я мешканців та довкілля. Додатково корозія металоконструкцій, спричинена впливом агресивних речовин, тривалим контактом з водою після затоплень чи гасіння пожеж, знижує несучу здатність елементів та підвищує ризики аварійних ситуацій. Зміна фізичних і хімічних властивостей бетону, цегли, деревини під дією високих температур, вібраційних навантажень і хімічного впливу також позначається на довговічності та екологічній безпечності будівельного фонду.

Потрібно відмітити, що важливим та ефективним інструментом енергомоніторингу який потрібно передбачити у комплексній оцінці – це перехід від традиційного тепловізійного обстеження окремої будівлі до дистанційного моніторингу забудови із використанням безпілотників. Класичні методики, що передбачають локальне обстеження фасадів та покрівлі однієї споруди з землі, є трудомісткими, залежать від доступності кожної ділянки огорожувальних конструкцій і фактично не дозволяють отримати цілісну картину теплових втрат у масштабі кварталу чи району. Для багатоповерхової та щільної міської забудови такі підходи стають малоефективними, оскільки не забезпечують необхідної оперативності та просторової узагальненості даних.

Використання безпілотних літальних апаратів, обладнаних тепловізійними камерами, дає змогу подолати ці обмеження й організувати моніторинг енергетичного стану великої кількості будівель за відносно короткий проміжок часу. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) здатні оперативно збирати дані про енергетичні процеси – тепловтрати, аномалії температур, вологість, рівень забруднення тощо – із використанням тепловізорів, датчиків температури, вологості, а також систем фіксації шкідливих викидів. Для

енергомоніторингу будівель такі системи доцільно поєднувати: дрон одночасно проводить тепловізійну зйомку оболонки будинку й вимірює якість повітря навколо нього, що дозволяє зв'язати енергетичні процеси (тепловтрати, робота систем опалення) з локальним рівнем забруднення та формувати більш повну екологічну оцінку забудови.

Дрони можуть виконувати обльоти багатоповерхових житлових і громадських будинків з різних висот і ракурсів, фіксуючи розподіл температурних полів на фасадах, покрівлях і в зоні стику будівельних конструкцій. У результаті формується масив тепловізійних зображень, який не лише дозволяє виявляти локальні дефекти, такі як містки холоду чи зони руйнування теплоізоляції, а й відображає характер тепловтрат у межах суцільних фрагментів забудови. На основі таких даних стає можливим створення теплових карт цілих кварталів, де виокремлюються ділянки з підвищеною інтенсивністю теплових втрат, що фактично формують локальні теплові «острови» в міському середовищі. Це дає підстави перейти від точкової діагностики до просторового аналізу, коли енергетична поведінка окремого будинку розглядається в контексті навколишньої забудови, інженерної інфраструктури та планувальної структури міста. У такій парадигмі тепловізійна зйомка набуває значення інструменту міського планування, орієнтованого на зменшення енергоспоживання та підвищення екологічної якості середовища.

Інтеграція тепловізійних даних, отриманих із дронів, з геоінформаційними системами та базами даних про характеристики будівель дозволяє формувати пріоритетні переліки об'єктів для енергомодернізації. У першу чергу можуть бути відібрані споруди, що створюють найбільший вклад у загальні тепловтрати кварталу, а отже – у надмірне споживання паливно-енергетичних ресурсів і відповідні викиди забруднюючих речовин в атмосферу. Такий підхід дозволяє планувати заходи з термомодернізації не ізолювано, а як елементи комплексної програми екологічного удосконалення міської забудови.

Система дистанційного екологічного моніторингу на базі безпілотних літальних апаратів має передбачати поєднання аерозйомки й стаціонарних сенсорних мереж. Спочатку БПЛА запускаються над міськими або промисловими кварталами, виконують польоти на різних висотах і під різними кутами, що дає змогу детально сканувати зовнішні огорожувальні конструкції будівель та фіксувати дефекти теплозахисту, зокрема містки холоду, пошкодження ізоляційних матеріалів і локальні аномалії температурного поля. Одночасно реєструються нетипові енергетичні процеси, пов'язані з нераціональною роботою систем опалення чи вентиляції, перевитратами теплової енергії або нерівномірністю теплообміну між будівлею та навколишнім середовищем. Потім дані з тепловізійних, газоаналітичних та інших датчиків, установлених на безпілотниках, у режимі наближеному до реального часу передаються на сервери, де спеціалізоване програмне забезпечення здійснює автоматизований аналіз, виявляє критичні відхилення й формує аналітичні звіти для подальшого прийняття рішень.

Паралельно в самих будівлях функціонують стаціонарні сенсорні мережі, що забезпечують безперервний моніторинг параметрів мікроклімату, таких як температура, відносна вологість, концентрація шкідливих домішок у повітрі. Отримана від них інформація синхронізується з результатами аерозйомки, що дозволяє зіставити зовнішню і внутрішній стан, виявити причинно–наслідкові зв'язки між дефектами огорожувальних конструкцій та відхиленнями мікроклімату. У підсумку можливо сформувати єдину інтегровану базу даних, на основі якої здійснюється комплексний аналіз енергоекологічного стану забудови.

3.4. Аналіз автоматичних систем моніторингу енерговитрат

У межах оцінювання енергетичної безпеки будівель передбачено впровадження програм моніторингу енергоспоживання, які забезпечують безперервний збір та аналіз даних про використання теплової, електричної

та інших видів енергії в реальному часі. Важливою складовою такого підходу є інтеграція «розумних» лічильників, здатних передавати деталізовані показники споживання з високою часовою роздільною здатністю, що дозволяє виявляти аномалії, пікові навантаження, нераціональне використання ресурсів і оперативно реагувати на відхилення від цільових параметрів.

З розвитком систем штучного інтелекту та розумних технологій управління прогнозовано побудову аналогічної інтегрованої системи вже в рамках нового комплексного підходу до управління енергетичною та екологічною стабільністю будівель і процесами відбудови. Такі системи можуть поєднувати дані моніторингу енергоспоживання, параметрів мікроклімату, стану конструкцій та екологічних показників, застосовуючи алгоритми прогнозування й оптимізації для вибору найефективніших сценаріїв експлуатації й реконструкції. У результаті енергетична безпека, екологічна стійкість та відбудова розглядаються не окремо, а як єдина керована система, де рішення приймаються на основі даних і здатні адаптуватися до змін зовнішніх умов.

В Україні вже застосовується низка спеціалізованих програм для моніторингу енергоспоживання будівель, які проаналізовано з позицій їх використання в оцінці енергетичної безпеки. Як базовий інструмент моніторингу рекомендовано застосовувати EnergyPlan, що забезпечує збір, обробку й наочне представлення великих масивів даних про споживання енергії для енергоменеджерів, керівників проєктів та мешканців будівель. (рис. 3.3). EnergyPlan дає змогу задавати основні параметри будівлі (тип, рік спорудження, технічні характеристики, споживані енергоресурси, джерела енергії, паливо, систему обліку) з можливістю автоматичного зчитування показників лічильників. Програма дозволяє аналізувати ефективність використання ресурсів, виявляти аномалії споживання, формувати рейтинг будівель для енергоаудиту, враховувати вплив погоди та контролювати

дотримання лімітів. Звіти подаються у форматі таблиць, діаграм і графіків, а система підтримує розмежування доступу та прав користувачів [16].

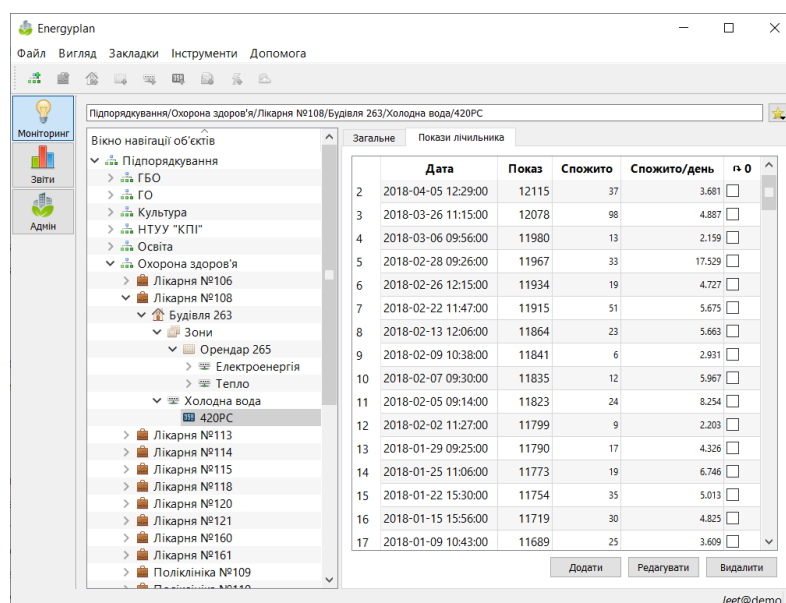


Рис. 3.3. Демонстрація інструменту моніторингу EnergyPlan.

Джерело: Офіційний сайт EnergyPlan

Окрім EnergyPlan, у межах комплексного підходу доцільно використовувати також ENSI Енергомонітор та аналітичний модуль RETScreen як альтернативні інструменти. ENSI Енергомонітор забезпечує систематичний моніторинг енергоспоживання, порівняння фактичних і розрахункових показників у вигляді графіків та виявлення надлишкових витрат. Після запровадження в Україні обов'язкової енергосертифікації окремих категорій будівель розроблено спеціалізовані програми НДІБК та Energy Performance Certification (EPCert) для розрахунку класів енергоефективності на рівні енергопотреб, підведеної та первинної енергії, однак через обмежене їхнє використання фахівці змушені створювати власні програмні рішення.

Ще один продукт ENSI – «Муніципальне планування енергоефективності: база даних енергоспоживання муніципальних об'єктів» – створений для органів місцевого самоврядування на платформі

Microsoft Access 2003 і призначений для збирання та аналізу даних про енергоспоживання й основні характеристики об'єктів ЖКГ та вуличного освітлення. Програма адаптується до структури конкретного муніципалітету, дозволяє групувати об'єкти за районами й типами будівель, зберігати технічні та енергетичні показники, відбирати будівлі для енергоефективних проєктів і формувати звіти у табличному та графічному вигляді.

Програмний комплекс RETScreen використовується для аналізу й оптимізації технічних та фінансових параметрів енергоефективних проєктів нового будівництва і модернізації будівель. Він забезпечує енергетичну, економічну та екологічну оцінку заходів, включно з аналізом викидів парникових газів і ризиків, на основі введених даних про тип будівлі, режим експлуатації, теплотехнічні характеристики конструкцій, інженерні системи та паливно-енергетичні ресурси [90].

Окрім згаданих, існує низка аналогічних програмних комплексів, наприклад: Energy Star Portfolio Manager; Trane Tracker; Schneider Electric EcoStruxure™ Building Operation; Daikin Intelligent Solutions (i-Net); Honeywell Building Management Solutions (BMS); UMUNI; AIC «Енергосервіс: облік, контроль, економія»; Fela [153].

Програми моніторингу енергоспоживання мають працювати разом із засобами автоматичного вимірювання, насамперед інтелектуальними лічильниками, які автоматично передають дані про споживання енергії, тепла, газу чи води та підтримують профіль навантаження. Алгоритм їх інтеграції з системою моніторингу передбачає передачу даних через захищений канал (наприклад, LoRaWAN, NB-IoT чи TCP/IP) на сервер, де вони агрегуються в часові ряди, аналізуються для виявлення аномалій та формування рекомендацій щодо режимів роботи обладнання й обмеження пікових навантажень. Зібрана інформація зберігається в цифровій базі даних і використовується для розрахунку вартості послуг, аналізу тенденцій та звітності, а спеціалізоване програмне забезпечення з аналітичним модулем

забезпечує доступ користувачів, статистичний і порівняльний аналіз, розрахунок енергобалансів та оцінку потенціалу енергозбереження [99].

3.5. Впровадження нових систем моніторингу на базі ШІ

Інтегрована система децентралізованого моніторингу енергетики й екології будівель розглядається як інноваційний підхід, що перетворює кожен будівлю на автономну одиницю енергетичної та екологічної безпеки, особливо актуальну в умовах воєнних дій. Вона забезпечує автоматичний збір у реальному часі даних із сенсорів (тепло, електроенергія, вода, мікроклімат, якість повітря), а також тепловізорів і дронів для виявлення дефектів і зон підвищених втрат енергії, з подальшою обробкою в хмарному хабі системою ШІ, що виявляє нераціональні режими, прогнозує аварії та оцінює ризики залежності від зовнішнього енергопостачання.

Особливістю системи є здатність оперативно пропонувати термінові й стратегічні дії (утеплення, перемикання на резервні джерела, модернізація систем, розвиток локальної генерації) з оцінкою їх економічної, енергетичної та екологічної ефективності, орієнтуючись на максимальну автономність будівель. Використання штучного інтелекту забезпечує швидкий аналіз великих обсягів даних, виявлення загроз і пошкоджень інфраструктури, моделювання сценаріїв подій і підтримку прийняття рішень у реальному часі для мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій.

Механізм роботи системи моніторингу передбачає послідовну інтеграцію в існуючий житловий і громадський фонд. На першому етапі встановлюються сенсорні вузли обліку та контролю, під'єднуються до цифрового хаба з можливістю збору великих даних. У разі воєнних дій або екстрених змін система переходить у спеціальний режим, концентруючи управління на локальній автономності, оперативному перерозподілі ресурсів та запуску резервних систем. Штучний інтелект автоматично ранжує всі проблеми за критичністю, моделює довгостроковий екологічний

вплив та розраховує ресурсні потреби для їх усунення. Безперервний моніторинг забезпечує адаптацію до змін клімату, ресурсу, законодавства чи доступності матеріалів.

Важливою деталлю інтегрованого моніторингу є можливість автоматичного зв'язку між будівлями – IP-маршрутизація дозволяє створити єдину мережу обміну алгоритмічними компромісами та оптимізаціями між спорудами громади, формуючи децентралізовану smart-grid і екозахисні сценарії. У підсумку це забезпечує суттєве скорочення втрат енергії та ресурсів, мінімізує екологічний слід навіть у невизначених умовах, гарантує енергетичну автономію і гнучкість системи реагування на надзвичайні події. Місто чи громада отримує потужний інструмент кризового менеджменту, підвищеного енергоменеджменту й цифрового екологічного захисту, що ідеально підходить для сучасних українських реалій та сценаріїв розвитку.

Запропоновану структуру роботи системи моніторингу на базі штучного інтелекту в сфері реагування на надзвичайні ситуації зображено на рис. 3.4.

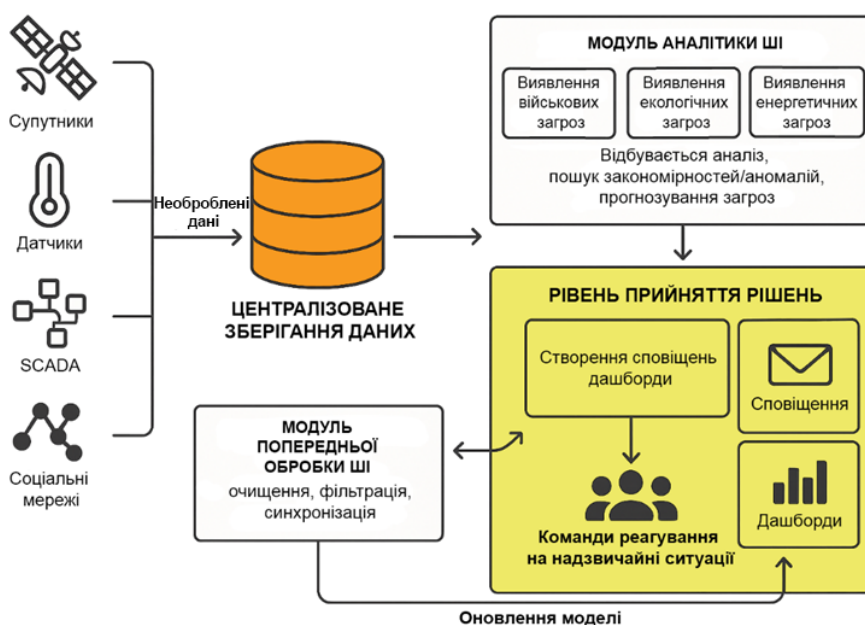


Рис. 3.4. Структура роботи системи моніторингу на базі штучного інтелекту в сфері реагування на надзвичайні ситуації

У системах штучного інтелекту для детекції загроз інформація надходить з різних джерел: для військових ризиків використовують супутникові зображення, дані радарного моніторингу, перехоплення комунікацій і відкриті аналітичні бази (OSINT); для екологічних – сенсорні мережі стану середовища, метеоінформацію, проби води і ґрунту; для енергетичних – сигнали датчиків, SCADA і реєстри промислових систем. Всі ці потоки об'єднуються у захищеному цифровому сховищі чи хмарній системі, надходячи у режимі реального часу.

ШІ отримує безперервний потік даних: температуру, вологість, витрати енергії, стан вузлів та обладнання. Система автоматично аналізує отримані сигнали, проводить розрахунок енергетичних втрат і екологічного сліду, враховуючи регламентовані норми та математичні моделі для кожного типу будівлі і стану навколишнього середовища. На цьому етапі дані проходять очистку: алгоритми прибирають «шум», нормалізують формати, синхронізують часові й просторові ознаки, перевіряють достовірність і виключають дублікати. Особливість полягає у тому, що ШІ співставляє поточну інформацію із типовими сценаріями дефектів та аварій.

Цей організований масив надсилається у блок машинного навчання, де ШІ моделі знаходять закономірності чи аномальні сигнали, коригують прогнози, виконують комплексну інтеграцію різних типів даних (наприклад, пов'язують військову активність з аваріями у енергетиці та негативними змінами довкілля).

Сформовані прогнози й ризикові оцінки передаються до системи прийняття рішень. Тут оператори, кризові штаби чи адміністративні служби отримують автоматизовані або інтерактивні підказки щодо дій: запуск резервного живлення, проведення евакуації, оповіщення населення, мобілізацію служб реагування. Інтерфейс надає зручні дашборди та сценарії плану дій. Система фіксує зворотній зв'язок, аналізує ефективність реакції, автоматично адаптує свої моделі відповідно до нових ситуацій. Усі

інформаційні канали працюють на основі API із наскрізним журналюванням подій та захищеними процедурами автентифікації.

Як тільки знаходиться зона з критичною вразливістю або неефективністю, автоматизований інтелект формує оператору чіткий перелік корекційних дій – наприклад, утеплити фасад, замінити вікна, оптимізувати режим роботи опалення чи вентиляції, перемикнути на резервне джерело енергії, виконати локальні реконструкції або відключити аварійний вузол. Для кожної рекомендації надається кількісна оцінка енергетичного й екологічного ефекту, що дозволяє приймати обґрунтовані управлінські рішення навіть у складних або екстремальних умовах, таких як воєнні загрози чи дефіцит ресурсів.

Після виконання запропонованих дій система автоматично фіксує нові дані, проводить повторні розрахунки і, у разі необхідності, знову пропонує оптимізацію – цикл повторюється до досягнення нормативних показників з мінімальними витратами ресурсів. Останній етап – інтеграція окремих будівель у кооперативну smart-grid. Це дає змогу спорудам обмінюватися енергетичними даними та рішеннями напряму, підтримувати гнучкість та швидко адаптуватися до змін зовнішнього середовища, регулювати розподіл енергії й мінімізувати екологічний слід для усієї громади.

Така система моніторингу, побудована на основі сучасних цифрових та аналітичних рішень, забезпечує оператору чіткі, науково-обґрунтовані сценарії оптимізації, дозволяє підвищити енергоефективність, зменшити екологічне навантаження, зберігаючи життєздатність будівель. Сучасне застосування штучного інтелекту у сфері реагування на військові та екологічні загрози демонструє суттєвий прорив у підвищенні стійкості громад. Об'єднуючи в єдине ціле військову, інженерну та екологічну аналітику, ШІ моделює різні сценарії розвитку кризових подій, оптимізує реагування служб, пропонує сценарії евакуації й відновлення, дає можливість приймати рішення на основі доказових прогнозів, а не припущень. Це формує нову якість менеджменту непередбачених ситуацій:

надзвичайна подія більше не застає зненацька – автоматизований аналіз дозволяє заздалегідь передбачити ланцюг негативних впливів та мінімізувати загрози для людей і довкілля. Унікальною перевагою є і те, що ШІ може постійно вдосконалювати власні моделі завдяки зворотному зв'язку з реальними результатами реагування – таким чином якість прогнозів і рішень лише зростає з часом.

Система органічно інтегрується у модель захисту та розвитку не тільки окремих багатоповерхових будівель, а й цілих громад. Вона формує надійну платформу для впровадження сучасних інновацій і сталого розвитку в державному та муніципальному управлінні, навіть в умовах обмежених матеріальних ресурсів та потреби в автономності. Це оптимальне рішення для тих громад, які прагнуть посилити свою стійкість і безпеку, зберегти життєздатність і екологічну збалансованість у період нестачі кваліфікованих працівників, криз і ринкових трансформацій.

3.6. Цифрове дослідження проблемних ділянок будівлі

Цифрове дослідження теплопередачі й теплових потоків у вузлах будівлі дає можливість побачити те, чого не видно в класичних спрощених розрахунках, оскільки дозволяє детально оцінити проходження тепла через стики стін, перекриттів, віконних рам, балконних плит і зон примикань, тобто через потенційні «містки холоду», що найчастіше недооцінюються в одновимірних методиках. Для енергетичного паспорта це дало можливість точніше визначити реальні тепловтрати будівлі, уточнити значення приведених коефіцієнтів теплопередачі огорожувальних конструкцій з урахуванням містків холоду, скоригувати річний енергетичний баланс і, відповідно, клас енергоефективності.

У той час, коли тепловізор показує фактичну картину на об'єкті (зони втрат, промерзання, конденсацію), побудовані чисельні моделі вузлів пояснюють причини цих явищ і дозволили змодельовати альтернативні

конструктивні рішення, зміну типу або товщини утеплювача, геометрії вузла чи додаткових прошарків, щоб побачити, як зміняться температурні поля й теплові потоки. Завдяки цьому зростає достовірність енергетичного паспорта, зменшується розрив між розрахунковими та фактичними показниками, можна виявити проблемні ділянки, що важко виявити тепловізійними обстеженнями, а також з'являється можливість обґрунтувати заходи термомодернізації саме в проблемних вузлах.

У процесі цифрового дослідження панельної житлової будівлі №3 ЖК «АРТ–квартал Співоче» в місті Київ на основі зібраних даних створено цифрову модель будівлі, де візуалізовано проблемні зони, що потребують уваги. При детальнішому огляді моделі було виявлено місця в кутових зонах будівлі з найбільшими тепловтратами, що не були виявленими при візуальному огляді. До цих місць належать з'єднання стінових панельних елементів між собою, з конструкцією лоджій, фундаменту, перекриття та покриття.

3.6.1. Цифрове дослідження двовимірних вузлових моделей

Фрагменти плану, вузли та перерізи цих зон представлені у додатку Д. Стінова конструкція включає такі шари: внутрішня штукатурка завтовшки 15 мм, залізобетонна панель товщиною 160 мм, теплоізоляційний шар з мінеральної вати 150 мм і зовнішня штукатурка 20 мм. Дані про будівлю та конструкцію вузлів на рис. Д.1 – Д.5 (додаток Г).

Розрахунок температурного поля стін при з'єднанні між собою здійснений для вузлів 1–4. Результати дослідження у програмі ТЕРМ 6 наведені у додатку Д. Згідно отриманих даних у вузлі №2 найнижча температура на внутрішній поверхні в кутовій зоні дорівнює 13,1 °С, у вузлі №3 відповідно 17,6 °С. У вузлі №4 температура дорівнює 14,4 °С. Дані показники відповідають межах норм, згідно ДБН В.2.6–31:2021 [86].

Також розрахунок показав, що у вузлі №1 потрібно передбачити додаткове утеплення стін лоджії з метою забезпечення нормативної температури всередині приміщень. Із конструктивним утепленням температура поверхні внутрішнього кута приміщень складає $14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а без відповідного утеплення, температура була б знижена до $9,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, що не відповідає нормативним вимогам. Порівняння різниці конструктиву наведено на рис. 3.5 і рис. 3.6.

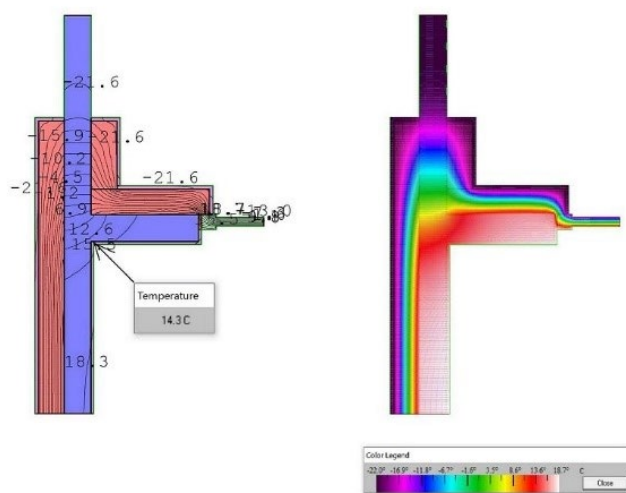


Рис. 3.5. Температурне поле вузла № 1 з додатковим утепленням (вид зверху)

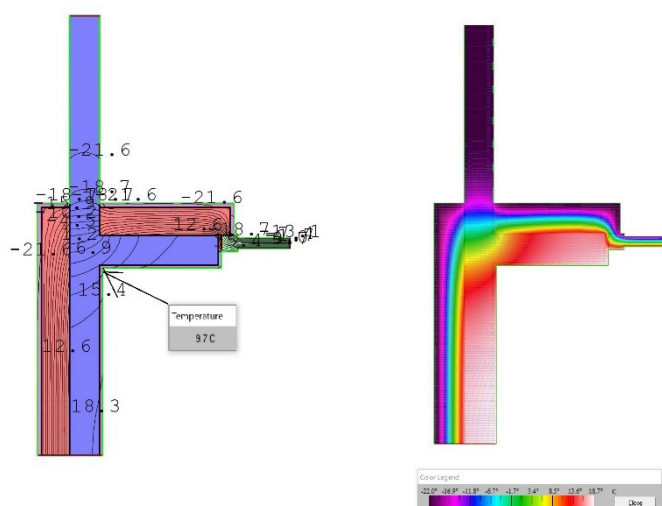


Рис. 3.6. Температурне поле вузла № 1 без додаткового утеплення (вид зверху)

У вузлі №5 найнижча температура внутрішньої поверхні в кутовій зоні дорівнює 14,2 °С, а у вузлі № 6 – 19,8 °С. Це відповідає нормативним вимогам. Втім у вузлі № 9 температура внутрішньої поверхні в кутовій зоні становить 10,2 °С, що нижче мінімально допустимого значення (10,7 °С).

В результаті таких розрахунків для вузлів № 8 і № 9 для даного об'єкту необхідно здійснити додаткове утеплення підвалу та парапету по периметру покриття. Це рішення дозволить підвищити температуру до нормативного рівня.

3.6.2. Визначення приведених опорів теплопередачі вузлів

При дослідженні кутових зон будівлі важливою характеристикою є приведені опори теплопередачі вузлів. Вони показують, наскільки добре конкретний вузол (стик стіна–перекриття, рама–відкос, балконний вузол тощо) реально чинить опір проходженню тепла з урахуванням усіх містків холоду. Це дає змогу оцінити не «ідеальну» стіну по шаровому складу, а фактичну теплотехнічну поведінку конструкції з анкерами, ребрами, консолями, монолітними включеннями та іншими елементами, через які йдуть додаткові втрати.

Приведені опори теплопередачі вузлів визначені за допомогою програмного комплексу ТЕРМ 6 через отримані коефіцієнти теплопровідності U-Factors. Для вузла № 1 отримані коефіцієнти теплопровідності наведені на рис. 3.9.

	U-factor W/m ² K	delta T C	Length mm	Rotation	
наружная поверхность	0.2802	42.0	4716.5	N/A	Total Length
внутренняя стена	0.6277	42.0	2105.5	N/A	Total Length
% Error Energy Norm					6.47%

Рис. 3.9. Отримані коефіцієнти теплопровідності (U-Factors)
для вузла №1

При різниці температур в 1°C через кожен квадратний метр зовнішньої поверхні проходить 0,2802 Вт тепла. Враховуючи, що площа зовнішньої поверхні становить 4,7165 м² (при умовній довжині вузла 1 м), а різниця температур дорівнює 42°C, загальна кількість теплоти, що передається через вузол, становить: 0,2802 · 4,7165 · 42 = 55,5 Вт.

Через внутрішню стіну пройде 0,6277 · 2,1055 · 42 = 55,5 Вт.

Приведені опори теплопередачі крайових ділянок:

$$\text{Для стіни: } R_{ст} = \frac{1}{0,6277} = 1,593 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Визначені коефіцієнти теплопровідності для решти вузлів наведено на рис. Д.11.

Результати розрахунку приведенного опору та порівняння цих показників з нормативними занесено у зведену таблицю 3.7, яка свідчить, що приведені опори теплопередачі відповідають нормативним вимогам.

Таблиця 3.7

Приведені опори теплопередачі крайових ділянок

№ Вузла	Стіна		Перекрыття	
	Приведений опір $R_{ст}$, м ² ·К/Вт	Відповідність $R_{qmin} = 0,6-0,8$ м ² ·К/Вт	Приведений опір $R_{пер}$, м ² ·К/Вт	Відповідність $R_{qmin} = 0,7-0,9$ м ² ·К/Вт
1	1,593	так	–	–
2	1,721	так	–	–
3	1,763	так	–	–
4	2,010	так	–	–
5	2,269	так	2,375	так
6	8,880	так	9,708	так
7	4,189	так	17,574	так
8	1,778	так	1,787	так
9	1,008	так	1,655	так
10	1,497	так	3,142	так

3.6.3. Дослідження теплообміну конструкцій у 3D-моделях

Найскладніші вузли будівлі розглянули у 3D моделюванні за допомогою програми TEMPER 6.14. Кутовий вузол, позначений на

фрагменті плану типового поверху як вузол № 1, з урахуванням нижнього поверху формується із шести стінових панелей та двох плит перекриття. Вузол під номером № 4, відповідно до плану, складається з восьми стінових панелей та чотирьох плит перекриття, якщо враховувати нижній рівень. Для всебічного аналізу теплового стану цих вузлів, які мають складні теплофізичні характеристики, були створені їхні тривимірні моделі. В ході розрахунків визначено мінімальні температури внутрішніх поверхонь у місцях стику елементів на двох рівнях будівлі. Візуалізація тривимірних моделей, використаних для аналізу, наведена на рис. 3.10, а отримані результати дослідження – на рис. 3.11 і рис. 3.12.

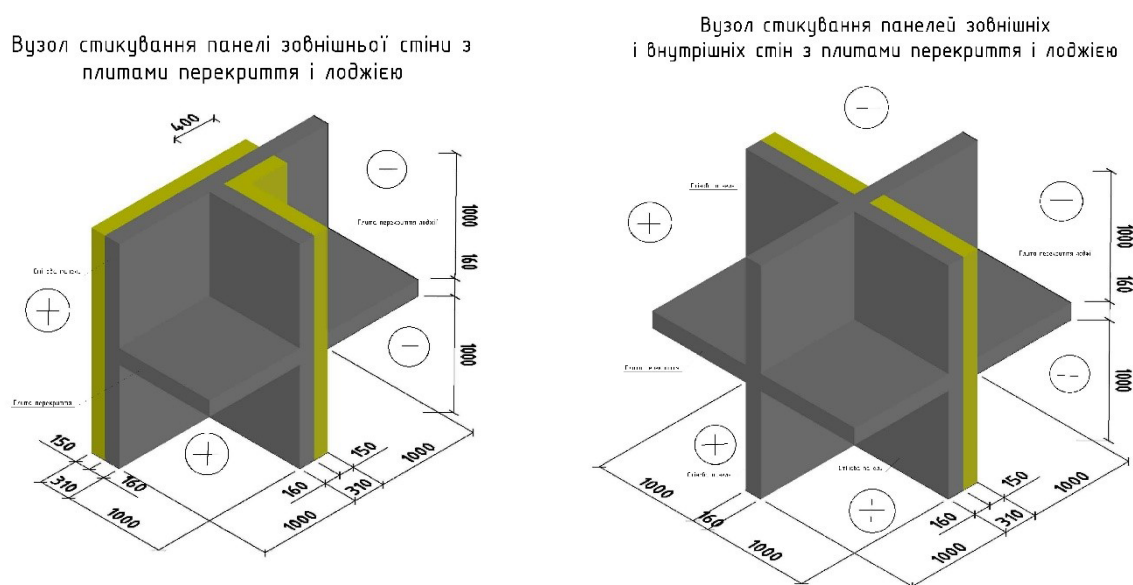


Рис. 3.10. Загальні 3D-моделі вузлів № 1 і № 4 у зоні плити перекриття

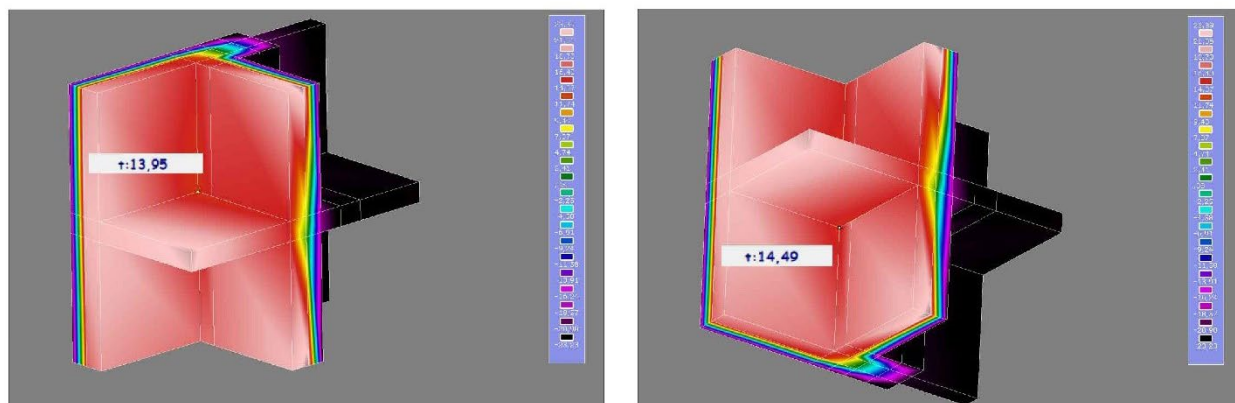


Рис. 3.11. Температурне поле тривимірної моделі вузла № 1 у зоні плити перекриття

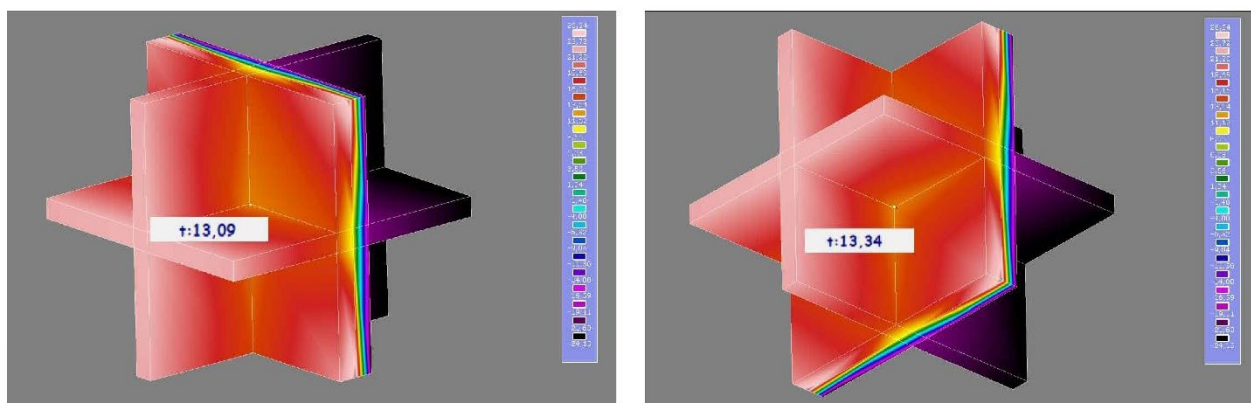


Рис. 3.12. Температурне поле тривимірної моделі вузла № 4 у зоні плити перекриття

У кутовому вузлі №1 найнижча температура внутрішньої поверхні у зоні стику на нижньому поверсі становить 14,49 °С, тоді як на верхньому – 13,95 °С. Для вузла №4 відповідні температурні показники становлять 13,34 °С на нижньому поверсі та 13,09 °С на верхньому. Це відповідає вимогам.

Також було проведено аналіз вузлів №1 та №4 на рівні монтажу плити покриття. Візуалізація тривимірних моделей, використаних для аналізу, наведена на рис. 3.13, а отримані результати дослідження – на рис. 3.14.

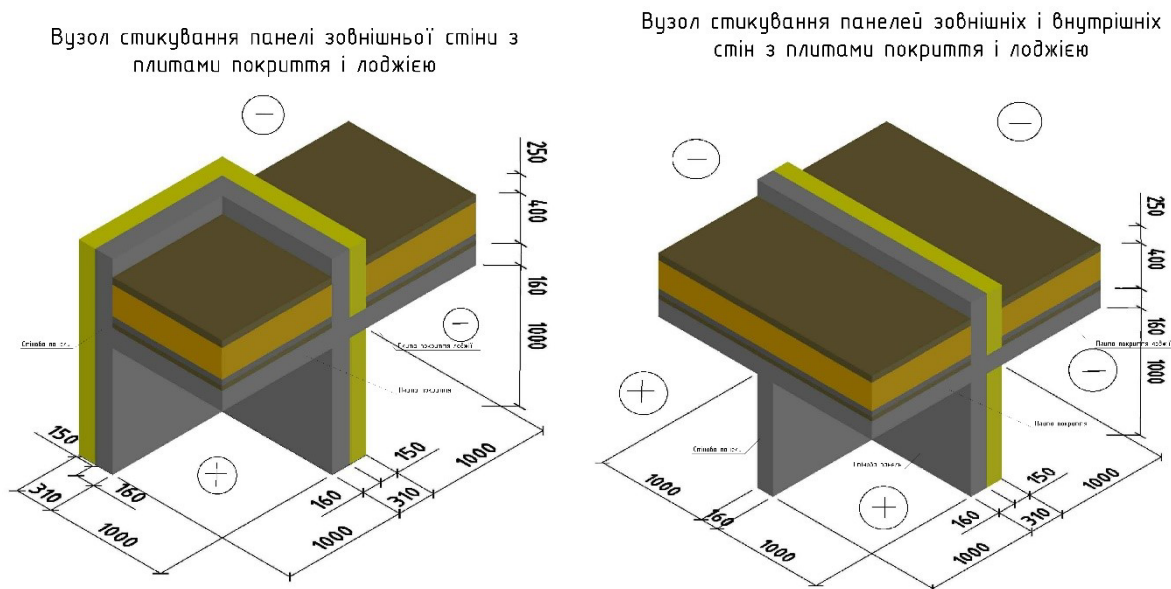


Рис. 3.13. Загальні 3D–моделі вузлів № 1 і № 4 у зоні плити покриття

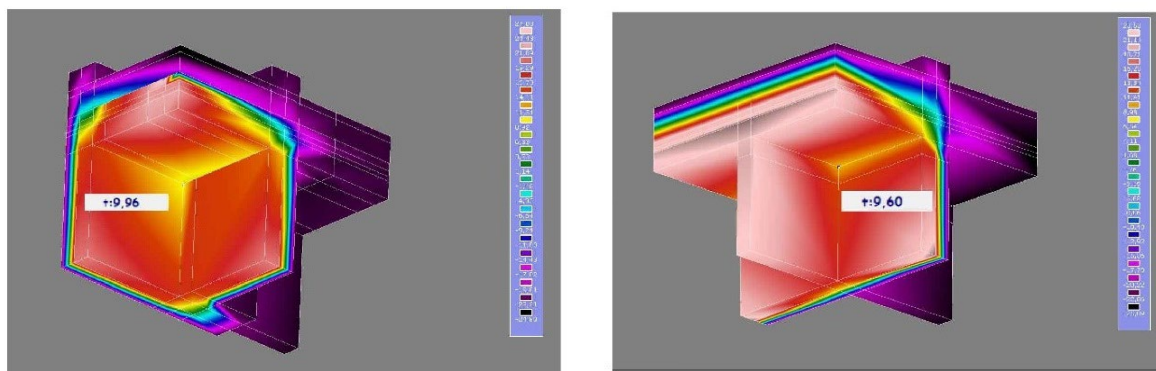


Рис. 3.14. Температурні поля тривимірних моделей вузлів № 1 і № 4 у зоні плити покриття

Розрахунки показали наявність зон із зниженими температурами внутрішньої поверхні. Зокрема, для вузла №1 температура становить 9,96 °С, а для вузла №4 – 9,60 °С, що є нижчим за точку роси і не відповідає нормативним вимогам. Через недостатню теплоізоляцію у швах і парапетах відбувається інтенсифікація утворення конденсату: різниця температур сприяє накопиченню вологи у матеріалах, що з часом провокує корозію металевих елементів і руйнування будівельних матеріалів, особливо в місцях стиків. Тривалий вплив конденсації на будівельні конструкції знизить їх міцність, скоротить термін служби і вимагатиме додаткових ресурсів на ремонти та реконструкцію, що не відповідає принципам екологічного управління ресурсами та сталого будівництва.

Після комплексної оцінки 3D-моделей вузлів з'ясовано, що вузол стикування стін з плитами покриття та парапету не відповідає вимогам, як і в попередньому 2D розрахунку. Рекомендовано збільшити товщину теплоізоляції покриття та додатково передбачити утеплення парапету для забезпечення енергоефективності даху будівлі.

Завдяки комплексності досліджень, такий підхід здатний поєднати, теплотехнічні розрахунки, енергетичні паспорти, системи моніторингу, енергетичні етикетки та аналітичні програмні інструменти, що відповідає сучасним принципам управління енергетичними ресурсами. Саме тому

такий підхід рекомендовано у якості основи для формування політики й практики енергоменеджменту в умовах відбудови та модернізації. Інтеграція даних про фактичне споживання, стан огорожувальних конструкцій, роботу інженерних систем і виявлені дефекти дає змогу своєчасно ідентифікувати надмірні тепловтрати та цілеспрямовано усувати їх через термомодернізацію, оптимізацію режимів експлуатації та впровадження енергоефективних рішень.

3.7. Розрахунки екологічних показників будівлі

Розрахунок екологічної стійкості будівлі є важливим на всіх етапах її життєвого циклу — від проектування до експлуатації та демонтажу. Наприклад такі системи оцінювання, як BREEAM, дозволяють комплексно врахувати енергоефективність, використання води, вплив на клімат, якість внутрішнього середовища, матеріали та управління відходами.

За результатами паспорту енергоефективності пропонується розраховувати деякі екологічні експлуатаційні показники, наприклад, вуглецевий слід та кількість втіленої енергії. У житловому комплексі «АРТ квартал СПВОЧЕ» теплопостачання організоване через автономну будинкову котельню, яка забезпечує опалення та гаряче водопостачання для всіх секцій комплексу. Котельня розташована окремо на території комплексу та працює на газі. При спалюванні природного газу виділяється в середньому $0,185 \text{ кг CO}_2 / 1 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Це значення наведено у матеріалах Carbon Independent (Велика Британія), яке посилається на офіційні дані UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS) та Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Згідно з цими джерелами, при спалюванні природного газу викиди становлять $0,185 \text{ кг CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{год}$, що відповідає співвідношенню енергоємності газу ($\sim 11,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$) та питомим викидам $\text{CO}_2 \approx 2,05 \text{ кг}/\text{м}^3$ природного газу. Також це відповідає розрахунковими таблицями Держстату.

Річне енергоспоживання визначається згідно методики розрахунку енергоефективності [118] за наступною формулою:

$$E_{\text{рік}} = \frac{Q_{\text{заг}}}{A}, \quad (3.28)$$

де $E_{\text{рік}}$ – річне (питоме) енергоспоживання на 1 м² (кВт·год/м²·рік); $Q_{\text{заг}}$ – загальне річне енергоспоживання (кВт·год на рік); A – опалювана площа будівлі (м²). Енергоспоживання зазвичай більше за енергопотребу будівлі, оскільки тут присутні витрати енергії з джерела енергії на шляху до будівлі. В середньому цей показник більший на 3 – 38%, візьмемо 20%.

$$E_{\text{рік}} = \frac{103052,28 + 103052,28 \cdot 0,2}{233,356} = 529,93 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \cdot \text{рік},$$

За ДСТУ–Н Б А.2.2–13:2015 цей показник використовується для сертифікації енергоефективності та порівняння з нормативами сучасних будівель.

Річні викиди CO₂ розраховано за формулою:

$$\text{Викиди } CO_2 = E_{\text{рік}} \cdot K_{\text{викидів}}, \quad (3.29)$$

де $K_{\text{викидів}}$ – коефіцієнт викидів CO₂.

$$(103052,28 + 103052,28 \cdot 0,2) \cdot 0,185 = 22877 \text{ кг } CO_2,$$

Річний (питомий) обсяг викидів CO₂ на 1 м²:

$$529,93 \cdot 0,185 = 98,03 \text{ кг } CO_2 / \text{м}^2 \cdot \text{рік},$$

Вуглецевий слід для опалення становить близько 22877 кг CO₂ (22,87 т CO₂), або 98,03 кг CO₂/м²·рік. Це орієнтовно відповідає показникам звичайних, старих будівель із середнім рівнем викидів CO₂, натомість сучасні енергоефективні та пасивні споруди мають цей показник значно нижче (до 50 кг CO₂/м²·рік і менше).

При розрахунку втіленої енергії для багатоповерхової панельної будівлі ми взяли концентрації площ, товщин і типів основних будівельних матеріалів, які характерні для її конструкції: зовнішні стіни, додатковий бетонний шар, мінераловатний утеплювач, декоративна штукатурка. Для кожної групи пораховано об'єм матеріалу, отриманий як добуток площі на товщину шару, після чого цей об'єм помножено на орієнтовний питомий

показник втіленої енергії для відповідного матеріалу згідно з галузевими LCA–довідниками й науковими оглядами (1700 МДж/м³ для бетону, 1500 МДж/м³ для мінераловати, 1200 МДж/м³ для штукатурки). Далі отримані величини підсумовані, до цієї суми додано 10% на транспортування і монтаж (конструктивно–технологічні витрати). Загальний підсумок поділено на кондиціоновану площу будівлі – тобто фактичну площу об’єкта, яка обігривається й використовується. Така методика відповідає сучасним вимогам ДСТУ 9190:2022 по енергоефективності будівель і міжнародним нормативам щодо оцінки LCA–індикаторів життєвого циклу споруди. [76, 98, 131]. Весь процес розрахунку втіленої енергії здійснюється поетапно для кожного основного конструктивного матеріалу та їх шару.

Наприклад для зовнішніх стін обрахунок виглядає наступним чином:

1. Об’єм кожного матеріалу визначається як добуток площі відповідної огорожувальної конструкції на товщину шару:

$$V = A \cdot \delta , \quad (3.30)$$

де V – об’єм матеріалу (м³), A – площа конструкції (м²), δ – товщина шару (м).

2. Втілена енергія для кожного конструктивного матеріалу розраховується як:

$$E = V \cdot e_{\text{мат}} , \quad (3.31)$$

де E – втілена енергія конкретного матеріалу (МДж), $e_{\text{мат}}$ – питомий показник втіленої енергії для матеріалу (МДж/м³).

3. Для шарів, що розраховуються у перерахунку на площу (наприклад, вікна), орієнтовний показник дається одразу на 1 м²:

$$E_{\text{скло}} = A_{\text{скло}} \cdot e_{\text{скло}} , \quad (3.32)$$

де $A_{\text{скло}}$ – площа склопакетів, $e_{\text{скло}}$ – питомий коефіцієнт втіленої енергії для 1 м² скляної конструкції.

4. Загальна втілена енергія для всіх конструктивних елементів підсумовується:

$$E_{\text{заг}} = \sum (E_{\text{бетон}} + E_{\text{утепл}} + E_{\text{штукатурка}} + E_{\text{скло}}) , \quad (3.33)$$

5. На етапі монтажу, доставки, будівельних робіт додається 10% до суми для врахування логістичних втрат і додаткових енерговитрат:

$$E_{\text{повн}} = E_{\text{заг}} \cdot 1,1, \quad (3.34)$$

6. Щоб отримати інтегральний показник на 1 м² будівлі, загальна сума ділиться на кондиціоновану площу (1 м³ при діленні на об'єм):

$$E_{1 \text{ м}^2} = \frac{E_{\text{повн}}}{A_{\text{конд}}}, \quad (3.35)$$

де $A_{\text{конд}}$ – кондиціонована площа, тобто площа ефективного використання.

Цей підхід відповідає методологіям LCA для об'єктів нерухомості та затвердженим ДСТУ й європейським розрахунковим підходам.

Для площ стін будівлі 1264,018 м² (зовнішні стіни) остаточний показник втіленої енергії буде становити приблизно 2987,7 МДж/м³.

Спочатку обчислюються об'єми матеріалів:

Об'єм для кожного шару стіни:

$$V_{\text{бетон}} = 754,61 \times 0,16 = 120,74 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{мінераловата}} = 754,61 \times 0,15 = 113,19 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{декор зовн.}} = 754,61 \times 0,02 = 15,09 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{декор внутр.}} = 754,61 \times 0,015 = 11,32 \text{ м}^3$$

Згідно з галузевими джерелами використовуються такі питомі показники втіленої енергії для матеріалів:

$$\text{залізобетон: } e_{\text{бетон}} \approx 4000 \text{ МДж/м}^3,$$

$$\text{мінераловата: } e_{\text{мінераловата}} = 1700 \text{ МДж/м}^3,$$

$$\text{декоративна штукатурка (обидва шари): } e_{\text{штукатурка}} = 1200 \text{ МДж/м}^3.$$

Втілена енергія для кожного шару:

$$E_{\text{бетон}} = 120,74 \times 4000 = 482960 \text{ МДж};$$

$$E_{\text{мінераловата}} = 113,19 \times 1700 = 192423 \text{ МДж};$$

$$E_{\text{декор зовн.}} = 15,09 \times 1200 = 18108 \text{ МДж};$$

$$E_{\text{декор внутр.}} = 11,32 \times 1200 = 13589 \text{ МДж};$$

Сумарна втілена енергія для всіх шарів

$$E_{\text{сума}} = 482960 + 192423 + 18108 + 13589 = 707080 \text{ МДж}$$

Додаємо 10% на транспортування й монтаж:

$$E_{\text{повна}} = 707080 \times 1,1 = 777788 \text{ МДж}$$

Після ділення на об'єм матеріалу:

$$E_{1 \text{ м}^2} = \frac{777788}{260,34} \approx 2987,7 \text{ МДж/м}^2$$

Таким чином, можна розрахувати інтегральний показник втіленої енергії на 1 м³ цієї будівлі з урахуванням детальної конструкції стіни. Отримані екологічні показники (2988 МДж/м³ для конструкції залізобетонної плити, утеплювача та штукатурки) дозволяють віднести нашу будівлю до звичайного типу, оскільки вони відповідають показникам життєвого циклу сучасних стандартних будівель без цілеспрямованої оптимізації екологічного сліду.

Таким чином, застосування WLCA, та і взагалі орієнтування на критерії BREEM дає можливість раціонально обґрунтувати інженерні та управлінські рішення, щоб вони відповідали принципам сталого розвитку. За цією методикою можна розрахувати екологічні показники, які є складовими загальної оцінки життєвого циклу будівлі.

3.8. Порівняння показників життєвого циклу будівель

На різницю в ключових показниках ефективності будівель впливають військові загрози, які призводять до пошкоджень конструкцій, підвищених ризиків для мешканців, збільшення витрат на ремонт і необхідності проєктування додаткових захисних систем. Енергоефективні та адаптовані будівлі мають резервні системи енергопостачання, враховують необхідність укриттів і посиленних конструкцій, що забезпечує кращу стійкість, знижує як економічні, так і екологічні втрати у разі надзвичайних ситуацій.

Проведено порівняння показників життєвого циклу звичайної та енергоефективної, адаптованої до військових загроз будівель. Насамперед

порівнюють тривалість життєвого циклу будівель, що визначають на основі відповідних будівельних стандартів та галузевих досліджень. Тривалість життєвого циклу будівлі визначають на основі комплексу даних, які базуються на основному матеріалі несучих конструкцій (бетон, цегла, газобетон тощо) та його гарантійному строку служби. Також включають до розрахунку додаткові конструктивні елементи (фасади, перекриття), враховують термін їх експлуатації згідно з виробничими паспортами або стандартами. Коригують термін залежно від умов використання: якість будівництва, якість обслуговування, типових навантажень, кліматичних умов, організації захисту від надзвичайних ситуацій, регулярність технічного обслуговування. Для енергоефективних об'єктів враховують переваги систем утеплення, резервного енергопостачання, підвищену герметичність і адаптацію до сучасних стандартів.

Середньозважені показники тривалості життєвого циклу становлять 60–100 років для енергоефективної адаптованої будівлі та 40–60 років для звичайної будівлі. Дані взяті з сучасних стандартів та аналітичних матеріалів щодо проектування й експлуатації житлових споруд. Зокрема, вони ґрунтуються на положеннях ДСТУ ISO 15686–1 і ДСТУ ISO 15686–5 [100]. Також вони підтверджені в монографіях і офіційних документах з аналізу функціонування житлових споруд.

Показники річного енергоспоживання енергоефективної будівлі зазвичай на рівні 35–70 кВт·год/м²·рік, а для традиційних будівель цей показник становить близько 120–250 кВт·год/м²·рік. Такі дані базуються на сучасних вимогах та практиці впровадження енергоощадних технологій в Україні з розрахунками LCA (оцінці життєвого циклу).

Витрати на експлуатацію, ремонти та утримання, а також на утилізацію зазначено згідно аналітичних публікацій з оцінки життєвого циклу, враховуючи усереднені видаткові статті для багатоквартирних будинків в умовах України [109]. Річні експлуатаційні витрати для енергоефективної адаптованої будівлі становлять – 60–120 грн/м², звичайної

будівлі – 160–260 грн/м². Витрати на утилізацію для енергоефективної адаптованої будівлі становлять – 60–140 грн/м², звичайної будівлі – 130–200 грн/м².

Однак, у зв'язку із військовими загрозами передбачено додаткові витрати на адаптацію будівель. Адаптовані будівлі мають показники витрат близько 130–400 грн/м² (резервні джерела енергії, укриття тощо), але їхній показник стійкості значно вищий порівняно із звичайними будівлями. Додаткові витрати на захист (укриття, резервне енергоживлення і т.п.) включено згідно з аналітичними оглядами щодо проектування будівель для ризикових територій та поточних методичних рекомендацій щодо захисту громадської інфраструктури в умовах війни [127].

Типові показники викидів CO₂ у період експлуатації для сучасних житлових будівель в Україні (розраховано на 1 м² на рік) для енергоефективної і звичайної будівлі становлять відповідно 50–90 кг CO₂/м²·рік і 160–250 кг CO₂/м²·рік. Показники викидів CO₂ для енергоефективних і звичайних будівель у період експлуатації взяті з методичних рекомендацій Міністерства захисту довкілля та «Посібника з оцінки викидів парникових газів» 2025 року. Значення річного споживання для різних типів будівель взято з галузевих аналізів [132].

Показники втіленої енергії для звичайних будівель на основі цегли чи панелей встановлено на рівні – 2000–2700 МДж/м² (орієнтовно 550–750 кВт·год/м²) для усього життєвого циклу конструкцій. Для сучасних будівель на основі газобетону цей показник становить 769–1019 МДж/м² [109].

Частки матеріалів придатних до повторного використання та частки відходів відрізняються у таких будівлях близько у половину. Частка матеріалів, придатних до повторного використання для енергоефективних адаптованих будівель можна прийняти на рівні 70–80%, для звичайних на рівні 30–40%. У той же час частка відходів лежить у межах 5–10% і 30–40% відповідно. Це обґрунтовано тим, що у енергоефективних будівлях використовуються переважно сучасні конструкційні рішення та екологічно

орієнтовані матеріали, які полегшують демонтаж і забезпечують можливість максимальної переробки або повторного використання (метал, дерево, вторинний бетон, модульні системи тощо). Низький рівень утворення відходів під час утилізації забезпечується впровадженням принципів циркулярної економіки, вибором матеріалів зі стандартною можливістю роздільного збору, фіксацією у проєктах маркування компонентів, що підлягають повторній експлуатації. У звичайних будівлях (особливо масового радянського та пострадянського житлового фонду) значна частина матеріалів під час знесення чи ремонту утилізується як будівельні відходи, оскільки старі конструкції складно розділяти або повторно використовувати, а багато матеріалів є змішаними, мають домішки, що не дозволяє організувати переробку на високому рівні. Саме тому питома частка реально корисної вторинної сировини там є нижчою, а рівень відходів – суттєво більший.

Показник екологічного сліду будівлі базується на положеннях LCA (Life Cycle Assessment) і сучасних аналітичних дослідженнях, таких як звіти з ресурсо– й енергоефективності будівель. Під екологічним слідом у цьому контексті розуміється сукупний вплив будівлі на довкілля протягом усього життєвого циклу – від видобування і виробництва будматеріалів, транспортування і зведення до експлуатації, ремонтів, утилізації та потенційного повторного використання компонентів після знесення.

У розрахунку цього показника враховують:

- Викиди парникових газів (CO₂ та інші) на всіх етапах життєвого циклу.
- Втілену енергію, тобто енерговитрати на первинне виробництво, доставку і монтаж матеріалів.
- Кількість матеріальних відходів під час знесення чи капітального ремонту та частку тих, що можуть бути безпечно перероблені або знову використані.
- Споживання води та утворення стічних вод упродовж експлуатації.

- Потенційну токсичність і забруднення довкілля при виробництві й утилізації матеріалів.

Розглянуті показники життєвого циклу будівель зведено у порівняльній таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Порівняння показників життєвого циклу для енергоефективних та звичайних будівель

Показник	Енергоефективна, адаптована будівля	Звичайна будівля
1	2	3
Тривалість життєвого циклу (розрахункова)	60–100 років	40–60 років
Середнє річне енергоспоживання	35–70 кВт·год/м ² ·рік	380–500 кВт·год/м ²
Річні експлуатаційні витрати	60–120 грн/м ²	160–260 грн/м ²
Втілена енергія будівництва	769–1019 МДж/м ² (газобетон)	2000–2700 МДж/м ² (цегла, панелі)
Викиди CO ₂	50–90 кг/м ²	160–250 кг/м ²
Екологічний слід	–40%...–94% від традиційної будівлі	базовий рівень
Частка матеріалів, придатних до повторного використання	70–80%	30–40%
Обсяг регулярних ремонтів	1 раз на 10–15 років	1 раз на 5–10 років
Витрати на ремонт і відновлення	Скорочені на 35–40%	Високі, регулярні реконструкції
Витрати на утилізацію	60–140 грн/м ²	130–200 грн/м ²
Частка матеріальних відходів під час утилізації	5–10%	30–40%
Енергонезалежність (власне живлення, ВДЕ)	25–40% від потреб автономно	<5%
Додаткові витрати на захист	130–400 грн/м ² (резервні, укриття тощо)	майже нуль
Стійкість до зовнішніх впливів (військових, кліматичних)	Висока – відновлення функцій за 72 год.	Низька – потребує централізованого живлення

Усі ці компоненти агреговано для інтегральної оцінки ступеня впливу тієї чи іншої споруди на довкілля порівняно з альтернативною (традиційною чи енергоефективною) будівлею.

Сьогодні військові загрози суттєво впливають на експлуатацію і стійкість міського середовища, тож цілком природно враховувати їх у

сучасних підходах до оцінки життєвого циклу будівлі. Вони викликають масові руйнування і змінюють підходи до проектування, експлуатації та відновлення об'єктів. Створення сучасної методики проектування будівель повинне включати ці негативні наслідки на етапі планування. Доцільно вибирати для будівництва безпечні локації, подалі від стратегічних промислових об'єктів та транспортних вузлів, які можуть стати мішенями для атак. Важливо проектувати будівлі з урахуванням ризиків вибухових хвиль, механічних і термічних пошкоджень, тому використовуються ударостійкі матеріали, посилені перекриття, багатошарове скло.

Сучасна планувальна практика в Україні має включати інтегровані укриття, сховища та резервні системи енергозабезпечення і водопостачання, які дозволяють зберігати життєдіяльність будівлі навіть під час надзвичайних ситуацій. Суттєве значення має застосування енергоефективних, екологічних і циркулярних рішень при відновленні пошкоджених об'єктів, зокрема використання повторно придатних матеріалів, дотримання сучасних стандартів енергетичної ефективності. Регулярна оцінка технічного стану і додаткові заходи для посилення інженерного захисту теж є ключовими для мінімізації наслідків руйнувань та прискорення процесу відновлення.

Комплексне впровадження таких заходів дозволяє істотно підвищити стійкість, довговічність і адаптивність будівель навіть в умовах війни. Практичний досвід показує, що ігнорування військових ризиків у будівництві спричиняє значні втрати для економіки, екології та безпеки мешканців.

Руйнування конструкцій із застарілими оздоблювальними матеріалами та часом (наприклад, азбестом) створює довготривале джерело хімічного і пилового забруднення, небезпечного для екосистем і здоров'я населення. Значна частина уламків будівель змивається водними потоками і потрапляє у водосховища, спричиняючи ризик хімічного забруднення та евтрофікації водойм. Водночас спалення, підривання або обстріли будинків

провокують масове вивільнення токсичних газів, важких металів і мікрочасток у повітря, що впливає не лише локально, а й на мікроклімат регіону. Невпорядковане складування залишків житлових споруд потребує десятки років для рекультивації земель і, як результат, суттєво ускладнює подальше використання територій. Всі ці фактори підкреслюють, що знищення житлових багатоповерхівок в умовах війни наносить довготривалу й масштабну шкоду довкіллю України.

Ще одним викликом стали масові енергетичні й водні кризи через руйнування інженерних мереж багатоповерхівок під час обстрілів та масових відключень світла й газу в Харкові, Києві, Дніпрі й інших містах. Обстріли призвели до втрати до 73% потужностей теплових електростанцій, масових відключень і дефіциту тепла й світла в багатьох містах, довелося екстрено використовувати дизель-генератори.

Все це продемонструвало нагальну необхідність інтеграції воєнного фактору у життєвий цикл багатоповерхових будівель, особливо тих країн, які живуть в зоні ризику. Ця інтеграція повинна здійснюватися через чіткий кількісний показник, який відображає ефективність і раціональність вжитих захисних, адаптаційних і відновних заходів. Такий показник дозволяє зіставляти різні проєктні рішення, оцінювати їхню стійкість у разі військових загроз і враховувати додаткові витрати чи вигоди від реалізації спеціальних протиаварійних рішень.

Методика визначення показника врахування воєнних загроз може складатися з таких етапів. Спершу на основі історичних даних або експертної оцінки для об'єкта визначаються ймовірність військового впливу (наприклад, ризик прямих руйнувань, віддаленості від зон бойових дій, типу прилеглих стратегічних об'єктів). Потім для основних елементів життєвого циклу (будівництво, експлуатація, ремонт, відновлення) розраховуються очікувані додаткові витрати, зміни терміну служби, зростання викидів парникових газів, обсяги відходів тощо, пов'язані із зазначеним ризиком. Важливо враховувати не лише збільшення витрат, а й масштаби

потенційних збитків (наприклад, скорочення ресурсу основних конструкцій або необхідність аварійної модернізації).

Зведений інтегральний показник формується як модифікація класичного LCA (Life Cycle Assessment) або показників вартості життєвого циклу (LCC), до яких додається спеціальний коефіцієнт або окрема стаття – «Витрати і наслідки від військових впливів». Методика може містити експертні або аналітичні шкали оцінки стійкості до військових впливів з урахуванням фізичних посилень, мобільності систем, наявності укриттів, резервних енергетичних та водопостачальних рубежів. Для полегшення використання цей показник можна подати у вигляді кількісного коефіцієнта ризику (наприклад, «Коефіцієнт військової стійкості будівлі»), вираженого як відсоток, бал або кратність збільшення загальних витрат і збитків протягом життєвого циклу будівлі з урахуванням реальних або прогнозованих військових загроз.

3.9. Енергетична стійкість у сценаріях відновлення України

Енергетичну безпеку будівель можна підвищити і за рахунок рішень, які не відповідають принципам зеленого відновлення України, наприклад, шляхом нарощування потужностей традиційних джерел енергії, резервних дизельних генераторів чи застосування матеріалів із високим вуглецевим слідом. Такі заходи здатні оперативно зменшити ризики перебоїв постачання енергії, однак вони суперечать довгостроковим кліматичним цілям, не сприяють декарбонізації та можуть посилювати ресурсну залежність.

З урахуванням визначених національних цілей, стратегій сталого розвитку та наявного практичного досвіду післявоєнної відбудови сформовано таблицю 3.9, яка відображає основні показники амбітного і прагматичного сценарію відновлення.

Таблиця 3.9

Порівняння показників амбітного і прагматичного
сценарію відновлення

Показник	Амбітний/Зелений сценарій	Прагматичний сценарій
1	2	3
Частка ВДЕ у виробництві електроенергії	до 50% у 2032, 70% у 2050	до 25-30% у 2032, 40% у 2050
Термомодернізація житла	>50% будівель до 2032, ~100% до 2050	20-30% до 2032, 60% до 2050
Зниження втрат у мережах	до 12% у 2032	до 8% у 2032
Електрифікація опалення	Часткова до 2032, масова до 2050	Локальна, залежно від регіону
Викиди CO ₂	Зниження на 60-70% до 2050	Зниження на 30-40% до 2050
Інвестиції у ВДЕ	\$30-40 млрд до 2032	\$12-18 млрд до 2032
Відновлення потужностей	Пріоритет - нові ВДЕ та розподілена генерація	Пріоритет - ремонт існуючих ТЕС/ГЕС
Експорт електроенергії	Значний потенціал експорту до ЄС	Обмежений експорт, орієнтація на внутрішнє споживання
Скорочення енергоспоживання	до 56–92 кВт·год/м ² /рік	до 120–150 кВт·год/м ² /рік
Збереження водних ресурсів	на 20–30%	на 10–15%
Стандарт NZEB	100% відповідність	20–30% відповідність
Нові робочі місця	500 тис.	100–150 тис.
Зменшення енергетичної бідності	на 40%	на 8–12%

Джерело: UNECE, *Rebuilding Ukraine with a Resilient, Carbon-Neutral Energy System* [57], Довгострокова стратегія термомодернізації будівель до 2050 року (додатки 1 і 6) [95, 96], Енергетична стратегія України до 2050 року [102], Покроковий план енергоефективної відбудови в Україні [130], *Energy security – Draft Ukraine Recovery Plan* [14], Зелена відбудова і «зелені робочі місця»: аналітика Living Planet / Green Recovery («Methodological Basis and Calculation Model») [42], Оновлений НВВ України до Паризької угоди та Нацплан з енергетики і клімату [45].

У запропонованому підході до оцінки енергетичної безпеки акцентовано увагу на впровадженні амбітного чи прагматичного зеленого сценарію відновлення, які поєднують вимоги надійності та стійкості енергопостачання з реалістичними фінансовими й технологічними можливостями держави та громад. Такі сценарії передбачають пріоритетність заходів, що одночасно: зменшують енергоспоживання, підвищують автономність будівель, розширюють використання відновлюваних джерел енергії, а також відповідають принципам «build back better», тобто відбудови з вищим рівнем захисту від майбутніх загроз.

Для реалізації зеленого сценарію відновлення України необхідно здійснити низку стратегічних кроків, які забезпечать сталий розвиток, енергоефективність та інтеграцію до європейського простору. Перш за все, слід впроваджувати принципи зеленого будівництва, які передбачають реконструкцію житлового фонду з використанням енергоефективних матеріалів та технологій. Модернізація має базуватися на стандартах Європейського зеленого курсу, включаючи декарбонізацію теплопостачання та створення будівель із низьким рівнем енергоспоживання.

Важливо забезпечити розвиток відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова генерація, а також створити механізми для залучення інвестицій у цей сектор. Для цього необхідно реформувати операторів систем розподілу електроенергії та запровадити професійну регуляцію, яка знизить ризики для інвесторів. Крім того, слід розвивати місцеві електроенергетичні системи, які забезпечуватимуть автономність і стійкість у разі кризових ситуацій. Для успішної реалізації зеленого сценарію у галузі житлового будівництва важливо створити чіткі довгострокові орієнтири від уряду, які гарантуватимуть стабільність і передбачуваність для інвесторів [156].

Амбітна модель відновлення орієнтована на повномасштабну трансформацію житлового фонду відповідно до високих екологічних

стандартів, передусім концепції будівель з майже нульовим енергоспоживанням (nZEB). У межах такого підходу відновлення розглядається не як просте відтворення довоєнного стану, а як якісний перехід до нової енергетичної парадигми, що передбачає обов'язкову інтеграцію відновлюваних джерел енергії (сонячні фотоелектричні установки, теплові насоси, гібридні системи) та впровадження сучасних енергоефективних рішень – високоефективної теплоізоляції, систем рекуперації, інтелектуальних систем керування навантаженням та енергетично гнучких мереж. У результаті формується житловий фонд, здатний забезпечувати значну частку власного енергоспоживання з відновлюваних джерел, що істотно знижує залежність від централізованих енергосистем та викопного палива [8].

Реалізація амбітної моделі потребує суттєвих початкових капіталовкладень, що добре ілюструється на прикладі міста Буча, де модернізація багатоквартирного житлового фонду до рівня майже нульового енергоспоживання оцінюється до 318 млн євро, проте потенційне скорочення споживання енергії може досягати близько 74%, а період окупності – 15–20 років за умови реформування тарифної та регуляторної політики [106]. Такий масштаб інвестицій може бути забезпечений лише за наявності цілісної законодавчої та інституційної рамки, що включає запровадження жорстких будівельних норм, гармонізованих зі стандартами ЄС щодо nZEB, обов'язковість поетапної термомодернізації та дієві механізми контролю їх виконання.

Прагматична модель відновлення житлового фонду зосереджується на частковій модернізації будівель, основною метою якої є досягнення прийняттого рівня енергетичної незалежності та скорочення витрат домогосподарств без радикальної трансформації всієї інфраструктури. У такій логіці пріоритет надається окремим, відносно недорогим заходам, які можна швидко масштабувати: термомодернізації огорожувальних конструкцій (передусім фасадів), встановленню енергоощадних систем

освітлення, локальному впровадженню сонячних панелей та інших елементів децентралізованої генерації. Ці інтервенції дозволяють зменшити енергоспоживання будівель без повного переходу до стандартів NZEB, що є критично важливим в умовах обмежених фінансових і організаційних ресурсів післявоєнного періоду.

З фінансового погляду витрати в межах прагматичної моделі істотно нижчі, ніж у разі реалізації амбітного сценарію глибокої модернізації: для прикладу, орієнтовна потреба в інвестиціях для Бучі становить близько 214 млн євро для досягнення мінімальних вимог, тоді як потенціал економії енергії за такого підходу обмежується приблизно 45%. Водночас саме відносно короткі періоди окупності (порядку 15 років) роблять подібні проєкти більш привабливими для інвесторів і місцевих громад, оскільки вони узгоджуються з типовим горизонтом фінансового планування та кредитування. Прагматична модель спирається на еволюційне вдосконалення законодавчої бази: запровадження гнучких норм, які дозволяють поступове наближення до зелених стандартів, спрощення процедур створення ОСББ, доступу до «зелених» кредитних продуктів і програм підтримки модернізації житлових будівель [112].

Очевидно, що амбітна модель зеленого відновлення житлового фонду може суттєво підвищити енергоефективність багатопверхових будівель в Україні. Вона передбачає відновлення зруйнованого житла та їх комплексну модернізацію відповідно до найвищих екологічних стандартів. Крім безпосередньої економії енергії, амбітна модель сприяє зменшенню викидів парникових газів, підвищенню якості життя мешканців, зниженню витрат на комунальні послуги та формуванню стійкого до криз житлового фонду. Вона також створює умови для залучення інвестицій, розвитку інноваційних технологій і появи нових «зелених» робочих місць.

Згідно з результатами моделювання сценаріїв розвитку енергетики України до 2050 року [67], електроенергія з відновлюваних джерел за амбітного сценарію може покривати близько 30% потреб, тоді як заходи з

енергозбереження дають можливість заощадити орієнтовно 40% сукупних енерговитрат. Графік зміни частки ВДЕ у структурі енергоспоживання представлено на рис. 3.15.

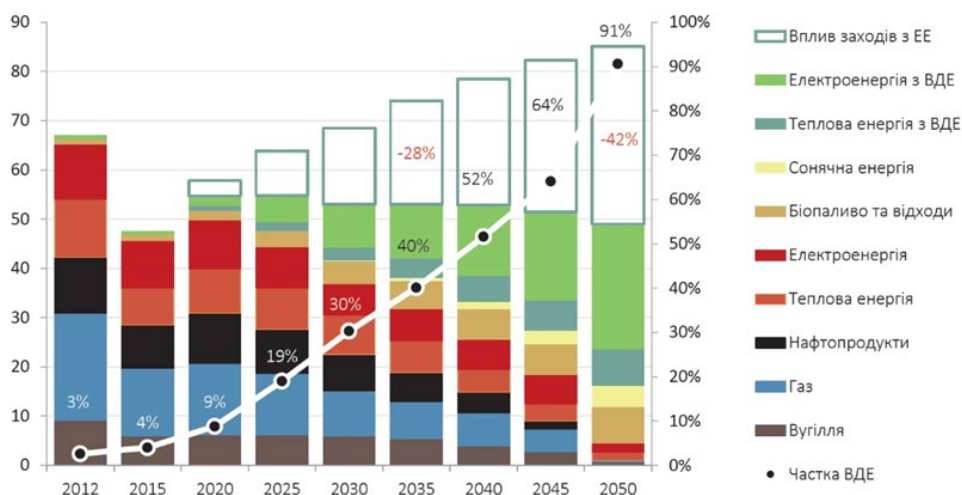


Рис. 3.15. Графік зміни частки ВДЕ у структурі енергоспоживання
Джерело: Науково-аналітична монографія Transition of Ukraine to the Renewable Energy by 2050: Results of Modeling of the Reference and Alternative Scenarios for the Development of Ukraine's Energy Sector

І хоч амбітна модель має в основі масштабніші позитивні зміни, прагматична модель більш доступна для загалу у період війни. Амбітна модель оптимальна для довгострокового сталого розвитку, тоді як прагматична дозволяє швидше відновити житловий фонд із мінімальними екологічними покращеннями.

Висновки до розділу 3

1. Енергетичний паспорт будівлі є базовим інструментом розрахунку енергетичної безпеки та основою проведення енергетичного аудиту, оскільки він комплексно відображає теплонадходження і витрати енергії, теплоізоляційні властивості огорожувальних конструкцій,

баланс надходження енергії з внутрішніх і зовнішніх джерел, а також енергетичні витрати на опалення, вентиляцію та кондиціонування. При цьому система енергетичної сертифікації гармонізована з європейськими нормативними вимогами є однією з найбільш інституційно впроваджених та адаптованих до українських реалій та формує прозорість енергоспоживання житлового фонду на ринку нерухомості.

2. Сформовано основу для досліджень теплових потоків будівель за допомогою математичної моделі, де враховано вплив різниці температур на конструктив, види конструктивних рішень, кількість надходження і втрати енергії.

3. Встановлено, що в сучасних підходах до оцінки енергетичної безпеки будівель доцільним є використання інтегрованих програмних комплексів, які поєднують можливості математичного моделювання, аналізу теплових потоків та моніторингу енергоспоживання, оскільки застосування таких інструментів забезпечує виявлення дефектних зон огорожувальних конструкцій, обґрунтування ефективних заходів з їх усунення та підтверджує можливість оптимізації конструктивних рішень з метою підвищення енергоефективності будівель.

4. Запропоновано комплексну модель оцінки енергетичної безпеки багатоповерхових будівель, яка поєднує розрахунок енергетичного паспорта, вимірювання фактичних енерговитрат із використанням спеціалізованих програмних комплексів, тепловізійні обстеження та аналіз теплових потоків у цифрових моделях, а також передбачає системний моніторинг енергоспоживання й обґрунтування заходів з підвищення енергоефективності відповідно до амбітного або прагматичного сценарію післявоєнного відновлення України.

5. Встановлено, що інтеграція технологій штучного інтелекту в систему автоматизованого аналізу стану будівель забезпечує перехід від фрагментарних енергетичних аудитів до безперервного інтелектуального моніторингу, який на основі об'єднання даних сенсорних мереж,

дистанційного зондування, тепловізійних обстежень і цифрових реєстрів у децентралізованій архітектурі збору даних дозволяє в режимі реального часу виявляти аномалії, прогнозувати відмови інженерних систем, оцінювати наслідки воєнних і техногенних загроз та обґрунтовувати оптимальні сценарії реагування, формуючи якісно нову парадигму управління будівельним фондом.

6. Обґрунтовано доцільність включення екологічних показників до системи оцінки енергетичної безпеки будівель, зокрема розрахунку вуглецевого сліду на різних етапах життєвого циклу та оцінки життєвого циклу будівлі залежно від комплексу прийнятих інженерних і конструктивних рішень, при цьому встановлено важливість урахування показників втіленої енергії на стадіях виробництва будівельних матеріалів і зведення об'єктів, потенціалу їх повторного використання або переробки, а також додаткових екологічних і ресурсних витрат, пов'язаних із воєнними та кризовими загрозами.

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ЗАБЕЗПЕЧЕННЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ. КОНЦЕПЦІЯ СУЧАСНОЇ УПРАВЛІНСЬКОЇ СИСТЕМИ

4.1. Ключові рекомендації по забезпеченню енергетичної безпеки багатоповерхових житлових будівель

Атаки на енергетичну інфраструктуру змусили Україну радикально переглянути підходи до енергозабезпечення. З 2024 року ключовим напрямком стало впровадження децентралізації та автономізації як на рівні критичної інфраструктури, так і серед населення. Це дозволило зменшити вразливість енергосистеми до масованих ударів і забезпечити базові потреби в умовах енергетичної нестабільності. В умовах російського енергетичного терору, загроз воєнних дій та міжнародних кризових явищ відновлення України має здійснюватися максимально раціонально, з урахуванням обмежених ресурсів і довгострокових викликів. Оптимальним підходом є вибір «зеленого сценарію» або принаймні мінімально «оптимального сценарію» зеленого повоєнного відновлення житлового фонду.

Також постає потреба в розробленні системного та стратегічного підходу до загального управління питаннями енергетичної й екологічної стабільності на всіх рівнях. Глобальне управління передбачає гармонізацію дій місцевих органів, комунальних підприємств, бізнесу, освітніх і фінансових установ, що дозволяє одночасно підвищувати енергонезалежність, зменшувати шкідливі викиди, модернізувати інфраструктуру й формувати сталий енергетичний розвиток у відповідь на сучасні виклики.

Для вирішення таких завдань необхідно розробляти нові управлінські рішення, які включатимуть залучення локальних енергетичних спільнот,

створення нових стратегій балансування і кооперації, а також спрощення регуляторних процедур, доступ до інноваційних технологій і комплексну державну підтримку. Лише інтегрований управлінський підхід із прозорою комунікацією між органами влади, бізнесом та громадянами здатний забезпечити адаптивність і сталий розвиток енергетичної системи міст у сучасних умовах.

Результати оцінки енергетичної безпеки будівель мають практичний сенс тоді, коли переходять у впровадження підібраних заходів, тому на основі аналізу сучасних технічних, нормативних і управлінських практик сформовано ключові рекомендації по забезпеченню енергетичної безпеки будівель.

До таких рекомендацій насамперед належить децентралізація енергопостачання через впровадження гібридних систем, що поєднують сонячні панелі, акумуляторні сховища та резервні генератори, які здатні суттєво зменшити залежність від централізованих мереж у разі відключень. Як підтверджують дослідження IEA (2025), такі системи знижують залежність від центральних мереж на 70–90% [25]. Важливим доповненням є формування енергетичних кооперативів, у межах яких кілька будівель спільно використовують локальні джерела та накопичувачі енергії, що дає змогу оптимізувати інвестиційні та експлуатаційні витрати.

Другий блок рекомендацій стосується термомодернізації та підвищення енергоефективності оболонки: застосування огорожувальних конструкцій із коефіцієнтом теплопередачі на рівні $U \leq 0,15$ Вт/м²·К, що дозволить знизити втрати тепла на 40–60% [59], заміна існуючих світлопрозорих заповнень на вікна з енергоощадними пакетами, заповненими інертним газом, а також установлення систем механічної вентиляції з рекуперацією тепла. Додаткове впровадження автоматичних регуляторів температури в системах опалення й вентиляції дозволяє адаптивно керувати тепловим режимом та мінімізувати надлишкові витрати енергії без погіршення умов мікроклімату.

Наступним напрямом є впровадження розумних технологій управління енергією, заснованих на інтеграції IoT-сенсорів, системи smart-grid та алгоритмів штучного інтелекту. Така інфраструктура забезпечує автоматизований облік і контроль споживання, прогнозування навантажень, виявлення аномалій у роботі обладнання та запобігання аваріям, а використання AI-моделей дозволяє зміщувати частину енергоємних процесів у позапікові періоди, мінімізуючи витрати без втрати комфорту.

Не менш важливою складовою є законодавча й фінансова підтримка: пільгове кредитування ОСББ для термомодернізації, запровадження обов'язкових вимог до новобудов щодо інтеграції відновлюваних джерел енергії, участь у державних програмах підтримки енергоефективності та використання енергосервісних контрактів, які дозволяють реалізовувати глибоку модернізацію навіть за обмежених бюджетів завдяки поверненню інвестицій з майбутньої економії енергії.

Адаптація будівель до кліматичних змін передбачає врахування ширшого діапазону можливих температур і екстремальних погодних подій, зокрема проєктування огорожувальних конструкцій, систем охолодження та вентиляції з розрахунком на перепади від приблизно $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також підвищену тривалість теплових хвиль. У межах житлових комплексів доцільно збільшувати площі зелених насаджень і пермеабельних покриттів, що дає змогу зменшити інтенсивність міського «острова тепла», покращити мікроклімат і знизити потребу в активному кондиціонуванні.

Ефективний енергетичний менеджмент має спиратися на безперервний моніторинг і чіткий розподіл відповідальності: необхідно виявляти ключові точки енерговитрат будівлі, створювати інформаційні бази для планування реконструкцій та залучення фінансування, а також впроваджувати системи управління енергією на основі стандартів типу ISO 50000. Для цього встановлюються вузли комерційного обліку тепла й електроенергії, які забезпечують точний контроль споживання, а результати вимірювань відображаються в енергетичних паспортах будівель із

фіксацією показників кінцевої та первинної енергії, а також пов'язаних викидів CO₂, що створює основу для цілеспрямованого зниження енергетичної та кліматичної вразливості.

Методи проєктування енергоефективних будівель повинні передбачати попередню оцінку енергетичних характеристик конструктивних і інженерних рішень уже на стадії ескізного та робочого проєкту, що дозволяє мінімізувати потребу в енергії ще до етапу експлуатації. У цьому контексті доцільно орієнтуватися на стандарти nZEB для новобудов і використовувати BIM-технології зі створенням цифрових двійників будівель, у яких поєднуються дані про геометрію, матеріали, інженерні системи та енергоспоживання, що суттєво спрощує подальший моніторинг і модернізацію.

Важливим рішенням є цілеспрямоване використання альтернативних джерел енергії: інтеграція сонячних панелей і теплових насосів дає змогу покривати значну частку потреб будівлі, зменшуючи залежність від централізованих мереж і фінансове навантаження на споживачів. Водночас у багатоповерхових будинках слід відмовлятися від індивідуальних побутових генераторів через підвищені ризики пожежі та токсичні викиди, натомість переходячи до колективних резервних рішень на основі акумуляторних систем зберігання та малої відновлюваної генерації, які забезпечують необхідний рівень енергонезалежності без загрози для безпеки мешканців.

Наступною рекомендацією є підтримка активної співпраці мешканців із структурами управління будинком, насамперед через створення об'єднань співвласників багатоквартирних будинків або енергетичних кооперативів, які беруть на себе координацію проєктів з термомодернізації, встановлення сонячних панелей, теплових насосів та іншого спільного обладнання. Досвід українських міст свідчить, що саме колективне управління та спільні інвестиції мешканців здатні забезпечити суттєве скорочення витрат на опалення й інші комунальні послуги, тоді як

масштабні інформаційні кампанії й освітні програми формують культуру раціонального енергоспоживання та підвищують обізнаність щодо державних і місцевих механізмів фінансової підтримки енергоефективних заходів.

Реагування на критичні ситуації, пов'язані з відключеннями енергії, вимагає створення локальної інфраструктури безпеки в межах кожного житлового комплексу. Насамперед доцільно обладнати під'їзди автономними джерелами освітлення, що гарантуватиме можливість безпечної евакуації та доступу до помешкань у разі тривалих відключень електроенергії. Критично важливі системи, такі як ліфти, насоси водопостачання й системи оповіщення, мають бути підключені до джерел безперебійного живлення або локальних резервних мереж, здатних підтримувати їхню роботу в аварійному режимі. Додатково встановлення аварійних кнопок зв'язку і систем оперативного інформування мешканців дозволяє значно скоротити час реакції на інциденти, координувати дії служб експлуатації та зменшувати ризики для життя й здоров'я людей у період енергетичних криз.

Енергетична безпека будівель досягається через комбінацію технологічних, організаційних та політичних рішень. Ключовим є перехід від централізованої моделі до децентралізованої, інтеграція ВДЕ та залучення громад до управління ресурсами. Енергоефективність повинна розглядатися не як індивідуальне рішення окремих суб'єктів, а як загальноприйнята суспільна норма, інтегрована в систему державної політики та соціально-економічного розвитку. Реалізація цих рекомендацій дозволить не лише підвищити стійкість до зовнішніх загроз, а й закласти основи для сталого розвитку міст України у координації між органами місцевого самоврядування, управителями будинків та мешканцями.

4.2. Створення сучасної управлінської системи у сфері екологічного та енергетичного оцінювання та прийняття рішень

Беручи до уваги зазначене вище, виникає науково обґрунтована необхідність дослідити, яким чином сучасні практики можуть бути системно інтегровані в управлінські рішення для забезпечення енергетичної та екологічної безпеки. Це обумовлює доцільність формування нової управлінської системи, яка базується на сучасних підходах в умовах глобальних ризиків та впровадженні принципів сталого розвитку. Така система має базуватись на комплексному підході, який охоплює збір, моніторинг даних і прийняття оптимальних рішень на основі аналітики та кращих практичних заходів. Для цього система управління додатково має використовувати нові методи та підходи щодо оцінки технічних рішень, врахування вагових факторів прийняття заходів, розрахунку показників енергетичної безпеки будівель і тд.

Ефективне управління енергетичними потоками та ресурсами у сучасному містобудуванні вимагає спільної активної участі всіх учасників ринку. Кожен має свою частку впливу: органи влади, які визначають політику, стандарти та фінансові стимули; підприємства (виробники енергії, оператори систем розподілу, трейдери), що відповідають за виробництво, передачу і комерційну діяльність; енергетичні фахівці, які здійснюють аудит, впровадження й підтримку нових технологій; а також кінцеві споживачі – мешканці, громадські організації, бізнес, які впливають на попит, обирають типи рішень і беруть безпосередню участь у збалансуванні системи.

Інтегрований підхід означає постійну взаємодію між усіма цими ланками: держава формує рамки політики та надає підтримку через програми, інвестори й комерційні оператори реалізують інноваційні технічні рішення, експерти та консультанти забезпечують якісне впровадження й моніторинг, а громадськість долучена через участь,

контроль та ініціативи з енергоефективності. Завдяки такій взаємодії стає можливою максимально ефективною реалізацією ініціатив на усіх рівнях – від стратегічного до локального.

На рівні багатоповерхових будівель питання енергетичної стійкості вирішується спільними зусиллями співвласників, керуючих компаній, технічних спеціалістів та органів місцевого самоврядування (рис. 4.1). Саме колективне прийняття рішень, прозоре інформування про енергоспоживання, спільне інвестування в сучасні системи (наприклад, сонячні електростанції чи системи накопичення енергії), підтримка освітніх програм та належне управління дозволяють забезпечити стало функціонування будинку й створити стійке енергетичне співтовариство, придатне для швидкого реагування у кризових ситуаціях.

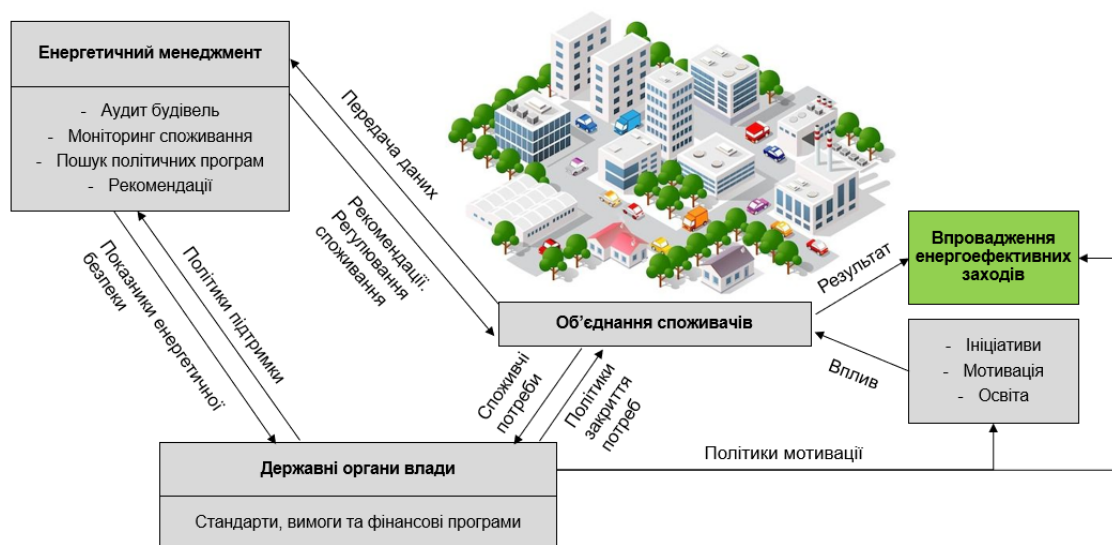


Рис. 4.1. Схема взаємодії у системі оцінки енергетичної безпеки та запровадження енергоефективних заходів

На основі дослідження взаємодії енергоспоживання на локальному рівні представлено схему, згідно якої впровадження енергоефективних заходів у міському середовищі починається із енергетичного менеджменту, який охоплює аудит будівель, моніторинг споживання, аналіз політичних

програм і формування рекомендацій для оптимізації використання енергії. Ці дані та висновки передаються об'єднанню споживачів, які аналізують власні потреби і слідують рекомендаціям щодо регулювання споживання.

Далі об'єднання споживачів взаємодіє із державними органами влади, передаючи інформацію про енергетичні потреби, отримуючи зворотній зв'язок, а також політики підтримки й нормативні установки. Таким чином, виникає політика мотивації, яка направлена на впровадження енергоефективних заходів. Впровадження рішень включає ініціативи, освітню роботу та мотиваційні програми, що впливають на формування споживчої поведінки та заохочують до переходу на енергозберігаючі технології. У підсумку, ефективна комунікація між державними органами, менеджерами й споживачами, а також політики мотивації забезпечують результат – підвищення енергоефективності об'єктів і зниження загальних витрат ресурсів.

Робота такої системи передбачає обов'язковий комплексний підхід, який поєднує різні управлінські та технічні рішення в одну взаємодоповнюючу структуру. Це створює багаторівневу, стійку й адаптивну енергомережу на основі взаємодії технічних рішень, здатну реагувати на будь-які виклики та підтримувати стабільне енергопостачання в міському середовищі (рис. 4.2).

У звичайних умовах будівлі живляться від центральних електромереж та систем теплопостачання, до яких додаються локальні відновлювані джерела: сонячні панелі, невеликі вітрові турбіни, геотермальні насоси, біомасові котли. Енергетична система керування (EMS) оптимізує їхню роботу, враховуючи навантаження, погодні фактори й економічні критерії. При порушенні зовнішнього енергопостачання або його відсутності EMS автоматично змінює логіку пріоритетів, переходячи на автономний режим і забезпечуючи будівлю енергією послідовно від доступних джерел відповідно до поточної ситуації.

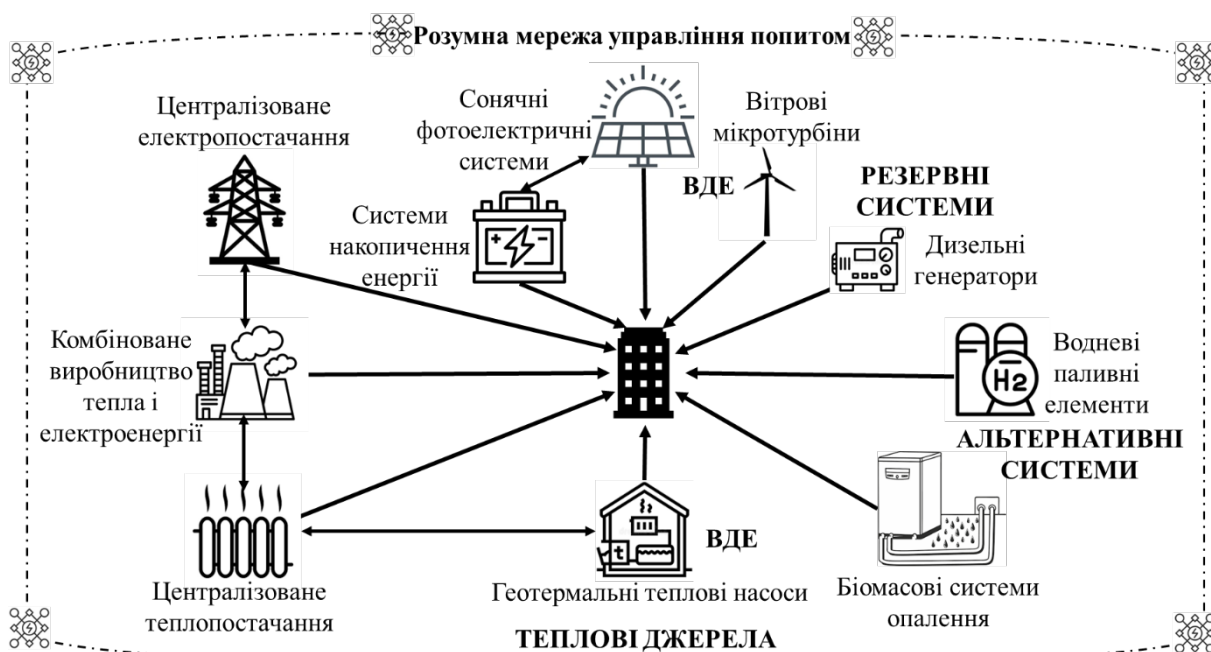


Рис. 4.2. Взаємодія видів технічних рішень у мережі управління енергетичним попитом

У робочому режимі передбачено, що перш за все забезпечується критичні навантаження, до яких належать опалення життєво важливих приміщень, освітлення евакуаційних шляхів, робота ліфтів для евакуації, а також системи вентиляції та холодильного зберігання медикаментів. Для цього використовуються акумуляторні системи (BESS), які виконують роль миттєвого буфера, та сонячні фотоелектричні установки за умов достатнього рівня сонячної інсоляції. Локальні відновлювані джерела, зокрема сонячні панелі та вітрові мікротурбіни, доцільно застосовувати для задоволення поточного споживання та заряджання батарей, при цьому у міських умовах пріоритет надається сонячним установкам через їх стабільність і нижчі експлуатаційні витрати.

Для виконання теплових потреб, особливо в опалювальний сезон, залучаються когенераційні установки та біомасові котли, які також доповнюють електроенергетичне навантаження. Акумуляторні системи можуть згладжувати піки навантаження, підтримують стабільність частоти і напруги, забезпечують поступовий запуск генераторів та знижують

тривалість роботи дизельних генераторів. Останні застосовуються як резервні джерела енергії при тривалому дефіциті або критичному розряді батарей, із активацією керованою EMS відповідно до економічних порогів. Водневі паливні елементи використовуються за наявності відповідної інфраструктури для резервного живлення або спеціального обладнання, їх використання залежить від доступності палива та гарантованою безпеки.

Упродовж всього часу роботи системи управління енергією (EMS) за допомогою smart-grid та технологій управління попитом націлені на оптимізацію використання енергії, знижуючи навантаження в некритичних зонах, тимчасово обмежуючи другорядних споживачів або змінюючи графіки роботи пристроїв, що дозволяє уникнути перевантаження й зменшує необхідність застосування дизельних генераторів. Описаний підхід до пріоритетності використання технічного забезпечення має важливе значення у роботі управлінської системи.

У запропонованому підході оцінка енергетичної безпеки будівель вибудовується як послідовний багатоступеневий процес, що складається з п'яти етапів, які забезпечують перехід від фіксації вихідного стану до системного управління ризиками.

Етап 1 – підготовчий.

Підготовчий етап оцінки енергетичної безпеки будівлі передбачає насамперед формування робочої групи з чітким розподілом відповідальності. Призначається менеджер з енергетичної безпеки, який координує процес, очолює комісію з планування та відповідає за взаємодію між технічними фахівцями й управлінцями. До роботи залучають сертифікованих енергоаудиторів і спеціалістів з обстеження інженерних систем, які можуть забезпечити належний рівень технічної експертизи. Паралельно визначаються цілі та завдання оцінки: окреслюються місія й критично важливі функції будівлі (зокрема, забезпечення безперервної роботи життєво необхідних систем), встановлюються просторові й функціональні межі дослідження. Завершальним кроком є проведення

стартової наради із зацікавленими сторонами, під час якої узгоджуються очікувані результати, терміни виконання та формат представлення підсумкових матеріалів.

Етап 2 – збір та аналіз даних.

Другий етап оцінки енергетичної безпеки будівлі полягає у системному зборі та аналізі даних, що охоплюють як документаційні, так і емпіричні джерела інформації. На початку здійснюють аналіз технічної документації: вивчають об'ємно–планувальні та конструктивні рішення, проєктні матеріали з інженерних систем, енергетичний паспорт будівлі, а також ремонтну й експлуатаційну документацію, що дозволяє відтворити проєктний стан та історію змін. Далі проводиться візуальне обстеження, під час якого оцінюють фактичний стан теплоізоляційної оболонки, систем загальнобудинкового освітлення, індивідуального теплового пункту й теплогенерувальних установок, а також оглядають системи опалення, вентиляції, гарячого водопостачання та кондиціонування. Завершальним компонентом етапу є інструментальні вимірювання: виконують приладні заміри екологічних показників та фактичних показників споживання енергії й параметрів роботи інженерних систем, що дає змогу виявити відхилення від проєктних рішень та нормативних вимог і закласти кількісну основу для подальшого аналізу вразливостей.

Етап 3 – оцінка енергетичної безпеки.

На третьому етапі здійснюється безпосередня оцінка енергетичної безпеки будівлі, яка поєднує аналіз вразливостей, визначення енергетичних характеристик та їх порівняння з нормативними вимогами. Спочатку ідентифікують критичні джерела енергії як на рівні самого об'єкта, так і на стороні зовнішніх мереж, оцінюють залежність будівлі від централізованого енергопостачання, виявляють потенційні загрози для навколишнього середовища, безперебійної подачі ресурсів і ризику для функціонування життєво важливих систем. Далі, на основі зібраних даних, розраховують енергопотребу будівлі EP_{nd} , фактичне енергоспоживання EP_{use} , показники

поставленої енергії EP_{del} , первинну енергію EP та пов'язані викиди парникових газів mCO_2 , доповнюючи їх екологічними індикаторами та оцінкою параметрів життєвого циклу будівлі. Завершальною частиною етапу є порівняння отриманих показників із нормативними граничними значеннями (зокрема перевірка умови $EP_{use} \leq EP_p$), встановлення класу енергетичної ефективності та інтегральна оцінка рівня енергетичної безпеки згідно з прийнятою системою критеріїв.

Етап 4 – розробка заходів і рекомендацій.

На четвертому етапі, спираючись на результати розрахунків і виявлені вразливості, формується комплекс заходів і рекомендацій щодо підвищення енергетичної безпеки будівлі. Насамперед опрацьовуються пропозиції зі зменшення витрат енергії та підвищення енергоефективності оболонки й інженерних систем, а також розробляється план дій у надзвичайних ситуаціях, що визначає алгоритм реагування на відключення енергії та інші критичні події. Паралельно виконується економічна оцінка: розраховується орієнтовна вартість заходів, строки окупності та очікувана економія, що дозволяє ранжувати інтервенції за пріоритетністю. Завершальним кроком є документальне оформлення результатів у вигляді сертифіката енергетичної ефективності будівлі, звіту про обстеження інженерних систем та інтегрованого плану забезпечення енергетичної та екологічної безпеки, який слугує дорожньою картою для подальшої модернізації й управління.

Етап 5 – моніторинг змін.

Завершальний, п'ятий етап передбачає безперервний моніторинг змін, спрямований на підтримання та поступове підвищення досягнутого рівня енергетичної безпеки будівлі. У його межах регулярно оцінюється стан впровадження розроблених заходів, коригуються пріоритети й за потреби уточнюються технічні рішення. Паралельно здійснюється відстеження глобальних ризиків від змін клімату до коливань на енергетичних ринках з подальшою адаптацією локальної стратегії. Важливою складовою є періодичне оновлення обраних заходів відповідно до появи нових

технологій та фінансових інструментів, а також підтримання постійного взаємозв'язку між усіма учасниками ринку – власниками будівель, операторами мереж, постачальниками енергоресурсів і органами влади, що забезпечує узгодженість рішень та їхню довгострокову ефективність.

Для комплексної оцінки технічних альтернатив доцільно використовувати такі критерії як: рівень енергоефективності, економічна обґрунтованість, відповідність екологічним нормам, здатність до протидії зовнішнім ризикам, можливість масштабування рішень, перспективна експлуатаційна стабільність і інтеграція стандартів сталого розвитку. Кожен із цих показників сприяє формуванню стратегій, які забезпечують стійкість та надійність енергетичної системи на довготривалу перспективу. Розрахунок комплексної оцінки альтернативи здійснюється шляхом множення значення альтернативи за кожним критерієм на відповідний коефіцієнт важливості, після чого результати складаються. Таким чином, інтегральна оцінка вибору альтернативних технологій енергозабезпечення багатоповерхових будівель формується за класичною методологією багатокритеріального аналізу прийняття рішень (MCDA – Multi-Criteria Decision Analysis), що базується на адитивній моделі.

$$Total\ Score_i = \sum_{j=1}^n S_{ij}, \quad (4.1)$$

де S_{ij} – оцінка рішення i за критерієм j за шкалою від 1 до 5; n – кількість критеріїв оцінки.

Якщо вагові коефіцієнти не встановлені, всі критерії оцінювання потрібно розглядати як рівнозначні. Для технічної експертизи рішень у сфері енергозабезпечення зазвичай враховують такі аспекти: енергоефективність, економічну доцільність, можливість масштабування, здатність до стабільної роботи та опір зовнішнім впливам. Важливо також брати до уваги вплив на довкілля, оскільки він має суттєве значення для перспективного розвитку галузі. У разі необхідності виокремлення окремих критеріїв, наприклад, стійкості в умовах воєнних ризиків, доцільно

використовувати зважені методи оцінювання, серед яких найбільш поширеною є модель зваженої суми (Weighted Sum Model, WSM).

$$\text{Weighted Score}_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot S_{ij}, \quad (4.2)$$

де w_j – вага критерію j , причому сума всіх ваг дорівнює 1.

Наприклад, питома вага енергоефективності складає 20%, екологічних характеристик – 20%, економічної доцільності – 10%, рівня стійкості – 25%, принципів сталого розвитку – 15%, а критерій масштабованості оцінюється у 10%. Для приведення різнорідних критеріїв до єдиної шкали (від 0 до 1), впроваджується додатковий етап нормалізації оцінок.

$$S_{ij}^{norm} = \frac{S_{ij} - S_j^{min}}{S_j^{max} - S_j^{min}}, \quad (4.3)$$

де S_{ij}^{norm} – нормалізований показник альтернативи i за критерієм j ; S_{ij} – фактичне значення показника; S_j^{max} , S_j^{min} – максимальне та мінімальне значення показника за критерієм j серед усіх альтернатив.

Подібна логіка застосовується й в розрахунках показника енергетичної безпеки, де застосовується принцип ваги відповідних критеріїв як складових кінцевого показника. Насамперед для будівлі виконується стандартний енергетичний аудит (розрахунок енергопотреб, енергоспоживання, частки ВДЕ, коефіцієнтів теплопередачі, питомих витрат тощо) згідно з чинними нормативами, після чого кожному з обраних індикаторів присвоюється вага за шкалою бажаності (наприклад, через нормування до цільових і граничних значень).

Загальний показник енергетичної безпеки обчислюється шляхом зваженого середнього або іншої агрегуючої функції:

$$\text{Індекс енергетичної безпеки} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i, \quad (4.4)$$

де w_i – вага i -го компонента, s_i – оцінка i -го компонента.

Отримане число – це числовий показник у діапазоні від 0 до 1, де: 0 означає дуже низький рівень безпеки, а 1 – ідеальний рівень.

Використання подібного підходу сприяє об'єктивній оцінці та допомагає визначити оптимальний варіант серед альтернативних управлінських рішень. Пріоритет акцентовано на впровадженні екологічно чистих технологій та комплексу заходів для зниження екологічних ризиків у енергетичній сфері.

Проаналізовано шляхи оцінки найбільш популярних заходів із врахуванням ваг тих критеріїв, що на сьогодні є найбільш затребуваними і екологічно прийнятні. Серед них:

- *Підключення до мережі (національне електропостачання).* Централізований розподіл електроенергії дозволяє жити великі групи споживачів, але ця система вразлива до пошкоджень під час надзвичайних ситуацій, особливо в умовах війни;
- *Сонячні фотоелектричні системи (Photovoltaic, PV).* Забезпечують автономну генерацію електроенергії, особливо корисну при перебоях у мережі, але сильно залежать від погодних умов;
- *Вітрові мікротурбіни (міський масштаб).* Дозволяють локально виробляти енергію незалежно від загальної мережі, забезпечуючи автономність у разі аварій чи руйнувань;
- *Комбіноване виробництво тепла й електроенергії (Combined Heat and Power, CHP).* Генерує електроенергію та тепло одночасно, що підвищує ефективність і енергетичну незалежність;
- *Геотермальні теплові насоси.* Забезпечують стабільне опалення і охолодження за рахунок енергії ґрунту, відрізняються ефективністю і екологічністю;
- *Біомасові системи опалення.* Використовують місцеву органічну сировину для теплопостачання, дозволяючи заощаджувати енергію й зменшувати викиди;
- *Дизельні генератори (резервне живлення).* Швидко забезпечують резервне живлення для критичних об'єктів, але залежать від постачання пального;

- *Системи накопичення енергії на основі акумуляторів (Battery Energy Storage Systems, BESS).* Зберігають електроенергію для аварійних ситуацій, підвищуючи автономність та надійність об'єктів;
- *Водневі паливні елементи.* Забезпечують чисту енергію і сприяють розвитку автономної енергосистеми, але потребують модернізації інфраструктури;
- *Централізоване теплопостачання (у тому числі з відновлюваних джерел).* Дозволяє ефективно забезпечувати споживачів теплом, хоча залежить від стану мереж і котелень;
- *Інтеграція «розумних мереж» та управління попитом.* Забезпечує автоматизацію, підвищує ефективність розподілу енергії й знижує вразливість енергосистеми до аварій.

Незважаючи на курс України на декарбонізацію та європейські екологічні стандарти, невідновлювані джерела залишаються основою енергетичної системи, особливо у кризових обставинах, коли пріоритетом стає безпека споживачів, а не зменшення викидів. Газові електростанції забезпечують швидке балансування енергосистеми завдяки високій маневреності та ефективності, особливо під час зростання ролі нестабільних відновлюваних джерел. Вугільні потужності поступово скорочуються через значний негативний вплив на довкілля, а їх роль обмежується кризовими ситуаціями, зокрема війною, або піковими навантаженнями. Також є ймовірність використання ядерної енергетики. Вона забезпечує стабільність генерації з низьким рівнем вуглецевих викидів, проте потребує тривалих інвестицій і суворого дотримання стандартів безпеки, що визначає складність її впровадження у час активних воєнних руйнацій.

Проведений аналіз представлених на сьогодні 11-ти ключових технічних рішень для України базується на кількісних відкритих даних (таблиця 4.1), проте для точних розрахунків важливо враховувати множину змінних: локальні умови, масштаби проєктів, мережеву специфіку, субсидії, доступ до ресурсів і непередбачувані цінові коливання у воєнний період.

Отримані результати засвідчують суттєві відмінності у середньозваженій собівартості енергії (LCOE – Levelized Cost of Energy), капітальних (CAPEX – Capital Expenditures) та експлуатаційних (O&M – Operation and Maintenance) та ефективності використання потужності (CF – Capacity Factor). Коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) визначають по співвідношенню фактичного обсягу виробленої енергії за певний період до максимально можливого виробітку за умови безперервної роботи на номінальній потужності. В сучасних умовах особливо важливими є системи накопичення енергії (BESS) та smart grid-рішення, які разом з сонячними станціями і технологіями управління попитом на енергію (DSM – Demand-Side Management) дозволяють суттєво знизити використання дизельних генераторів і загальні витрати на резервне забезпечення.

Таблиця 4.1

Орієнтовне порівняння технічних рішень забезпечення енергетичної стійкості

Технології	Капітальні витрати на встановлену потужність (CAPEX, тис.грн/кВт)	Щорічні експлуатаційні та технічні витрати (%CAPEX/рік)	Коефіцієнт використання встановленої потужності (CF, %)	Орієнтовна собівартість електроенергії (LCOE, тис.грн/МВт)	Життєвий цикл (роки)
Підключення до мережі	~21	1–2%	50–60	1,68–2,52	–
Сонячні фотоелектричні системи	29,4–42	1–2%	12–15	2,31–2,94	25–30
Вітрові мікротурбіни	63–105	2–3%	20–25	3,78–5,04	20–25
Комбіноване виробництво тепла і електроенергії	50,4–84	4–6%	70–80	2,1–3,36	20–25
Геотермальні теплові насоси	50,4–84	2–3%	–	~1,68–2,52	20–25
Біоенергетичні системи опалення	33,6–63	3–5%	70–80	1,68–2,73	15–20
Дизельні генератори	12,6–25,2	10–15%	15–20	6,3–10,5	5–10
Системи накопичення енергії	14,7–21	1–2%	–	6,3–10,5	10–15
Водневі паливні елементи	126–210	3–5%	40–50	8,4–16,8	10–15
Централізоване тепlopостачання (з ВДЕ)	21–50,4	3–4%	50–70	1,68–2,94	25–30
«Розумні» мережі управління попитом	+5–15%	1–2%	–	–	20–25

Примітка: Для підключення до стаціонарної мережі враховано орієнтовні витрати на інфраструктуру та резервні лінії; витрати на системи керування попитом (smart grid) розраховані як доповнення до основних технологій; у міських умовах потужність вітрових мікротурбін зазвичай менша; тривалість експлуатації накопичувачів енергії визначається числом циклів і вартістю заряджання; потужність геотермальних систем і централізованих рішень наводиться для одиниць теплової енергії – кВт або МВт·год.

Джерело: Проведено на основі аналізу даних Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України [88], НКРЕКП [123], Європейської комісії (Joint Research Centre) [21], International Energy Agency (IEA, включаючи IEA–PVPS) [31], International Renewable Energy Agency (IRENA) [32], організації Hydrogen Europe [30], матеріалів Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) [44], статистики Global Petrol Prices [1].

Хоча початкові вкладення у PV та BESS є високими, для регулярного використання ці технології економічно переважають дизель–альтернативи, що підтверджують держстандарти та рекомендації. Водночас у воєнний період логістичні труднощі та ризики пошкоджень критично впливають на CAPEX і строк служби устаткування, тому при виборі рішень слід звертати увагу не лише на ціну, але й надійність, мобільність і швидкість розгортання систем. З огляду на це, доцільно впроваджувати комбінування розподілених PV, BESS і smart–контролю для громад, залишаючи дизель–генератори як резерв тільки для екстрених випадків; для масштабних проєктів із тепловими потребами ефективними лишаються когенераційні системи чи централізоване теплопостачання з використанням відновлюваної енергії.

Згідно з узагальненими дослідженнями щодо оптимізації систем ОВіК та використання автоматизованих систем керування будівлями, впровадження енергоефективних рішень (розумні BMS/EMS, оптимізація режимів HVAC, датчики присутності, керування з урахуванням погодних

умов, тощо) дає змогу зменшити енергоспоживання та відповідні витрати в середньому на 25–30% порівняно з традиційними інженерними системами [62]. Аналітика щодо поєднання сонячних панелей і теплових насосів визначає можливе скорочення споживання електроенергії з мережі на 30–50%, залежно від конфігурації системи. Застосування СЕС на житлових (зокрема багатоквартирних) будівлях показує, що за наявних площ та встановлених потужностей вони здатні покривати приблизно 10–30% річного електроспоживання, а для окремих кейсів багатоквартирних будинків становить приблизно 10% річної потреби [63, 61]. Дослідження глибоких енергетичних реновацій житлових будівель фіксують 30–80% зниження експлуатаційних енерговитрат, причому найбільший ефект дає саме покращення теплоізоляції огорожувальних конструкцій разом із модернізацією систем опалення та вентиляції [13].

Впровадження децентралізації енергопостачання дасть змогу до 2030 року збільшити частку відновлюваних джерел у системі теплопостачання до 40% [6]. Інтеграція IoT-систем моніторингу й керування (розумні лічильники, датчики присутності, автоматизовані BMS) дозволяє зменшити споживання енергії й операційні витрати будівель. Моделі прогнозування енергоспоживання, побудовані на основі IoT-даних і методів машинного навчання, досягають точності прогнозу близько 90% і вище (90–92% у реальних кейсах для будівель та локальних енергомереж) [55].

Згідно проведеного порівняння можна дійти висновку, що сонячні електросистеми мають високий потенціал для України, враховуючи середньорічну сонячну інсоляцію на рівні 1100–1500 кВт·год/м², що дозволяє ефективно використовувати цей ресурс для виробництва електроенергії. Централізоване теплопостачання може підвищувати свою ефективність завдяки інтеграції з біомасою, тепловими насосами чи ТЕЦ на основі відновлюваних джерел. Найшвидшим, але й найдорожчим способом аварійного енергопостачання залишаються дизельні генератори, які мають суттєву залежність від вартості й доступності пального. Більш стійким

рішенням є поєднання сонячних фотоелектричних станцій, систем акумуляції енергії та біомасових технологій, що забезпечує автономність та використання місцевих ресурсів. Водневі установки та паливні елементи наразі впроваджуються обмежено через високі витрати й недосконалу інфраструктуру, однак у майбутньому здатні стати ключовим елементом енергонезалежності країни. Сучасні smart-grid технології управління попитом стають дедалі важливішими, оскільки сприяють інтеграції ВДЕ та підвищують надійність і гнучкість енергетичних систем.

Запропонований підхід забезпечує комплексне порівняння альтернатив і дає можливість сформулювати стратегічно доцільні рекомендації для розвитку енергопостачання житлових будівель у містах. Практичне використання матриці оцінювання разом із навчанням муніципалітетів дасть змогу швидко обирати оптимальні сценарії у сфері енергетики: зібравши інформацію про потреби громади, можна порівнювати доцільність інвестування у різні технічні варіанти – акумуляторні системи, сонячні чи газові генератори, кооперацію виробників тощо, з урахуванням формальної оцінки ключових параметрів. Комплексний підхід обов'язково передбачає інтегровану оцінку технічних, економічних, екологічних і стратегічних показників, тоді як орієнтація на окремі аспекти (лише економічність чи технічна ефективність) вже не відповідає реаліям та загрозам нової енергетичної епохи.

На основі відповідних стратегій зеленої відбудови сформовано стратегічну дорожню карту обрання напрямків з енергомодернізації для широкого кола зацікавлених осіб та організацій. Систематизовано і згруповано описані технічні заходи, а також результати їх попередньої оцінки ефективності, вартості та впливу на стійкість енергосистеми будівель.

У результаті проведеного дослідження створено матрицю для оцінювання енергозабезпечення багатоквартирних будинків (таблиця 4.2), яка дозволяє обґрунтовано визначати пріоритетні напрямки та оптимально

розподіляти ресурси при впровадженні технічних рішень у кризових умовах.

Таблиця 4.2

Оціночна матриця технічних рішень енергозабезпечення
для житлових будівель у воєнний період

Технічне рішення	Критерій оцінки						Загальна сума балів
	Рівень пріоритету	Енергоефективність	Економічна ефективність	Масштабованість	Сталий розвиток	Стійкість	
Розумні мережі + управління попитом	5	5	4	5	5	5	29
Централізоване теплопостачання	4	5	4	4	5	5	28
Сонячні фотоелектричні системи	5	5	4	5	5	4	28
Системи накопичення енергії (акумулятори)	5	5	3	5	5	4	27
Геотермальні теплові насоси	5	5	3	3	5	5	26
Підключення до мережі	3	3	4	5	3	2	20
Вітрові мікротурбіни	3	4	3	5	3	2	20
Когенерація (виробництво тепла й електроенергії)	3	4	4	4	3	2	20
Водневі паливні елементи	2	5	1	2	5	5	20
Дизель-генератори	4	2	2	5	1	5	19
Біомасові системи опалення	2	3	3	3	3	3	17

Примітка: У таблиці 4.2 усі технічні рішення оцінені за 5-бальною шкалою (1 – найнижчий, 5 – найвищий бал) за шістьма критеріями:

1. пріоритетність (оцінка за стратегічною доцільністю, користю та рівнем впровадження);
2. енергоефективність (відношення отриманої корисної енергії до витрат);
3. вартість (охоплює початкові, експлуатаційні й сервісні витрати);

4. масштабованість (простота застосування для різних типів житла і масштабів);
5. відповідність принципам сталого розвитку та екологічним стандартам (ESG/Green policy);
6. стійкість (здатність працювати під час криз – у воєнних, аварійних чи кліматичних умовах).

Стратегічна дорожня карта поділяє всі заходи енергомодернізації на три часові горизонти: короткострокову (0–2 роки), середньострокову (2–5 років) та довгострокову (5–15 років) перспективу, при цьому в кожному з блоків визначено цільовий стан енергосистеми (від «надзвичайної стійкості та базового доступу до енергії» до «повної інтеграції відновлюваних джерел енергії та відповідності стандартам ESG») і наведено перелік конкретних інструментів, які можуть бути реалізовані на відповідному етапі.

Короткострокова перспектива (0–2 роки)

- Цей блок карти описує дії в умовах криз та надзвичайних ситуацій: розгортання дизельних генераторів, встановлення дахових сонячних панелей із батареями, стабілізацію роботи електромережі, мобільні енергетичні установки та проведення енергоаудитів.

- Порядок роботи карти: у першу чергу обираються заходи, що забезпечують негайну стійкість і резервне живлення, а результати енергоаудитів використовуються як вхідні дані для формування наступних етапів модернізації.

Середньострокова перспектива (2–5 років)

- У цьому блоці передбачено масштабування децентралізованих рішень: сонячні електростанції (СЕС) з системами накопичення (BESS), модернізація будівель для підвищення енергоефективності, інтеграція геотермальних теплових насосів, технології реагування на попит, когенераційні системи та пілотні проєкти централізованого опалення на біопаливі чи інших ВДЕ.

- Карта задає послідовність: спочатку на основі аудитів відбираються будівлі й об'єкти з найбільшим потенціалом економії, далі впроваджуються проєкти з генерації та накопичення, а також цифрові рішення керування попитом, що зменшують залежність від центральних мереж і підвищують автономність.

Довгострокова перспектива (5–15 років)

- Останній блок фокусується на досягненні повної стійкості та енергетичної незалежності: повна інтеграція відновлюваних джерел енергії та впровадження оновлених будівельних норм із використанням європейських стандартів.

- На цьому етапі карта працює як рамка узгодження локальних проєктів із загальним Європейським зеленим курсом та ESG: всі попередні технічні рішення консоліднуються в єдину гнучку, декарбонізовану енергосистему для будівель та міської інфраструктури.

4.3. Аналіз впливу глобальних ризиків на прийняття управлінських рішень за методологією PESTEL

Науково обґрунтована оцінка ризиків енергетичної безпеки є визначальним етапом формування стратегії розвитку стійкості енергетичного сектору, оскільки ідентифікація, аналіз і системний розрахунок ризиків безпосередньо впливають на вибір пріоритетних напрямів модернізації та ресурсного забезпечення.

Для ідентифікації зовнішніх чинників, що впливають на розвиток енергетичного сектору, у дослідженні застосовано методологію PESTEL-аналізу. Це стратегічний інструмент аналізу макросередовища, що дозволяє системно оцінити вплив зовнішніх політичних, економічних, соціальних, технологічних, екологічних і правових факторів на розвиток організації, галузі чи регіону. Кожен вимір розбитий на набір ключових показників ризику і структурований за оцінкою ризику та заходами з його мінімізації.

Ваги кожного з вимірів PESTEL нормувалися на шкалі від 0 до 1 для забезпечення порівняльного аналізу.

Взаємозв'язки між факторами енергетичної безпеки PESTEL для України наведені у вигляді кореляційної матриці (таблиця 4.3), де чітко видно, що політичні та економічні компоненти мають найвищі коефіцієнти впливу через військові та фінансові потрясіння (0,85). Технологічні ризики також демонструють щільний зв'язок із політичними (0,80), економічними (0,82) і нормативними факторами (0,77) внаслідок пошкодження інфраструктури й кібербезпеки. Соціальні аспекти, так само як і екологічні умови, взаємопов'язані насамперед із впливом енергетичних криз на здоров'я та добробут населення (0,72). Правова складова, хоча й менш корельована, залишається фундаментальною для підтримки сталості функціонування системи, що підкреслює комплексний, системний характер ризиків для енергетичної безпеки України.

Таблиця 4.3

Кореляція між глобальними факторами ризику енергетичної безпеки в Україні.

Фактори	Політичний	Економічний	Соціальний	Технологічний	Екологічний	Правовий
Політичний	1	0,85	0,70	0,80	0,65	0,75
Економічний	0,85	1	0,78	0,82	0,68	0,70
Соціальний	0,70	0,78	1	0,76	0,72	0,69
Технологічний	0,80	0,82	0,76	1	0,75	0,77
Екологічний	0,65	0,68	0,72	0,75	1	0,60
Правовий	0,75	0,70	0,69	0,77	0,60	1

Таблиця демонструє зміну ваги фактору, у залежності від впливу інших факторів. Це допомагає відслідковувати зміну власної ваги, та відповідно силу їх впливу на прийняття рішень. Для розгляду та порівняння впливу ризиків на енергетичні технологічні рішення нами було використано метод MCDA (багатокритеріальний аналіз рішень).

Оцифровані дані були отримані з результатів досліджень та офіційної статистики таких джерел:

1) урядові міністерства України – Міністерство енергетики України, Міністерство охорони здоров'я України, Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України;

2) державні установи та регуляторні органи – Національна комісія, що здійснює держрегулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, Державна служба статистики України;

3) державні компанії – Національна енергетична компанія «Укренерго», публічне акціонерне товариство «Укргідроенерго»;

4) неурядові організації (NGO) – Dixi Group (український аналітичний центр, який спеціалізується на прозорості й реформуванні енергетичного сектору), Eсоaction – центр екологічних ініціатив, Ініціатива з обліку парникових газів під час війни;

5) компанії приватного сектору – ДТЕК (Донбаська паливно–енергетична компанія), Top Lead (стратегічний контент– та дата–агентство);

6) академічні та наукові установи і асоціації – Київська школа економіки (KSE), Energy Map (українська енергетична аналітична платформа), Біоенергетична асоціація України;

7) міжнародні організації – Світовий банк, Європейська Комісія, ПРООН, ОБСЄ, Секретаріат Енергетичного співтовариства.

Частота та важливість кожного ризику аналізувались за допомогою шкали оцінки від 1 до 5 і для перетворення балів у відсоткові ваги використовувалася така формула:

$$W_{weight,i} = \frac{S_{core,i}}{\sum_{n=i}^i S_{core,i}} \cdot 100\% , \quad (4.5)$$

де $W_{weight,i}$ – вага ризику ; $S_{core,i}$ – оцінка важливості.

Для прикладу продемонстрували розрахунок запропонованих зелених технологічних рішень за вагою їх впливу на фактори PESTEL:

- 1) Децентралізовані енергосистеми (сонячні панелі + акумулятори, провадження енергетичних кооперативів).
- 2) Термомодернізація (вікна, двері, покриття, стіни, фундамент).
- 3) Розумні технології (Інтеграція IoT–датчиків, моніторинг споживання програмати на основі ШІ).
- 4) Законодавча підтримка (зобов'язання, заохочення і часткова фінансова підтримка споживачів енергії).

Результат розрахунку впливу прийнятих екологічних заходів на фактори PESTEL продемонстровано у таблиці 4.4.

Найбільшу комплексну вагу мають рішення у сфері децентралізації енергосистеми та термомодернізації – вони зміцнюють відразу ряд напрямів, які потребують нагального вирішення. У свою чергу розумні технології та сильна законодавча підтримка є важливими більше для довгострокової стійкості, тож їх впровадження наразі підтримується менше.

Таблиця 4.4

Вплив екологічних рішень на фактори PESTEL

Рішення	Політичний	Економічний	Соціальний	Технологічний	Екологічний	Правовий
Децентралізовані енергосистеми	0,9	0,85	0,8	0,9	0,85	0,7
Термомодернізація	0,7	0,8	0,9	0,8	0,85	0,75
Розумні технології	0,75	0,75	0,7	0,9	0,8	0,7
Законодавча підтримка	0,8	0,7	0,85	0,7	0,8	0,95

Наразі зелені технології демонструють високі показники за всіма складовими PESTEL–оцінки, однак загальна ефективність управлінських рішень залежить від регулярного оновлення таких оцінок, адже вагомість окремих факторів змінюється з часом під впливом політичних, технологічних чи суспільних трансформацій. Постійний моніторинг та прогнозування дозволяють адаптувати стратегії та забезпечувати сталий розвиток навіть в умовах динамічних змін.

Висновки до розділу 4

1. Сформовано поетапну методику оцінки енергетичної безпеки будівель, що включає підготовку, збір та аналіз даних, розрахунок енергетичних показників, розробку заходів і подальший моніторинг, що дозволяє перетворити поняття «енергетична безпека» з декларативної категорії на вимірюваний інтегральний індикатор для конкретного об'єкта чи заходу.

2. Запропоновано та розроблено концепцію нового управлінського підходу до оцінювання енергетичної безпеки будівлі, що включає дослідження енергетичних характеристик будівель (аналітичні, розрахункові, емпіричні методи), проведення моніторингу, розробку рекомендацій, запровадження аргументованих заходів та подальший огляд отриманого ефекту.

3. Новий управлінський підхід ґрунтується не просто на оцінці енергетичної безпеки будівлі, та безпосереднього впровадження заходів по її покращенню, вона також включає розрахунок екологічної прийнятності рішень а також адаптацію до кризових умов та воєнних загроз майбутнього.

4. Підвищення енергетичної безпеки будівель потребує скоординованої взаємодії державних органів, територіальних громад, виробників енергії, енергоменеджерів і кінцевих споживачів, оскільки саме узгодження регуляторних, технологічних та поведінкових рішень дозволяє досягти системного ефекту в управлінні енергоспоживанням, що формує основу сучасного інтегрованого підходу до забезпечення енергетичної безпеки.

5. Продемонстровано можливість інтеграції методів MCDA (багатокритеріального аналізу рішень) і PESTEL аналізу для ранжування заходів та сценаріїв зеленого відновлення за комплексом технічних, економічних, соціальних та екологічних критеріїв, що розширює

інструментарій прийняття рішень для органів влади, інвесторів і місцевих громад. Згідно ваги критеріїв на сьогодні альтернативні джерела енергії та інші зелені технології є найбільш прийнятними з огляду майбутнього України, чого не можна сказати про тимчасові заходи, такі як використання дизельних генераторів.

6. Застосування запропонованої системи показників і аналітичних процедур дозволяє не лише оцінити поточний рівень енергетичної безпеки конкретної будівлі, а й визначити пріоритетні напрями інвестицій, очікуваний ефект від термомодернізації та децентралізації енергопостачання, забезпечуючи практичну основу для проєктування сценаріїв прагматичного й амбітного відновлення житлового фонду України.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовані в роботі підходи управління енергозабезпеченням, впровадження відновлюваних джерел енергії та підвищення рівня енергоефективності житла сприяють зниженню викидів парникових газів та забезпечують мінімізацію негативного впливу на довкілля, що в комплексі сприяє досягненню низки цілей сталого розвитку: сталий розвиток міст і громад, запобігання енергетичній бідності, енергонезалежні громади, енергомодернізація міської інфраструктури, відповідальне енергоспоживання, енергоекоменеджмент, використання чистої енергії та місцевих видів палива.

2. Запропонований комплексний методичний підхід поєднує аналітичні, розрахункові та експериментальні методи дослідження для забезпечення науково обґрунтованої та достовірної оцінки рівня енергетичної безпеки. Аналітична складова базується на енергетичних аудитах, аналізі енергобалансів та показників енергоефективності, надійності енергопостачання, ризиків та сценаріїв. Розрахункові методи передбачають застосування енергетичного моделювання з використанням спеціалізованих програмних комплексів (EnergyPlus, TRNSYS, DesignBuilder тощо). Експериментальна складова включає довготривалий моніторинг енергетичних параметрів та інструментального обстеження будівель шляхом тепловізійної зйомки, blower-door тестів, вимірювання температур, вологості, повітрообміну і локальних теплових потоків.

3. Розроблено алгоритм дослідження теплообмінних процесів багатоповерхових будівель, який складається з підготовчого етапу, збору даних, оцінки енергоефективності, розробки заходів енергобезпеки, що включають як дослідження на стадії проєкту (теплові потоки у конструкціях, паспорт енергоефективності, вологісний стан конструкції, виявлення точок роси), так і дослідження існуючих об'єктів завдяки засобам візуального обстеження або енергомоніторингу, а також моніторинг енергоспоживання

та змін екологічних параметрів, зокрема питомих викидів парникових газів, параметрів мікроклімату, вологісного стану конструкцій і ризиків біологічного пошкодження.

4. Представлений комплексний управлінський підхід енергомодернізації будівель забезпечує скорочення викидів різними способами: завдяки утепленню, модернізації HVAC й налагодженню систем досягається 15–30% зменшення споживання енергії та відповідне зменшення викидів CO₂; додаткові 10% економії додають запропоновані системи енергоменеджменту; локальна генерація та накопичення зеленої енергії дозволить покривати до 10–30% попиту, а пріоритизація матеріалів із низькою втіленою енергією та рецикльованим вмістом зменшує втілений вуглець у матеріалах ще на 10%; розумні технології на базі IoT здатні прогнозувати споживання до 90% точності та скоротити час вирішення проблем у 2 рази; систематичний моніторинг може знизити час окупності заходів з 15 до 10 років.

5. Запропоновані методичні рекомендації, стратегії, робочі моделі та методики підвищення енергетичної безпеки багатоповерхових будівель враховують ризики і поєднують стратегії енергонезалежності з урахуванням принципу «відбудувати краще, ніж було». Рекомендації включають децентралізацію енергопостачання, впровадження розумних технологій моніторингу і перерозподілу енергії, BIM проектування, технології відслідковування стану будівель енергоменеджерами, підготовку до аварійних ситуацій, термомодернізацію та пошук альтернативних джерел енергії, фінансову підтримку з боку держави та пошук міжнародних джерел фінансування, а також об'єднання споживачів у групи для кращого реагування на загрози та для зменшення фінансових витрат.

6. Набула подальшого розвитку стратегія енергомодернізації багатоповерхових будівель на основі обґрунтованих амбітних або прагматичних сценаріїв, що забезпечує зниження показників викидів CO₂ на 60–70% або на 30–40% до 2050 року, зниження втрат у мережах до 12% у

2032 році, а безпосереднє енергоспоживання до 56–92 кВт·год/м²/рік, також можливе часткове збереження водних ресурсів на 20-23%.

7. Обґрунтовано перспективи використання моніторингових систем на базі штучного інтелекту, що дає змогу у реальному часі автоматично збирати дані з численних сенсорів щодо споживання тепла, електроенергії, води, а також контролювати параметри мікроклімату, якість повітря та рівень забруднень. Додатково до стандартної сенсорної мережі запропоновано інтегрувати тепловізори та дрони, що дозволяє дистанційно та оперативно виявляти конструкційні дефекти і фіксувати «гарячі точки» підвищених втрат енергії.

8. Доповнено стратегію моніторингу енергоспоживання будівель екологічними показниками: обсяг викидів парникових газів, питомі витрати енергії та води, частку відновлюваних джерел, показники якості внутрішнього середовища (концентрації CO₂, твердих частинок, летких органічних сполук, а також тепловий, світловий та акустичний комфорт користувачів), аналіз життєвого циклу будівлі, оцінка екологічності застосованих матеріалів та обсягу втіленої енергії в конструкціях, стану довкілля навколо об'єкта (якість повітря, шум, стан ґрунтів і води) та ймовірності екологічних загроз як від самої будівлі (ризик аварій, локального забруднення, надмірних викидів), так і від суміжних інфраструктурних чи промислових об'єктів, що дає змогу комплексно оцінювати енергетичну безпеку будівель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Global Petrol Prices. Ukraine electricity prices. – 2025. – Режим доступу: http://www.globalpetrolprices.com/Ukraine/electricity_prices/. – Дата звернення: 28.09.2025.
2. 10 трендів Cleantech у 2023 році: технології для зменшення викидів і протистояння змінам клімату [Електронний ресурс] // Офіс сталих рішень. – 2023. – Режим доступу: <https://ukraine-oss.com/10-trendiv-cleantech-u-2023-roczy-tehnologiyi-dlya-zmshennya-vykydiv-i-protystoyannya-zminam-klimatu/>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.
3. 31 рік енергетичної (не)залежності: як Україна протистоїть залежності від російських ресурсів [Електронний ресурс] // Speka. – 2023. – Режим доступу: <https://speka.media/31-rik-energetichnoyi-nezaleznosti-yak-ukrayina-protistoyit-zaleznosti-vid-rosiiskix-resursiv-py0nxv>, вільний. – Дата звернення: 02.09.2023.
4. 45 Years of Success for the Weatherization Assistance Program [Електронний ресурс] // National Association for State Community Services Programs (NASCSPP). – Режим доступу: <https://nascsp.org/45-years-of-success-for-the-weatherization-assistance-program/>. – Дата звернення: 18.06.2025.
5. Babut R. Implementation of the Polish energy efficiency policy in housing sector – related health and well-being benefits and threats [Електронний ресурс] : presentation at IEA Roundtable «Capturing the Multiple Benefits of Energy – Health & Well-being Impacts», Copenhagen, 19 April 2013. Polish National Energy Conservation Agency (КАРЕ). – 2013. – Режим доступу: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/279/Session5RomanBabut.pdf>. – Дата звернення: 18.06.2025.
6. Bioenergy in Ukraine until 2030: analysis of the National Renewable Energy Action Plan // UABIO – Ukrainian Bioenergy Association : вебсайт. – 2025. – Режим доступу: <https://uabio.org/en/materials/16524/>. – Дата звернення: 11.02.2024.

7. Bloem H., Kona A., Maschio I., Rivas S. Methodologies for energy performance assessment based on location data: Proceedings of the workshop, Ispra, 12–14 September 2016 [Электронный ресурс] // JRC Technical Report. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2016. – doi:10.2791/16681. – Режим доступа: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/aa273b09-c680-11e6-a6db-01aa75ed71a1>. – Дата звращения: 28.09.2025.

8. Building back better: 6 investment criteria to drive a sustainable reconstruction of Ukraine’s built environment [Электронный ресурс] / ВПИЕ (Buildings Performance Institute Europe). – Brussels, 2024. – 44 p. – Режим доступа: <https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2024/02/FINAL-Reconstruction-of-Ukraine.pdf>. – Дата звращения: 18.06.2025.

9. Building renovations and life cycle assessment: A scoping literature review / O. Fahlstedt, F. N. Rasmussen, M. Temeljotov Salaj, A. BJORHEIM, A. BRUNSGAARD, L. BRAGANÇA, S. PAIHO, A. SÄYNÄJOKI, A. ZAFRA, R. P. CHACÓN. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 203, Article 113040. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124005008>. – Дата звращения: 11.02.2024.

10. China leads global wind turbine manufacturers’ market share in 2023 [Электронный ресурс] // Wood Mackenzie. – 2024. – Режим доступа: <https://www.woodmac.com/press-releases/2024-press-releases/global-wind-oem-marketshare/>. – Дата звращения: 11.02.2024.

11. Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonisation [Электронный ресурс] / Directorate-General for Financial Stability, Financial Services and Capital Markets Union. – 02.02.2022. – Режим доступа: https://finance.ec.europa.eu/publications/eu-taxonomy-complementary-climate-delegated-act-accelerate-decarbonisation_en. – Дата звращения: 18.06.2025.

12. Danyliuk M. M., Dmytryshyn M. V. Зелене будівництво у досягненні сталого регіонального розвитку // The Actual Problems of Regional Economy Development. – 2020. – Вип. 1.16. – С. 153–162.

13. Deep energy retrofits using different retrofit materials under different scenarios: Life cycle cost and primary energy implications // Energy. – 2023. – Vol. 281, Article 128080. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544223015256>. – Дата звернення: 11.02.2024.

14. Draft Ukraine Recovery Plan. Materials of the “Energy security” working group [Електронний ресурс]. – Kyiv, July 2022. – 156 с. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/eng/energy-security-eng.pdf>. – Дата звернення: 05.01.2025.

15. Energy Optima 3 [Електронний ресурс] : modular decision support software for economic and sustainable optimization of integrated energy systems. – Energy Opticon AB. – Режим доступу: <https://energyopticon.com/en/energy-optima-3/>. – Дата звернення: 28.09.2025.

16. EnergyPlan [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://energyplan.com.ua/>. – Дата звернення: 15.03.2024

17. EnergyPlus™ [Електронний ресурс] : building energy simulation software. – National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy. – Режим доступу: <https://energyplus.net/>. – Дата звернення: 28.09.2025.

18. Enhance Energy Efficiency of the Housing Stock in Ukraine through Energy Performance Certificate Using of the Swiss Tool PETRA [Електронний ресурс] : final report / M. Mobiglia, M. Belliardi, I. Curto та ін. – Canobbio : ISAAC–SUPSI ; Kyiv : Ukrainian Public-Private Partnership Development Support Center ; JurEnergConsulting, 2017. – 34 р. – Режим доступу: <https://www.repic.ch/wp-content/uploads/2020/07/Enhance-Energy-Efficiency-of-the-Housing-Stock-in-Ukraine-through-Energy-Performance-Certificate.pdf>. – Дата звернення: 28.09.2025.

19. European Commission, Joint Research Centre. Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management in the European Union [Електронний ресурс]. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2024. – 164 p. – Режим досту-пу: <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/publications/report-sustainable-management-construction-and-demolition-waste> (JRC135470). – Дата звернення: 28.09.2025.

20. European Commission. REPowerEU Plan [Електронний ресурс] // EUR-Lex. – 2022. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

21. European Commission. Towards resilient energy networks in Europe: Policy report (аналітична доповідь). Brussels: Publications Office of the European Union, 2023.

22. FMI Fachverband Mineralwolleindustrie e.V. Mineral wool insulation (medium bulk density range). Environmental Product Declaration EPD-FMI-20210019-IBG1-EN. – Berlin: Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 2021. – 24 p. – Режим доступу: <https://www.isover-tehniskalizolacija.lv/documents/vides-deklaracija-epd/epd-101-08-1006-mineralwool-medium-density-en.pdf>. – Дата звернення: 11.02.2024.

23. Galvin R. Thermal upgrades of existing homes in Germany: The building code, subsidies, and economic efficiency [Електронний ресурс]. CSERGE Working Paper EDM 09-11. Norwich: University of East Anglia, The Centre for Social and Economic Research on the Global Environment, 2009. Режим доступу: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/48808/1/613129539.pdf>. Дата звернення: 18.06.2025.

24. Gervasio H., Dimova S. Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings. EFIResources: Resource Efficient Construction towards Sustainable Design. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018. 110 p.

(EUR 29123 EN). ISBN 978-92-79-79973-0. DOI: 10.2760/10016. URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC110082/report_d1_online_final.pdf. – Дата звернення: 11.02.2024.

25. Hajiyeva V. Autonomous hybrid power plants based on renewable energy and traditional sources: system design and efficiency // International Journal of Health and Applied Science. – 2025. – Vol. 3, Iss. 4. – doi: 10.5281/zenodo.15382361. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://healthappsci.com/index.php/pub/article/download/18/32> (дата звернення: 30.09.2025).

26. Hammond, G., & Jones, C. Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy (ICE). A BSRIA Guide. – Bracknell: BSRIA, 2011. – Режим доступу: <https://greenbuildingencyclopaedia.uk/wp-content/uploads/2014/07/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf>. – Дата звернення: 11.02.2024.

27. Himeur, Y., Ghanem, K., Alsalemi, A., Bensaali, F., & Amira, A. (2021). "Artificial Intelligence based Anomaly Detection of Energy Consumption in Buildings: A Review, Current Trends and New Perspectives". *Energy*, 226, 119406. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119406>

28. Holovko I., Haug C. Rebuilding Ukraine. Principles of a green post-war reconstruction [Електронний ресурс]. – Berlin: adelphi consult GmbH, 2023. – Режим доступу: <https://greendealukraina.org/assets/images/literature/14-rebuilding-ukraine-adelphi-january-2023-final.pdf>, вільний. – Дата звернення: 21.07.2023.

29. How did Ukraine synchronize with the EU's power system, and why is it important for the country's energy security? [Електронний ресурс] // USAID Energy Security Project (ESP). – 21.03.2023. – Режим доступу: <https://energysecurityua.org/news/how-did-ukraine-synchronize-with-the-eu-s-power-system-and-why-is-it-important-for-the-country-s-energy-security/>. – Дата звернення: 04.02.2025.

30. Hydrogen Europe. Hydrogen Europe official website. – 2025. – Режим доступу: <http://hydrogeneurope.eu>. – Дата звернення: 28.09.2025.
31. International Energy Agency. IEA Data and Statistics. Energy Prices. – Paris: IEA, 2025. – Режим доступу: <http://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-prices>. – Дата звернення: 28.09.2025.
32. International Renewable Energy Agency. International Renewable Energy Agency official website. – 2025. – Режим доступу: <http://www.irena.org>. – Дата звернення: 28.09.2025.
33. Iyengar S., Lee S., Irwin D., Shenoy P., Weil B. WattScale: A Data-driven Approach for Energy Efficiency Analytics of Buildings at Scale / S. Iyengar, S. Lee, D. Irwin, P. Shenoy, B. Weil // ACM Transactions on Data Science. – 2020. – Т. 1, № 1. – С. 1. – DOI: 10.1145/3406961. – URL: <https://arxiv.org/abs/2007.01382>.
34. Kanafani, K., Magnes, J., Lindhard, S. M., & Balouktsi, M. Carbon emissions during the building construction phase: A comprehensive case study of construction sites in Denmark. Sustainability, 2023, 15(14), 10992. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/su151410992>. – Дата звернення: 11.02.2024.
35. Kaplun V., Kuznetsova E. High energy efficiency retrofits of residential buildings [Електронний ресурс] // Metallurgical & Mining Industry. – 2017. – Т. 7. – Режим доступу: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/5Kaplun-V..pdf>, вільний. – Дата звернення: 08.12.2024.
36. KredEx – Estonia [Електронний ресурс] // Renovate Europe. – 2019. – Режим доступу: <https://www.renovate-europe.eu/reday/reday-2019/online-resources/kredex-estonia-p13/>. – Дата звернення: 18.06.2025.
37. KredEx launches Soviet-era apartment block refurbishment scheme [Електронний ресурс] // ERR News. – Режим доступу: <https://news.err.ee/1223236/kredex-launches-soviet-era-apartment-block-refurbishment-scheme>. – Дата звернення: 18.06.2025.

38. Kupiec M; Pienkowski P. Contemporary effects of post-war urban reconstruction in the German-Polish border region as lessons for Ukrainian reconstruction processes // *European Research Studies Journal*. – 2023. – Vol. 26, No. 3. – P. 593–601.

39. Kuusk K., Kalamees T. nZEB retrofit of a concrete large panel apartment building [Електронний ресурс] // *Energy Procedia*. – 2015. – № 78. – С. 985–990. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215017701/pdf?md5=b929f2fd7b1b497622b4770827120b69&pid=1-s2.0-S1876610215017701-main.pdf>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

40. Magrini A., et al. From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge – The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example [Електронний ресурс] // *Developments in the Built Environment*. – 2020. – Т. 3. – Article 100019. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100019>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

41. Martínez J.L.R., et al. Heat-loss measurement using infrared thermography by multi-threshold analysis // *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 218. Article No. 120925. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431125020253>. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.120925

42. Methodological Basis and Calculation Model for the Forecast of Creation of up to 2 Million Green Jobs in Ukraine [Електронний ресурс]. – Київ: NGO «Living Planet», 2024. – 6 с. – Режим доступу: https://livingplanet.org.ua/a/annex_8.pdf. – Дата звернення: 05.01.2025.

43. Moore T., Morrissey J., McLeod R. Modelling the through-life costs and benefits of detached zero carbon homes in the UK. *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 69. P. 351–361. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.10.027.

44. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Multidisciplinary Digital Publishing Institute official website. – 2025. – Режим доступа: <http://www.mdpi.com>. – Дата звернення: 28.09.2025.

45. National Energy and Climate Plan for the period until 2030 (NECP) [Електронний ресурс] : approved by Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine від 25.06.2024 р. № 587-р. – Київ, 2024. – 196 с. – Режим доступу: <https://me.gov.ua/download/2cad4803-661e-4ae9-9748-3006d6eb3e1c/file.pdf>. – Дата звернення: 05.01.2025.

46. Netherlands [Електронний ресурс] // Global Buildings Performance Network (GBPN). – 18.10.2013. – Режим доступу: <https://library.gbpn.org/library/rp-detail-pages/netherlands>. – Дата звернення: 18.06.2025.

47. Netherlands: Energy efficiency trends and policies [Електронний ресурс] // ODYSSEE-MURE. – Режим доступу: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-trends-policies-profiles/netherlands.html>. – Дата звернення: 18.06.2025.

48. Neuhoff K., Amecke H., Novikova A., Stelmakh K. Thermal Efficiency Retrofit of Residential Buildings: The German Experience [Електронний ресурс]. Climate Policy Initiative, 2011. CPI Report. 13 р. Режим доступу: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/65868/1/Policies-Supporting-Thermal-Efficiency-in-Germanys-Building-Sector.pdf>. Дата звернення: 18.06.2025.

49. Outcome Document of the Ukraine Recovery Conference URC2022: «Lugano Declaration», Lugano, 4–5 July 2022 [Електронний ресурс]. – ReliefWeb, 05.07.2022. – Режим доступу: <https://reliefweb.int/report/ukraine/outcome-document-ukraine-recovery-conference-urc2022-lugano-declaration-lugano-4-5-july-2022>. – Дата звернення: 04.02.2025.

50. Papanikos, G. T. Energy Security, the European Energy Union and the Mediterranean Countries [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу:

[http://www.atiner.gr/gtp/Papanikos%20\(2015\)–Energy%20Security.pdf](http://www.atiner.gr/gtp/Papanikos%20(2015)–Energy%20Security.pdf), вільний. – Дата звернення: 03.09.2023.

51. Parliament backs boost for renewables use and energy savings [Електронний ресурс] // European Parliament. – 2022. – Режим доступу: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220909IPR40134/parliament-backs-boost-for-renewables-use-and-energy-savings>, вільний. – Дата звернення: 21.07.2023.

52. Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F., & Bastidas-Arteaga, E. Sustainable design of reinforced concrete structures through CO2 emission optimization. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 139(8), 109–131.

53. Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate [Текст] / J. Jokisalo, J. Kurnitski // *Energy and Buildings*. – 2007. – Vol. 39, No. 2. – P. 236–247. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778806001861?via%3Dihub>. – Дата звернення: 28.09.2025.

54. Piotrowska–Woroniak J., et al. The impact of thermo–modernization and forecast regulation on the reduction of thermal energy consumption and reduction of pollutant emissions into the atmosphere on the example of prefabricated buildings [Електронний ресурс] // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, Issue 8. – P. 2758. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/en15082758>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

55. Rahman, A., Hossain, S., Ahmed, S., Ahmed, M. T. IoT Based Smart Energy Consumption Prediction for Home Appliances // *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*. – 2025. – Vol. 17, No. 2. – P. 111–121. – DOI: 10.5815/ijieeb.2025.02.06. – Режим доступу: <https://www.mecs-press.org/ijieeb/ijieeb-v17-n2/IJIEEB-V17-N2-6.pdf>. – Дата звернення: 11.02.2024.

56. Rajkiewicz A. Thermomodernization Fund and other support instruments for building renovation in Poland [Електронний ресурс] :

presentation at RoundBaltic 4th Learning Event, 10 November 2022. National Energy Conservation Agency (NAPE). – 2022. – Режим доступу: https://roundbaltic.eu/wp-content/uploads/2022/11/4th-LE-10.11.-NAPE_RoundBaltic.pdf. – Дата звернення: 18.06.2025.

57. Rebuilding Ukraine with a Resilient, Carbon-Neutral Energy System [Електронний ресурс] / United Nations Economic Commission for Europe. – Geneva : UNECE, 2023. – 144 р. – Режим доступу: https://unece.org/sites/default/files/2023-07/EN_Rebuilding%20Ukraine%20with%20a%20Resilient%20Carbon-Neutral%20Energy%20System_V8.pdf. – Дата звернення: 05.01.2025.

58. REPowerEU: план швидкого зменшення залежності від російського викопного палива та прискорення «зеленого» переходу [Електронний ресурс] // Державна агенція з енергоефективності та енергозбереження України. – 2022. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/uk/news/4220>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

59. Schroderus S., et al. Impacts of building energy retrofits on energy consumption: Swedish multi-family buildings // Energy and Buildings. – 2025. – Vol. 298. – Article 113330. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.113330. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778825011430> (дата звернення: 30.09.2025).

60. Seghier T.E., Lim Y.-W., Harun M.F., Ahmad M.H., Samah A.A., Majid H.A. BIM-based retrofit method (RBIM) for building envelope thermal performance optimization // Energy and Buildings. – 2022. – Т. 256. – 111693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111693>.

61. Sigrin, B., Mooney, M. Rooftop Solar Technical Potential for Low-to-Moderate Income Households in the United States : technical report NREL/TP-6A20-70901. – Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2018. – 74 р. – Режим доступу: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70901.pdf>. – Дата звернення: 11.02.2024.

62. Smart Building Energy Management: Proven Strategies That Cut Costs by 30% // Build-News.com : вебсайт. – 2025. – Режим доступу: <https://www.build-news.com/energy-management-and-efficiency/smart-building-energy-management-proven-strategies-that-cut-costs-by-30/>. – Дата звернення: 11.02.2024.
63. Solar Panels & Heat Pumps: Optimising Energy Efficiency // Green Central : вебсайт. – 2025. – Режим доступу: <https://www.greencentral.co.uk/solar/solar-panels-heat-pumps/>. – Дата звернення: 11.02.2024.
64. Sovacool B. K., Brown M. A. Competing Dimensions of Energy Security: An International Perspective // Environment and Resources. – 2010. – Vol. 35. – Pp. 77–108.
65. Stubbe R., Bilek P., Ficara T., Weser H., Kirchner R. Designing a suitable Emissions Trading System for Ukraine: squaring EU convergence, price certainty and competitiveness [Електронний ресурс] : Policy Proposal Series PPr/01/2024. – Berlin–Kyiv : Low Carbon Ukraine, BE Berlin Economics GmbH, 2024. – 31 р. – Режим доступу: <https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/Designing-a-suitable-ETS-for-Ukraine-Policy-Proposal.pdf>. – Дата звернення: 04.02.2025.
66. THERM 6.2/WINDOW 6.2 Research Version User Manual [Електронний ресурс]. – Available at: <https://escholarship.org/content/qt4rx784fq/qt4rx784fq.pdf> (дата звернення: 29.09.2025).
67. Transition of Ukraine to the Renewable Energy by 2050: Results of Modeling of the Reference and Alternative Scenarios for the Development of Ukraine’s Energy Sector [Електронний ресурс] / O. Diachuk, M. Chepeliev, R. Podolets, G. Trypolska та ін. ; за ред. Y. Oharenko, O. Aliieva. – Kyiv : Heinrich Boell Foundation Regional Office in Ukraine ; State Organization “Institute for Economics and Forecasting” of the NAS of Ukraine, 2017. – 88 с. – Режим доступу:

https://ua.boell.org/sites/default/files/transition_of_ukraine_to_the_renewable_energy_by_2050_1.pdf. – Дата звернення: 11.02.2024.

68. Tsarenko A. Overview of Electricity Market in Ukraine [Електронний ресурс] : Working Paper WP 1/2007. – Kyiv : Center for Social and Economic Research – CASE Ukraine, 2007. – 26 p. – Режим доступу: <https://case-ukraine.com.ua/content/uploads/2020/09/Overview-of-Electricity-Market-in-Ukraine-2.pdf>. – Дата звернення: 04.02.2025.

69. Ukraine Energy Profile [Електронний ресурс] // International Energy Agency (IEA). – 2022. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

70. Who's banning fossil fuel boilers? [Електронний ресурс] // European Heat Pump Association (EHPA). – Режим доступу: <https://ehpa.org/news-and-resources/news/whos-banning-fossil-fuel-boilers/>. – Дата звернення: 18.06.2025.

71. Whole life carbon assessment for the built environment: Professional standard, global. 2nd ed., September 2023, Version 3, effective from 1 July 2024. London: Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS), 2023. 198 p. Режим доступу: https://www.rics.org/content/dam/ricsglobal/documents/standards/Whole_life_carbon_assessment_PS_Sept23.pdf. Дата звернення: 28.09.2025.

72. World Bank. Special Focus: Residential Gas and District Heating Tariffs in Ukraine [Електронний ресурс]. – 7 Oct. 2013. – 4 p. – Режим доступу: <https://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/document/Ukraine-Oct2013-Focus-en.pdf>. – Дата звернення: 04.02.2025.

73. Агентство з енергозбереження України. Оновлені дані щодо виконання програми енергетичної ефективності України [Електронний ресурс] // Державне агентство з енергозбереження України. – 2023. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/uk/news/4767>, вільний. – Дата звернення: 02.09.2023.

74. Андрієнко В. В. Моделювання техногенних впливів на об'єкти будівництва [Електронний ресурс] / В. В. Андрієнко, Л. М. Духновський, В. М. Калинюк. – Наукові праці НІС, 2022, № 185. – С. 22–28. – Режим доступу: https://journal-niisk.com/index.php/scienceandconstruction/article/view/185?utm_source=chatgpt.com. – Дата звернення: 29.03.2024.

75. Безлюбченко О. С., Апатенко Т. М., Бабенко М. В. Концептуальні ідеї відродження міст України // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Стратегія розвитку міст: молодь і майбутнє (інноваційний ліфт): поствоєнна розбудова». – Харків, 2023. – С. 6–10.

76. Білик А. С. Екологічний та економічний аналіз життєвого циклу каркасів будівель: монографія. – Київ : УЦСБ, КНУБА, ТОВ «7БЦ», 2022. – 263 с. – Режим доступу: <https://uscc.ua/uploads/page/images/publications/economic/lifecicle.pdf>. – Дата звернення: 28.09.2025.

77. Білоус І. Ю. Оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси / Білоус Інна Юріївна. – Київ, 2019. – 22 с.

78. Болгарова Н.М. Моделювання процесів теплообміну при проектуванні енергоефективних будинків // Енергоінтеграція–2018: матеріали восьмої Міжнародної науково-практичної конференції, 25–27 квітня 2018 р. Київ: КНУБА, 2018. С. 56.

79. Бондаренко Ю. Ю., Ральченко С. П. Енергоаудит будівлі – крок на шляху до енергозаощадження / за заг. ред. О. Ю. Березіної, Ю. В. Ткаченка // Глобальне партнерство в парадигмі сталого розвитку: освіта, технології, інновації : монографія. – Черкаси : Черкаський державний технологічний університет, 2017. – С. 464–474. – 524 с.

80. Василенко В. І., Ремізов І. А. Особливості побудови інтелектуальних енергетичних систем будівель та споруд // Збірник матеріалів VI Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'19". – 2019. – С. 21–22. – Місце проведення: Київ, 2019. – Режим доступу: <http://rems.kpi.ua/proc/article/view/172978/172763>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

81. Вілінська Л. М., Бурлак Г. М., Гурська А. В. Енергоефективність багатоквартирного житлового будинку // Український журнал будівництва та архітектури. – 2023. – Т. 3, № 015. – С. 28–33.

82. Гамоцький Р. О. Енергетична безпека будівель в архітектурі відновлення України // 4-та Міжнародна науково-практична конференція «Філософія науки, техніки і архітектури в гуманістичному вимірі», 10–11 листопада 2023 року, КНУБА.

83. Гетун Г. В., Румянцев Б. М., Жуков А. Д. Системи ізоляції будівельних конструкцій: навчальний посібник / Гетун Г. В., Румянцев Б. М., Жуков А. Д. – Дніпро: Видавництво «Журфонд», 2016. – 676 с.: іл.

84. ДБН В.2.2–15–2019. Житлові будинки. Основні положення [Чинний від 01.12.2019]. Вид. офіц. – Київ: Мінрегіон України, 2019. – 42 с.

85. ДБН В.2.5–67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування [Текст] : [чинний від 01.01.2014] / Мінрегіон України. – Вид. офіц. – Київ, 2013. – 240 с.

86. ДБН В.2.6–31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. – Чинний від 2021–10–01. – Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. – 87 с.

87. Декарбонізація та диверсифікація джерел енергії: приклад Італії [Електронний ресурс] // Офіс Сталих Рішень. – 2023. – Режим доступу: <https://ukraine-oss.com/dekarbonizacziya-ta-dyversyfikacziyi-dzherel-energiyi-pryklad-italiyi/>, вільний. – Дата звернення: 02.09.2023.

88. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності) [Електронний ресурс] : офіційний вебсайт. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/>. – Дата звернення: 28.09.2025.

89. Дерій В. О. Тенденції розвитку систем централізованого теплопостачання України [Електронний ресурс] // Проблеми загальної енергетики. – 2021. – Вип. 1(64). – С. 52–59. – Режим доступу: http://jnas.nbuiv.gov.ua/j-pdf/PZE_2021_1_8.pdf. – Дата звернення: 04.02.2025.

90. Дешко В. І., Суходуб І. О., Сердечний П. Ю. Використання енергетичного моделювання будівель при розробці проектів з підвищення енергоефективності [Текст] / В. І. Дешко, І. О. Суходуб, П. Ю. Сердечний // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2019. – № 4 (136). – С. 86–96.

91. Дешко В. І., Шовкалюк М. М., Кузьміна Ю. С. Оцінювання енергетичних показників для нових житлових будівель в Україні з урахуванням соціальних аспектів // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. – № 1. – С. 29–37. – Бібліогр.: 30 назв.

92. Дикий Б., Глушченко А. Сучасний стан розвитку зеленого будівництва України в контексті завдань сталого розвитку ЄС // The 1st International scientific and practical conference «Modern research in science and education» (September 14–16, 2023). – VoScience Publisher, Chicago, USA, 2023. – С. 352.

93. Директива (ЄС) 2018/2001 Європейського Парламенту та Ради від 11 грудня 2018 р. про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел (переглянута) [Електронний ресурс] // Офіційний вісник Європейського Союзу. – 2018. – L 328. – С. 82–209. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>. – Дата звернення: 04.02.2025.

94. Директива (ЄС) 2018/2002 Європейського Парламенту та Ради від 11 грудня 2018 р., що вносить зміни до Директиви 2012/27/ЄС про енергоефективність [Електронний ресурс] // Офіційний вісник Європейського Союзу. – 2018. – L 328. – С. 210–230. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L2002>. – Дата звернення: 04.02.2025.

95. Додаток 1 до Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року. Визначення кількісних цілей для термомодернізації фонду будівель [Електронний ресурс]. – Київ: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. – 6 с. – Режим доступу: https://mtu.gov.ua/files/2.1._%D0%94%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BA_1.pdf. – Дата звернення: 05.01.2025.

96. Додаток 6 до Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року. Очікувані довгострокові результати Стратегії [Електронний ресурс]. – Київ: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. – 2 с. – Режим доступу: https://mtu.gov.ua/files/2.6._%D0%94%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BA_6.pdf. – Дата звернення: 05.01.2025.

97. Дребот О., Височанська М., Білотіл В. Удосконалення організаційного механізму щодо розвитку «зеленого» житлового будівництва на прикладі сільських селітебних територій // Вісник аграрної науки. – 2023. – № 101.7. – С. 60–71.

98. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. – Чинний від 01.03.2023. – Київ : Мінрегіон України, 2022. – 78 с.

99. ДСТУ EN 15232–1:2017. Енергоефективність будівель. Частина 1. Вплив автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями. – [Чинний від 2018–01–01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 38 с.

100. ДСТУ ISO 15686-1:2020. Будівлі та об'єкти нерухомого майна. Планування строку експлуатації. Частина 1. Основні принципи та методологія (ISO 15686-1:2011, IDT). – Чинний від 01.08.2022. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021.

101. Екодія. (2025). Звернення громадськості до уряду з проханням виділити у 2025 році кошти на фінансування діяльності ДУ «Фонд енергоефективності». Екологічна ініціатива. URL: https://ecoaction.org.ua/zvernennia-ee-koshty.html?utm_source=chatgpt.com. – Дата звернення: 15.03.2024.

102. Енергетична стратегія України до 2050 року [Електронний ресурс]. – Київ: Міністерство енергетики України, 2022. – Режим доступу: <https://mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya>. – Дата звернення: 05.01.2025.

103. Жива планета. (2023, квітня 13). Стандартизовані методи оцінювання енергоефективності, екологічних характеристик та вартості життєвого циклу для громадських будинків і споруд. ВГО «Жива планета». URL: <https://livingplanet.org.ua/novuny/standartizovani-metodi-otsinyuvannya-energoefektivnosti-ekologichnikh-kharakteristik-ta-vartosti-zhitteвого-tsiklu-dlya-gromadskikh-budinkiv-i-sporud>, вільний. – Дата звернення: 08.12.2024.

104. Закон України «Про ратифікацію Паризької угоди» від 14 липня 2016 р. № 1469-VIII [Електронний ресурс] // Відомості Верховної Ради України. – 2016. – № 35. – Ст. 595. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1469-19#Text>. – Дата звернення: 04.02.2025.

105. Зварич Р. Післявоєнна зелена реконструкція України // Інноваційні процеси економічного і соціально-культурного розвитку: вітчизняний та зарубіжний досвід : тези доповідей XVI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених і студентів / Західноукраїнський національний університет. – Тернопіль : ЗУНУ, 2023. – С. 118–119.

106. Зелена відбудова житлового сектору Бучі / VE Berlin Economics GmbH, Центр екологічних ініціатив «Екодія», iS Ukraine. – Берлін, 2024. – 97 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2024/03/bucha-report-ua-final2024s.pdf> (дата звернення: 30.09.2025).

107. Ільєнко А. С. Енергетична безпека України: сутність, загрози та механізми регулювання [Електронний ресурс] // Modern Engineering and Innovative Technologies. – 2019. – № 4. – С. 61–66. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32838/2663-6468/2019.4/11>, вільний. – Дата звернення: 02.01.2023.

108. Кліщун М. Ю. Аналіз способів підвищення енергоефективності житлових будинків // Наукові розробки молоді на сучасному етапі. – 2017. – С. 580–581. – Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища. Техногенна безпека та теплообмінні процеси. – УДК 620.9:725.

109. Козик В. В., Марущак У. Д., Марко О. Й. Оцінка енергоефективності в життєвому циклі об'єктів житлового будівництва [Текст] // Бізнес Інформ. – 2024. – № 5. – С. 201–207. – Режим доступу: https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2024-5_0-pages-201_207.pdf. – Дата звернення: 28.09.2025.

110. Конеченков А. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни [Електронний ресурс] / за ред. В. Омельченка // Центр Разумкова. – 11.11.2022. – Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/statti/sector-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>. – Дата звернення: 04.02.2025.

111. Кориневич А. О. Участь України в Договорі про заснування Енергетичного Співтовариства: перспективи і зобов'язання в енергетичній сфері [Електронний ресурс] // Актуальні проблеми міжнародних відносин. – 2011. – Вип. 100, ч. 1. – С. 69–77. – DOI: 10.17721/apmv.2011.100.1. – Режим доступу: <http://apir.iir.edu.ua/index.php/apmv/article/view/1677>. – Дата звернення: 04.02.2025.

112. Котковський В. С., Москаленко В. Г., Дробчак А. Л. «Зелене» відновлення як шлях післявоєнної відбудови України / Збірник наукових праць Одеського національного економічного університету. – 2023. – № 7–8 (308–309). – С. 26–33. – DOI:10.32680/2409–9260–2023–7–8–308–309–26–33. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://n-visnik.oneu.edu.ua/collections/2023/308–309/pdf/26–33.pdf> (дата звернення: 30.09.2025).

113. Кравченко О., Сергієнко Л., Немешчук Г., Маматов А., Чикаренко І. Post-war Recovery Practices for Ukraine, based on the Experience of other Countries that have Undergone Similar Processes [Електронний ресурс] // Economic Affairs. – 2023. – Vol. 68, No. 04. – С. 2277–2288. – Режим доступу: https://ep3.nuwm.edu.ua/28803/1/Olha_Kravchenko%20...%20%282023%29%20Post_war%20Recovery%20Practices%20for%20...%20zak.pdf, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

114. Кривомаз Т., Гамоцький Р. Диверсифікація енергетичних ризиків житлових багатоповерхових будівель за допомогою альтернативних джерел енергії [Електронний ресурс] // Наука та будівництво. – 2024. – № 4(38). – С. 64–71. – Режим доступу: <https://doi.org/10.33644/2313–6679–4–2023–9>, вільний. – Дата звернення: 02.01.2023.

115. Литвин В., Хренова–Шимкіна І., Гончарук О. та ін. Посібник енергоменеджера [Електронний ресурс] / В. Литвин, І. Хренова–Шимкіна, О. Гончарук та ін. – ТОВ «АК–ГРУП», 2021. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/static-objects/saee/sites/1/Files/Energoefektyvnist/posibnyk-enerhomenedzhera.pdf>. – Дата доступу: 15.03.2024.

116. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель : ДСТУ Б В.2.6–189:2013. – [Чинний від 2014–01–01]. – К. : Укрархбудінформ, 2013. – 89 с. – (Національний стандарт України).

117. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель : ДСТУ Б В.2.6–189:2013. – [Чинний від 2014–01–01] / Мінрегіонбуд

України. – Київ : Укрархбудінформ, 2013. – 89 с. – (Національний стандарт України).

118. Методика визначення енергетичної ефективності будівель [Електронний ресурс] : затв. наказом Мінрегіону України від 11.07.2018 № 169. – Офіц. вид. – Режим доступу: <https://apicf.dtki.ua/documents/download/pdf/1227.1636.1>. – Дата звернення: 28.09.2025.

119. Мінрегіон: Будинки втрачають до 50% тепла [Електронний ресурс] // 24 Канал. – 2012. – Режим доступу: https://24tv.ua/economy/minregion_budinki_vtrachayut_do_50_tepla_n185170. – Дата звернення: 04.02.2025.

120. Моделювання трансмісійних тепловтрат за допомогою програмного комплексу TEMPER [Електронний ресурс] / А.Г. Ліпчанський, С.В. Аврамчук // Автоматизація в енергетиці, газовому господарстві та інженерії будівель : науковий журнал. – 2025. – № 108. – С. 135–143. – Режим доступу: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/334429/323573> (дата звернення: 29.09.2025).

121. Музиченко М. В. Місце і роль диверсифікації постачання енергоносіїв у системі забезпечення енергетичної безпеки ЄС [Електронний ресурс] // Світове господарство і міжнародні економічні відносини. – 2017. – № 21. – С. 15–18. – Режим доступу: http://bses.in.ua/journals/2017/21_2017/5.pdf, вільний. – Дата звернення: 03.09.2023.

122. На шляху до будівель з нульовими викидами: оновлені правила енергоефективності в ЄС [Електронний ресурс] // Dixi Group. – Режим доступу: https://dixigroup.org/comment/na-shlyahu-do-budivel-z-nulovymy-vykydamy-onovleni-pravyly-energoefektyvnosti-v-yes/?utm_source=chatgpt.com, вільний. – Дата звернення: 15.03.2024.

123. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Взято з джерела: Офіційний вебсайт

НКРЕКП. – 2025. – Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua>. – Дата звернення: 28.09.2025.

124. Панченко Є. Г., Самойленко А. О. Енергетична безпека України в умовах російської агресії (2014–2023 рр.). – Київ: КНЕУ; MRU, 2023. – С. 192–195.

125. Пащенко П. О., Ткаченко Н. Е., Ткач М. Є. Діагностика системи управління проектами енергозбереження в інноваційно орієнтованих організаціях в умовах глобалізації / П. О. Пащенко, Н. Е. Ткаченко, М. Є. Ткач // Підприємництво, торгівля та біржова діяльність. – 2024. – № 6 (24). – С. 124–134.

126. Пилипенко Н. А. Імплементация світового досвіду побудови еко-міст як модель післявоєнного відновлення українських міст // Сталий розвиток авіаційної інфраструктури України: колективна монографія. – Львів: Ліга–Прес, 2023. – С. 268–284. – Режим доступу: <https://er.nau.edu.ua/bitstreams/77e711db-b16a-4e10-84a0-e7e37e5497ec/download>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

127. План відновлення України. Матеріали робочої групи «Будівництво, містобудування, модернізація міст та регіонів України» [Електронний ресурс]. – Проект. – Київ : Кабінет Міністрів України, Липень 2022. – 292 с. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/construction-urban-planning-modernization-of-cities-and-regions.pdf>. – Дата звернення: 28.09.2025.

128. Плоский В. Визначення приведенного опору теплопередачі стінових конструкцій // Автоматизація в енергетиці, газовому господарстві та інженерії будівель. – 2024. – № 107. – С. 83–90. – Режим доступу: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/307921> (дата звернення: 29.09.2025).

129. Плоский В. О., Гетун Г. В., Мартинов В. Л., Сергейчук О. В., Віроцький В. Д., Запривода В. І., Кріпак В. Д., Лавріненко Л. І., Малишев О.

М. Архітектура будівель та споруд. Книга 4. Технічна експлуатація та реконструкція будівель: Підручник для вищих навчальних закладів / Плоский В. О., Гетун Г. В., Мартинов В. Л. та ін. – Кам’янець–Подільський: Видавництво «Рута», 2018. – 750 с. : іл.

130. Покроковий план енергоефективної відбудови в Україні [Електронний ресурс]. – Київ: Міжнародний фонд «Відродження», 2025. – Режим доступу: <https://www.irf.ua/pokrokovyj-plan-energoefektyvnoyi-vidbudovy-v-ukrayini/>. – Дата звернення: 05.01.2025.

131. Посібник з енергетичної ефективності будівель [Електронний ресурс] : навчально-практичний посібник / за ред. Асоціації з відновлюваної енергетики та енергоефективності (АРПІ). – Київ, б. р. – Режим доступу: https://arpi.org.ua/images/resource/publications/Guidebook_Energy_ukr.pdf. – Дата звернення: 28.09.2025.

132. Посібник з оцінки викидів парникових газів, пов’язаних із конфліктами [Електронний ресурс]. – Київ : Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2025. – 64 с. – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2025/03/otsinka-vykydiv-posibnyk2025s.pdf>. – Дата звернення: 28.09.2025.

133. Постол Ю. О., Гулевський В. Б., & Постол О. О. (2024). Підвищення енергоефективності житлового сектору. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, 24(2), 121–129. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-10>.

134. Процишин В. Проблемні аспекти функціонування «зеленої» енергетики в Україні // *Актуальні питання фінансової теорії та практики: Збірник матеріалів Десятої заочно–дистанційної наукової конференції студентів і молодих вчених, м. Тернопіль, ЗУНУ, 26 квітня 2023 р. – Ч. 1. – Тернопіль: ЗУНУ, 2023. – С. 181–183.

135. Пшибельський В. Війна та енергетична безпека: виклики для паливно–енергетичної сфери України [Електронний ресурс] // REBUILD

UKRAINE: справа всього цивілізованого світу. – 2023. – С. 162–168. – Режим доступу: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/22241/1/162-168.pdf>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

136. Рекомендації для органів місцевого самоврядування з впровадження енергоефективних заходів на рівні територіальних громад [Електронний ресурс] / USAID. – Режим доступу: https://decentralization.ua/uploads/attachment/document/1120/Recommendations_on_Energy_Efficiency_Measures_in_Municipalities.pdf, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

137. Рішення Ради Міністрів Енергетичного Співтовариства від 30 листопада 2021 р. № 2021/14/МС–ЕпС «Щодо зобов’язань сторін з імплементації четвертого енергетичного пакета ЄС». – 2021.

138. Розвиток ВДЕ до 2030 року: цілі ЄС та плани України [Електронний ресурс] // Dixi Group. – Режим доступу: <https://dixigroup.org/comment/rozvytok-vde-do-2030-roku-czili-yes-ta-planu-ukrayiny/>, вільний. – Дата звернення: 02.09.2023.

139. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни [Електронний ресурс] // Центр Разумкова. – 2023. – Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/statti/sector-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viynu>, вільний. – Дата звернення: 02.09.2023.

140. Серікова О. М.; Іванов С. Зелене будівництво як фактор екологічної безпеки урбанізованих територій // PROGRESSIVE RESEARCH IN THE MODERN WORLD. Proceedings of X International Scientific and Practical Conference. – Boston, USA, 22–24 June 2023. – С. 151–154.

141. Суходоля О. М. Фактори впливу на енергоефективність національної економіки / О. М. Суходоля // Вісник Національної академії державного управління при Президентіві України. – 2005. – № 1. – С. 236–247.

142. Теплова енергетика у ЖКГ: стан та перспективи : аналітичний звіт [Електронний ресурс] / Мінрегіон України, 2016. – 56 с. – Режим доступу: <https://www.slideshare.net/ZubkoGennadiy/ss-60508544>. – Дата звернення: 04.02.2025.

143. Термографічна камера testo 881: Технічний паспорт [Електронний ресурс] / Testo AG. – Режим доступу: <https://www.instrumart.com/assets/testo-881-data-sheet.pdf> (дата звернення: 29.09.2025).

144. Тимошенко О. А., Тимошенко Л. О., Іонченкова А. Д. Принципи зеленої післявоєнної відбудови України // Тези доповідей Всеукраїнського науково-практичного форуму "Переможемо – відбудуємо!". – 29–30 червня 2022 р., м. Дніпро. – 2022. – С. 96.

145. Токунова А. Засоби забезпечення енергетичної безпеки Федеративної Республіки Німеччина як досвід для України [Електронний ресурс] // Юридичний вісник. – 2015. – № 1. – С. 168–172. – Режим доступу: http://yurvisnyk.in.ua/v1_2015/32.pdf, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

146. Федонюк С. В. Енергетична політика Європейського Союзу [Електронний ресурс] // Електронний конспект лекцій. – 2022. – Режим доступу: https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/20948/1/Enerhet_polityka%20EU.pdf, вільний. – Дата звернення: 02.09.2023.

147. Федорук М. І. Енергетичний паспорт житлових і громадських будівель як інструмент екологічної політики міст // Науковий вісник Херсонського державного університету. Сер.: Економічні науки. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 105–108.

148. Фесенко Т. Г., Фесенко Г. Г. Проєкти зеленого будівництва Кракова: пошук кращих практик для відбудови України [Електронний ресурс] // Матеріали XXVI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми екологічної безпеки», м. Харків, 24 травня 2023 р. – Харків: НТУ

«ХПШ», 2023. – С. 171–173. – Режим доступу: <https://openarchive.nure.ua/bitstreams/5d048870-f3ef-435f-a9c5-82a38eb2c58e/download>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

149. Центр сприяння житловим та муніципальним реформам. (2025). Новини ЦСЖМР. Центр сприяння житловим та муніципальним реформам. URL: https://reformcenter.org.ua/news?utm_source=chatgpt.com. – Дата звернення: 29.07.2024.

150. Чернявський А., Литвин В., Марусич Д., Шишка К., Наскальний С. Тренінговий посібник для підготовки енергоаудиторів багатоквартирних житлових будівель у контексті Фонду енергоефективності України [Електронний ресурс] / А. Чернявський, В. Литвин, Д. Марусич, К. Шишка, С. Наскальний. – Режим доступу: https://eefund.org.ua/wp-content/uploads/2023/09/posibnyk_treningovyj-posibnyk-dlya-provedennya-energoaudytu_ukr.pdf?utm_source=chatgpt.com. – Дата доступу: 29.07.2024.

151. Чіткий сигнал діяти: новий звіт ІРСС щодо змін клімату [Електронний ресурс] // Екодія. – 2023. – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/chitky-syhnal-diaty-ipcc.html>, вільний. – Дата звернення: 02.01.2023.

152. Швець В. В.; Козак В. Ю. Розробка теорії енергоавтономності багатоповерхових будівель // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Інноваційні технології в будівництві, Вінниця", 10–12 листопада 2020 р. – Вінниця, 2020.

153. Шовкалюк М. М., Васильцов Д. А. Огляд засобів і методів для моніторингу енергоспоживання [Електронний ресурс] // Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference [Dnipro, Ukraine, 23–24 November 2023]. – 2023. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63401>. – Дата звернення: 15.03.2024.

154. Шовкалюк Ю. Інструменти для аналізу та моніторингу енергоспоживання будівель різних типів // Молодий вчений. – 2019. – № 1 (65). –

С. 291–295. – DOI: 10.32839/2304–5809/2019–1–65–67. – URL: <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/2018>.

155. Щербініна С. А., Жовнір Н. Н. Зарубіжний досвід реалізації заходів з підвищення енергоефективності житлового сектора економіки [Електронний ресурс] // Матеріали XV Міжнародної науково–практичної конференції «Multidisciplinary Academic Notes. Science Research and Practice», 19–22 квітня 2022 р., Мадрид, Іспанія. – С. 202–207. – Режим доступу: <https://books.google.com/books?hl=uk&lr=&id=CKRsEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA202&ots=6EQN–nGnFw&sig=yz1ERDjbqevNpueXPaK66wN1Tdk>, вільний. – Дата звернення: 11.02.2024.

156. Що пропонують для зеленого відновлення України [Електронний ресурс] // Green Deal Україна. – 2025. – Режим доступу: <https://greentransform.org.ua/shho–proponuyut–dlya–zelenogo–vidnovlennya–ukrayiny/>. – Дата звернення: 11.02.2024.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

а) статті в наукових виданнях, внесених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б» :

1. Гетун Г.С., Кошева В.М., **Гамоцький Р.О.**, Гончаренко А.О. Оцінка тепловтрат житлового будинку ЖК «Арт–квартал Співоче» // Управління розвитком складних систем. – 2020. – № 42. – С. 82–92. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.82-92>.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні оцінки тепловтрат огорожувальних конструкцій на основі поєднання термографії та квазістаціонарних розрахунків за фактичними даними експлуатації будинку ЖК «Арт–квартал Співоче».

2. Гетун Г.С., Кошева В.М., **Гамоцький Р.О.**, Гончаренко А.О. Вплив повітрообміну в приміщеннях на енергоефективність багатоквартирних житлових будинків // Енергоефективність в будівництві та архітектурі : наук.–техн. зб. / Київ. нац. ун–т буд–ва і архіт.; відп. ред. П.М. Куліков. – Київ : КНУБА, 2019. – Вип. 13. – С. 58–68. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.13.58-68>.

Особистий внесок здобувача полягає у виконанні чисельних розрахунків впливу параметрів повітрообміну на енерговитрати будинку, аналізі ефективності вентиляційних систем і формулюванні практичних рекомендацій.

3. Кривомаз Т.В., Чалий І.В., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.О., Циба А.М. Критерії ESG у зеленій відбудові України // Екологічна безпека та природокористування. – 2023. – Т. 48, № 4. – С. 5–20. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.5-20>.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні методичних засад

для оцінки екологічної ефективності відновлюваних проектів у межах ESG-підходу, аналізі впливу екологічних критеріїв на якість та стійкість будівельних рішень.

4. Кривомаз Т.В., **Гамоцький Р.О.** Диверсифікація енергетичних ризиків житлових багатоповерхових будівель за допомогою альтернативних джерел енергії // Наука та будівництво. – 2024. – Т. 38, № 4. – С. 64–71. – DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-9>.

Основний внесок здобувача полягає у моделюванні сценаріїв впровадження альтернативних джерел енергії для багатоповерхових будинків, аналізі їхньої ефективності й розробці практичних рекомендацій щодо децентралізованого енергозабезпечення.

5. Кривомаз Т.В., Ільченко І.О., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.**, Гетьман Є.Ю. Дослідження етапів розвитку інклюзивності побудованого середовища в Україні // Екологічна безпека та природокористування. – 2024. – Т. 50, № 2. – С. 6–18. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.6-18>.

Основний внесок здобувача полягає у аналізі нормативів інклюзивних рішень у забудові й міському середовищі.

6. Кривомаз Т.В., **Гамоцький Р.О.**, Циба А.М. Стратегії диверсифікації ризиків енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни // Екологічна безпека та природокористування. – 2025. – Т. 53, № 1. – С. 7–21. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.7-21>.

Особистий внесок здобувача полягає у моделюванні оптимальних структур децентралізованої енергогенерації для багатоповерхових будівель.

7. **Гамоцький Р. О.** Інтеграція екологічної безпеки в механізми протидії енергетичним загрозам житловим будівлям // Екологічна безпека та природокористування. – 2025. – Т. 4, № 4. – С. 43–56. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4>.

Особистий внесок здобувача полягає в дослідженні інтеграції

екологічної безпеки в механізми протидії енергетичним загрозам житловим будівлям і формуванні практичних рекомендацій для її реалізації.

8. **Гамоцький Р. О.** Технічні рішення забезпечення енергетичної стійкості будівель та громад під час війни // Техніка будівництва : науково-технічний журнал. Київ : КНУБА, 2025. № 43. С. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0614>.

Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні та розробленні комплексу технічних рішень, спрямованих на підвищення енергетичної стійкості будівель і громад в умовах воєнного стану.

б) статті у закордонних виданнях

9. Kryvomaz T., **Hamotskyi R.**, Tsyba A. Energy risks assessment and resilient strategies development considering the war in Ukraine // Journal of Science. – Lyon, 2025. – № 69. – P. 13–27. – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17046551>.

Основний внесок здобувача полягає у розробці моделей оцінки ризиків для багатопверхових житлових об'єктів, моделюванні систем децентралізованого енергопостачання за різних сценаріїв бойових дій.

10. Kryvomaz T., **Hamotskyi R.**, Tsyba A. (2025). The role of buildings thermographic monitoring in the environmental safety system. Modern engineering and innovative technologies, Issue 40, Part 1 – P. 132-137. DOI: 10.30890/2567-5273.2025-40-01-075
<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit40-01-075>.

Основний внесок здобувача полягає у обґрунтуванні екологічного значення тепловізійного моніторингу будівель та формуванні висновків щодо підвищення енергетичної та екологічної безпеки забудови.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. Жукова О.Г., **Гамоцький Р.О.** Оцінка екологічних ризиків при будівництві на урбанізованих територіях // Зелене будівництво : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції. – Миколаїв : Видавець

Торубара В.В., 2019. – 228 с. – С. 159–160.

Основний внесок здобувача полягає у обґрунтуванні рекомендацій щодо мінімізації екологічних ризиків.

12. Кривомаз Т.І., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С. Екологічні фактори ESG у зеленій відбудові України // Матеріали II Міжнародної науково–практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»), Київ, 13–14 квітня 2023 р. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ : КНУБА, 2023. – 607 с. – С. 118–122. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/materialy-konferenciyi-zelene-budivnytvo-2023.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні методичних засад для оцінки екологічної ефективності відновлюваних проектів у межах ESG-підходу, аналізі впливу екологічних критеріїв на якість будівельних рішень.

13. **Гамоцький Р.О.** Енергетична безпека будівель в архітектурі відновлення України // Філософія науки, техніки і архітектури в гуманістичному вимірі : матеріали 4-ї Міжнародної науково–практичної конференції, 10–11 листопада 2023 р. – Київ : КНУБА, 2023. – 192 с. – С. 80–84. – Режим доступу: <https://knuba.edu.ua/philosophy-2023>.

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні сучасних критеріїв енергетичної безпеки будівель при проектуванні та формуванні рекомендацій для архітектурних рішень в умовах відновлення.

14. Кривомаз Т.І., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С., Циба А.М., Старжинський П.В. Важливі напрямки відбудови України // Міжнародна науково–практична конференція «Екологія, ресурси, енергія», Київ, КНУБА, 23–24 листопада 2023. – С. 19–20. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/ere-2023.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у оцінці екологічних і енергетичних ризиків у напрямках відбудови України.

15. Кривомаз Т.І., Циба А.М., Ільченко І.С., **Гамоцький Р.О.** Технології захисту урбанізованого середовища у зеленій відбудові України

// Всеукраїнська науково–практична інтернет–конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України». Харків, 2–3 листопада 2023 р. – С. 240–243. – Режим доступу: <https://beketov.edu.ua/conference/urbosystems–2023.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні технологій захисту урбанізованого середовища, а саме впровадження екологічного моніторингу, застосування ресурсо– та енергоощадних рішень у будівництві з урахуванням сталого розвитку та інтеграції ESG–критеріїв.

16. **Гамоцький Р.О.**, Кривомаз Т.І. Децентралізація енергетики під час воєнних дій // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – С. 72–76. – 469 с. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/04/greenconstruction-2024.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у аналізі моделі децентралізації енергетики в умовах воєнних загроз та розробці пропозицій щодо впровадження автономних енергосистем у міському середовищі.

17. **Гамоцький Р.О.**, Кривомаз Т.І. Енергоефективне відновлення пошкодженого житлового фонду міських громад // Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: матеріали IX Міжнародного молодіжного конгресу, 28–29 березня 2024 р., Україна, Львів. – Київ: Яроченко Я. В., 2024. – С. 148. – 246 с. – ISBN 978–617–7826–43–8. – DOI: 10.51500/7826–43–8. – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/feb/33847/zbirnykixmizhnarodnyumolodizhnyykongres28-29032024fin.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у розгляді принципів енергоефективного відновлення пошкоджених житлових будівель та розробці сценаріїв оптимізації їх енергозабезпечення.

18. Кривомаз Т.І., **Гамоцький Р.О.**, Циба А.М., Ільченко І.С.

Диверсифікація ризиків енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни // Матеріали Міжнародної науково–практичної конференції «Енергія Ресурси Екологія» (Київ, 27–29 листопада 2024 р.). – Київ: КНУБА, 2024. – С. 105–106. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/ere-2024-ua.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у моделюванні та аналізі ризиків енергозабезпечення житлових багатоповерхових будівель.

19. Kryvomaz T.I., Tsyba A.M., **Hamotskyi R.O.** Climate aspects of ESG standards in the construction sector of Ukraine // Climate Services: Science and Education: Proceedings of the Second International Research-to-Practice Conference (Odesa, 16–18 April 2025). – Odesa : Odesa I.I. Mechnikov National University, 2025. – P. 40–41. – ISBN 978–966–186–334–6. – Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/1jXxm-ECGZBLd6kRG8NTyQkqN6GL-VhQD/view>.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці адаптивних критеріїв для практичної імплементації стандартів ESG.

20. **Гамоцький Р.О.**, Кривомаз Т.І. Досвід енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни в Україні // Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: X Міжнародний молодіжний конгрес, 27–28 березня 2025 р., Україна, Львів: Збірник матеріалів. – Київ: Яроченко Я. В., 2025. – С. 158. ISBN 978–617–7826–65–0. – DOI: [https://doi.org/10.51500/7826–65–0](https://doi.org/10.51500/7826-65-0). – Режим доступу: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2025/feb/38049/zbirnikhmi_zhnarodniymolodizhniykongres27-28032025fin.pdf.

Особистий внесок здобувача полягає у розгляді досвіду енергозабезпечення багатоповерхових будівель в умовах війни.

21. **Гамоцький Р.О.**, Кривомаз Т.І. Досвід українських міст у диверсифікації енергетичних ризиків // Збірник матеріалів IV Міжнародної науково–практичної конференції «Зелене будівництво–2025»: 9–11 липня

2025 р., Київ. – Київ: КНУБА, 2025. – С. 81–84. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/07/greenbuilding2025.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у розгляді прикладів диверсифікації енергетичних ризиків для міст України.

22. **Hamotskyi R.**, Kryvomaz T. Experience of Ukrainian cities in diversifying energy risks // Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference «Green Building–2025»: July 9–11, 2025, Kyiv. – Kyiv: KNUBA, 2025. – P. 53–56. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/07/greenbuilding2025-en.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у презентації досвіду українських міст та пошуку шляхів підвищення енергетичної незалежності.

23. Kryvomaz T., Tsyba A., **Hamotskyi R.** Digitization improve ESG and energy efficiency // Proceedings of the International Conference «European Green Dimensions: Fundamental, Applied, and Industrial Aspects», June 5–7, 2025, Mykolaiv. – Mykolaiv: PMBSNU, 2025. – P. 46. – Режим доступу: <https://pmbsnu.edu.ua/egd2025abstracts.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у аналізі впливу цифровізації на покращення ESG-показників та енергоефективності у будівельному секторі.

24. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.** Перспективи та ризики технологій відновлюваної енергії // V Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології», 20–21 травня 2025 р., Київ, КНУБА. – С. 138–141. – Режим доступу: http://esmt.knuba.edu.ua/?page_id=82.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні ризиків технологій відновлюваної енергії щодо їх інтеграції у міське середовище.

25. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.** Сучасні шляхи трансформації просторового розвитку міст // IV Міжнародна науково-практична конференція «Девелопмент нерухомості: інновації та

трансформації», 29–30 травня 2025 р., Київ. – С. 71–74. – Режим доступу: <https://gisut.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/CONFERENCE-PROCEEDINGS-2025.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає у аналізі сучасних шляхів трансформації просторового розвитку міст.

26. Кривомаз Т., Циба А., **Гамоцький Р.** Проблеми відновлення застарілого та зруйнованого житлового фонду / Міжнародна науково-практична конференція «Енергія Ресурси Екологія», Київ, КНУБА, 3–5 грудня 2025. – С.112–113. – Режим доступу: <https://fise.knuba.edu.ua/fise/ecology-resource-energy/>.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі проблем відновлення зруйнованого житлового фонду та його реновації.

27. Kryvomaz T., Tsyba A., **Hamotskyi R.** Problems of renovation of obsolete and destroyed housing / 5th International scientific and practical conference «Energy. Resources. Ecology», Kyiv, KNUCA, December 3–5, 2025. – P. 74–75. – Режим доступу: <https://fise.knuba.edu.ua/fise/ecology-resource-energy/>.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі проблем відновлення зруйнованого житлового фонду та його реновації.

28. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С. Екологічне управління та планування у зеленому будівництві: методичні вказівки до виконання тестових завдань з дисципліни «Екологічне управління та планування у зеленому будівництві». – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – 28 с.

29. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С. Зменшення вуглецевого сліду як механізм адаптації до змін клімату: методичні вказівки до виконання тестових завдань з дисципліни «Зменшення вуглецевого сліду як механізм адаптації до змін клімату». – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – 24 с.

30. Кривомаз Т.І., Циба А.М., **Гамоцький Р.О.**, Ільченко І.С. Розробка будівельних проєктів в узгодженні з категоріями стійкості зеленого будівництва: методичні вказівки до виконання тестових завдань з дисципліни «Розробка будівельних проєктів в узгодженні з категоріями стійкості зеленого будівництва». – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – 27 с.

31. Кривомаз Т., Циба А., **Гамоцький Р.**, Ільченко І. Методологія наукових досліджень: методичні вказівки до виконання тестових завдань з дисципліни «Методологія наукових досліджень». – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – 11 с.

32. Kryvomaz T., Tsyba A., **Hamotskyi R.** Opportunities for the Ukrainian construction business in the european green course // European Green Dimensions: Fundamental, Applied, and Industrial Aspects / eds. O. Mitryasova, C. Staddon. – Mykolaiv : PMBSNU ; Bristol : UWE, 2025. – 304 p. – P. 119–130.

33. Кривомаз Т.І., Циба А.М., Ільченко І.С., **Гамоцький Р.О.** Зелене будівництво у відновленні України // Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання : колективна монографія за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції «Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання», м. Київ, 18 жовтня 2023 року / за ред. В. П. Плавач, А. О. Касич, О. О. Бутенко. – Київ : КНУТД, 2024. – 308 с. – С. 11–13.

Листи підтримки дисертаційного дослідження

1)

АНДРУШКІВСЬКА СІЛЬСЬКА РАДА
ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

вул. Шкільна, 1 с. Андрушки 13543
e-mail: inbox@andrushkivska-gromada.gov.ua сайт: <https://andrushkivska-gromada.gov.ua/>
код згідно з ЄДРПОУ 04347232 UA218201720000324170000006745 МФО 820172 ДКСУ м. Київ

Довідка
апробації результатів дисертаційного дослідження
Гамоцького Романа Олеговича
«Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в зеленій
відбудові України»

Дана довідка засвідчує, що наукові результати дисертаційної роботи Гамоцького Романа Олеговича на тему «Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в зеленій відбудові України», виконаної в Київському національному університеті будівництва і архітектури на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 «Екологія», передано до Андрушківської територіальної громади.

Отримані наукові результати та практичні рекомендації були передані для подальшої оцінки та розгляду в роботі як науково-методична основа прийняття управлінських рішень щодо зеленої відбудови чи проектування багатоповерхової забудови громади, підвищення її енергетичної автономності, зниження витрат домогосподарств на енергоресурси та зменшення негативного впливу житлового фонду на навколишнє природне середовище.

Дана довідка не є підставою для виникнення будь-яких матеріальних зобов'язань, у тому числі щодо виплати премій чи інших винагород.

Сільський голова



Олена МАТКІВСЬКА

2)



ТОВ « АТЛАНТ БУД КОНСТРАКШН»
Україна, 02002, м. Київ,
вул. Микільсько-Слобідська, буд. 4Д, кв.4
телефон/факс: 067-218-83-83
Код ЄДРПОУ 42397637

Довідка

Про випробування результатів дисертаційної роботи Гамоцького Романа Олеговича «Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в зеленій відбудові України» для використання у проєктній, архітектурній, будівельній діяльності.

Отримані в дисертаційній роботі Гамоцького Р.О. наукові результати в розрізі досліджень енергоефективного будівництва, використання інноваційних систем моніторингу та управління енергетичним споживанням, зокрема, в сфері зеленого будівництва, розробки та можливі заходи з адаптації до змін клімату на проєктній стадії передані для використання в проєктній, архітектурній, будівельній діяльності при відновленні об'єктів на засадах «зеленого будівництва» на прикладі об'єктів ТОВ «АТЛАНТ БУД КОНСТРАКШН».

Директор



Максимцов В.А.

3)



м. Вишневе, вул. Київська, 12
тел.: , 0674493305, 0674493308

Код ЄДРПОУ 23874241, р/р UA 253052990000026003000131281 в АТ КБ „ПРИВАТБАНК” м.Вишневе.

Довідка.

Про апробацію результатів дисертаційної роботи Гамоцького Романа Олеговича «Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в зеленій відбудові України» для використання у будівельній компанії ТОВ "ФІРМА "БУДКОМПЛЕКТ".

Для прийняття управлінських рішень щодо міського планування при будівництві та реконструкції місцевості з метою підвищення енергетичної безпеки будівель та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище передано для апробації концепцію нової моделі моніторингових спостережень та розрахунків, яка базується на взаємозв'язках наявних математичних моделей та статистичних залежностях і даних. Отримана в дисертаційній роботі Гамоцького Р.О. модель управління дозволяє прогнозувати зміни енергетичної безпеки забудови внаслідок воєнних дій, змін клімату чи інших кризових явищ, а також оперативно обирати заходи, що відповідають зеленій відбудові України.

Директор



В.А.Осейков

4)



МОН
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

просп. Повітряних Сил, 31,
м. Київ, 03037
тел.: +38 (044) 241-55-60,
e-mail: knuba@knuba.edu.ua,
web: knuba.edu.ua
ЄДРПОУ 02070909

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

Гамоцького Романа Олеговича

«Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в зеленій
відбудові України»

Даний акт складено про те, що результати наукової дисертаційної роботи Гамоцького Романа Олеговича на тему «Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в зеленій відбудові України» впроваджено у навчальному процесі кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці КНУБА при підготовці студентів спеціальності 101 «Екологія», зокрема, при викладанні дисциплін: «Екологічне управління та планування у зеленому будівництві», «Зменшення вуглецевого сліду як механізм адаптації до змін клімату», «Розробка будівельних проектів в узгодженні з категоріями стійкості зеленого будівництва», «Методологія наукових досліджень». Проведено лекцію «Оцінка енергетичної безпеки багатоповерхових будівель в зеленій відбудові України» та видано ряд методичних вказівок за вказаними дисциплінами.

Даний акт не є підставою для будь-яких матеріальних зобов'язань, зокрема одержання премій та інших винагород.

Проректор
з навчально-методичної роботи

Ткаченко Тетяна. +380673533877.



Андрій ШПАКОВ

Додаток В

**Дані для розрахунку енергетичного
паспорту будівлі**

Нормативні показники для розрахунку згідно ДБН В.2.6–31:2016 «Теплова ізоляція будівель», ДСТУ Б В.2.6–189 «Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель», ДБН В.2.5–67 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», ДСТУ 9190:2022 «Енергоефективність будівель. Методологія визначення енергетичних витрат на опалення, кондиціонування, вентиляцію, освітлення та постачання гарячої води».

Таблиця В.1

Мінімально допустиме значення опору теплопередачі
огороджувальної конструкції житлових та громадських будівель (R_{qmin})

№ поз.	Вид огороджувальної конструкції	Значення R_{qmin} , м ² ·К/Вт, для температурної зони (рис. 2.21)	
		I	II
1	Зовнішні стіни	3,3	2,8
2	Суміщені покриття	6,0	5,5
3	Покриття опалювальних горищ (технічних поверхів) та покриття мансардного типу	4,95	4,5
4	Горищні перекриття неопалювальних горищ	4,7	4,3
5	Перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами	3,75	3,3
6	Світлопрозорі огороджувальні конструкції	0,75	0,6
7	Зовнішні двері	0,6	0,5

Таблиця В.2

Теплонадходження від людей, освітлення
та обладнання, значення за замовчуванням згідно

Призначення будівлі	Графік використання, год/тиждень	Метаболічна теплота, Вт/м ²	Освітлення, Вт/м ²	Обладнання, Вт/м ²
Одноквартирні будинки	112	1,2	2,0	2,0
Багатоквартирні будинки, гуртожитки	112	1,8	2,0	2,0

Таблиця В.3

Типові значення коефіцієнта загального пропускання сонячної енергії при нормальному куті падіння для поширених типів скління

Тип скління	g_n
1	2
Одинарне скління	0,85
Подвійне скління	0,75
Подвійне скління із селективним низько-емісійним покриттям	0,67
Потрійне скління	0,70
Потрійне скління з одним селективним низько-емісійним покриттям	0,58
Потрійне скління з двома селективними низько-емісійними покриттями	0,50
Подвійне скління з органічного скла для zenітних ліхтарів	0,90
Потрійне скління з органічного скла для zenітних ліхтарів	0,83

Таблиця В.4

Середньомісячна сонячна радіація за сторонами світу

Місяць року	I_{sol} , Вт/м ²							
	Пн	ПнСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗх	Зх	ПнЗх
Січень	13	14	21	38	50	40	22	14
Лютий	24	25	36	57	70	60	38	25
Березень	35	41	58	78	90	81	61	41
Квітень	39	53	77	92	92	88	73	52
Травень	56	79	104	110	101	107	99	77
Червень	67	88	111	110	96	106	105	86
Липень	61	83	108	109	98	106	104	81
Серпень	40	65	93	107	106	106	89	63
Вересень	29	41	70	91	102	91	66	41
Жовтень	19	22	38	62	75	61	37	21
Листопад	11	12	17	30	39	32	17	12
Грудень	9	9	14	27	35	28	15	9

Таблиця В.5

Національні значення для внутрішньої теплоємності

Клас	C , Вт·год/ (м ² ·К)	Деталізація
Дуже легкий	25	Каркасні будівлі зі стінами полегшеної конструкції – збірно–щитові, каркасно–засипні, каркасно–камишитові, дерев'яні тощо
Легкий	35	Будівлі зі стінами із монолітного шлакобетону, шлакоблоків, блоків з ніздрюватого бетону, черепашнику та інших дрібноштучних виробів із залізобетонними чи дерев'яними перекриттями
Середній	50	Будівлі великопанельні, великоблочні, з цегляними стінами товщиною в одну цеглу, із залізобетонними чи деревними перекриттями
Важкий	80	Капітальні будівлі з цегляними стінами товщиною (1,5–2 цеглини), із залізобетонними перекриттями
Дуже важкий	110	Особливо капітальні будівлі з кам'яними або цегляними стінами (товщиною в 2,5 – 3,5 цеглини), із залізобетонним чи металевим каркасом, із залізобетонним перекриттям

Таблиця В.6

Питомі річні енергопотреби ГВП

Тип будівлі	кВт·год/м ²
Одноквартирні будинки	15
Багатоквартирні житлові будівлі, гуртожитки	20
Громадські будівлі адміністративного призначення, офіси	10
Будівлі учбових закладів	10
Будівлі дитячих дошкільних закладів	15
Будівлі закладів охорони здоров'я	30
Готелі* (на 10 % більше для кожної зірочки)	25
Ресторани	60
Спортивні заклади	80
Будівлі закладів гуртової та роздрібної торгівлі	10
Будівлі культурно–розважальних закладів та дозвільних установ	10
Інші види будівель, товарні склади	1,5

Таблиця В.7

Нормативна максимальна питома енергопотреба
для житлових та громадських будівель (EP_{max})

Ч.ч.	Призначення будівлі	Значення EP_{max} , кВт·год/м ² [кВт·год/м ³], для температурної зони України	
		I	II
1	Житлові будинки поверховістю:		
	від 1 до 3	120	110
	від 4 до 9	83	81
	від 10 до 16	77	75
	17 і більше	70	68
2	Громадські будівлі та споруди поверховістю:		
	від 1 до 3	[20 Λ_{bc1} + 31]	[19,4 Λ_{bc1} + 33]
	від 4 до 9	[38]	[40]
	від 10 до 24	[37]	[39]
	25 і більше	[34]	[36]
3	Підприємства торгівлі	[28 Λ_{bc1} + 17]	[32 Λ_{bc1} + 18]
4	Готелі		
	від 1 до 3	110	100
	від 4 до 9	75	70
	10 і більше	65	60
5	Будинки та споруди навчальних закладів	[28]	[30]
6	Будинки та споруди дитячих до- шкільних закладів	[48]	[50]
7	Заклади охорони здоров'я	[48]	[50]
Примітка: Λ_{bc1} – коефіцієнт компактності будівлі, м ⁻¹ , знаходиться згідно з п. А.8.			

Таблиця В.8

Класифікація будинків за енергетичною ефективністю

Класи енергетичної ефекти- вності будинку за питомою енергопотребою	Різниця в % розрахункового або фактичного значення питомої енергопотреби, EP , від максимально допусти- мого значення, EP_{max} ; $[(EP - EP_{max})/EP_{max}] \cdot 100\%$
A	Мінус 50 та менше
B	Від мінус 49 до мінус 10
C	Від мінус 9 до 0
D	Від 1 до 25
E	Від 26 до 50
F	Від 51 до 75
G	76 та більше

Таблиця В.9

Розрахунок енергопотребі для опалення

Місяць року	Параметр								
	Q_{tr} , кВт·год	Q_{ve} , кВт·год	Q_{Hht} , кВт·год	Q_{int} , кВт·год	Q_{sol} , кВт·год	Q_{Hgn} , кВт·год	γ_H	$\eta_{H,gn}$	$Q_{H,nd}$, кВт·год
Січень	8932,77	21803,46	30736,23	4771,48	2894,37	7665,85	0,249	0,998	23084,865
Лютий	8534,96	18816,41	27351,37	4309,72	3873,97	8183,69	0,299	0,996	19199,353
Березень	6871,36	16771,89	23643,25	4771,48	5683,71	10455,19	0,442	0,983	13363,524
Квітень	3978,15	9396,81	13374,96	4617,56	5749,98	10367,54	0,775	0,899	4056,395
Травень	1735,92	4237,11	5973,03	4771,48	7061,47	11832,95	1,981	0,491	159,600
Червень	614,80	1452,23	2067,03	4617,56	7039,82	11657,38	5,640	0,177	0,983
Липень	72,33	176,55	248,88	4771,48	7123,92	11895,4	47,796	0,021	0,000
Серпень	361,65	882,73	1244,38	4771,48	6644,22	11415,7	9,174	0,109	0,079
Вересень	2206,07	5210,96	7417,03	4617,56	5812,08	10429,64	1,406	0,655	589,475
Жовтень	4303,64	10504,50	14808,14	4771,48	4321,13	9092,61	0,614	0,949	6179,202
Листопад	6545,88	15462,03	22007,91	4617,56	2218,78	6836,34	0,311	0,996	15202,170
Грудень	8137,14	19861,45	27998,59	4771,48	2021,97	6793,45	0,243	0,998	21216,642
Всього за рік									103052,289

Таблиця В.10

Розрахунок енергопотребі для охолодження

Місяць року	Параметр								
	Q_{tr} , кВт·год	Q_{ve} , кВт·год	Q_{Ch} , кВт·год	Q_{int} , кВт·год	Q_{sol} , кВт·год	Q_{Cgn} , кВт·год	γ_c	$\eta_{C,gn}$	Q_{Cnd} , кВт·год
Січень	11102,68	27099,84	38202,52	4771,48	2894,37	7665,85	0,201	0,201	6,040
Лютий	10704,86	23600,24	34305,1	4309,72	3873,97	8183,69	0,239	0,238	12,948
Березень	9041,27	22068,28	31109,55	4771,48	5683,71	10455,19	0,336	0,334	63,347
Квітень	6148,06	14522,35	20670,41	4617,56	5749,98	10367,54	0,502	0,488	270,999
Травень	3905,82	9533,49	13439,31	4771,48	7061,47	11832,95	0,880	0,757	1663,099
Червень	2784,71	6577,77	9362,48	4617,56	7039,82	11657,38	1,245	0,889	3336,586
Липень	2242,23	5472,93	7715,16	4771,48	7123,92	11895,4	1,542	0,940	4646,544
Серпень	2531,55	6179,12	8710,67	4771,48	6644,22	11415,7	1,311	0,903	3549,291
Вересень	4375,97	10336,50	14712,47	4617,56	5812,08	10429,64	0,709	0,653	821,344
Жовтень	6473,55	15800,88	22274,43	4771,48	4321,13	9092,61	0,408	0,403	114,157
Листопад	8715,78	20587,56	29303,34	4617,56	2218,78	6836,34	0,233	0,233	9,893
Грудень	10307,05	25157,83	35464,88	4771,48	2021,97	6793,45	0,192	0,191	4,431
Всього за рік									14498,68074

Додаток Г

Таблиця Г.1

Програмні засоби аналізу та розрахунку енергетичних показників

№	Розробка	Країна походження	Різновид	Функціональність	Внутрішня геометрія / графіка
1	2	3	4	5	6
1	EnergyPlus	США	Програмний комплекс. Розрахунковий «двигун» динамічного моделювання	Детальне динамічне моделювання енергоспоживання будівлі, мікроклімату приміщень та роботи систем ОВК; підтримка складних сценаріїв, кліматичних файлів і користувацьких контролерів; використовується як ядро багатьох графічних оболонок та дослідницьких інструментів для високоточної оцінки енерговитрат.	Безпосередньо не орієнтований на 3D-моделювання; робота з геометрією здебільшого через текстові інпути або зовнішні графічні оболонки (OpenStudio, DesignBuilder тощо).
2	IDA ICE	Швеція	Програмний комплекс динамічного моделювання	Динамічне моделювання будівель і систем ОВК за методологією EN ISO 13790 та EN ISO 52016-1; розрахунок теплових навантажень, потреби в охолодженні, параметрів вентиляції та показників теплового комфорту, можливість багатозонного аналізу.	Підтримує детальну 3D-геометрію будівель і зон, наочні графіки та звіти, інтеграцію з BIM-інструментами для імпорту геометрії.
3	PHPP (пакет проєктування пасивного будинку)	Німеччина	Програмний комплекс (пакет Excel)	Статично-квазідинамічний розрахунок U-коефіцієнтів, потреб на опалення й охолодження, первинної енергії, параметрів вентиляції та ризику перегріву; підтримка сертифікації пасивних будівель та EnerPHit, аналіз економічної ефективності варіантів реконструкції, накопичення кліматичних даних для різних регіонів (у тому числі Києва).	Враховує будівлю як одну теплову оболонку; власної 3D-геометрії не має, проте може інтегруватися з плагіном DesignPH для SketchUp, який дозволяє будувати 3D-моделі й експортувати дані в PHPP.

Продовження таблиці Г.1

1	2	3	4	5	6
4	Hottgenrot h (Energieberater та ін.)	Німецьчина	Програмний комплекс	Набір модулів для енергетичного моделювання будівель, розрахунку теплового балансу, роботи фотоелектричних установок, теплових насосів, систем опалення (у тому числі поверхневого), складання погодинних графіків навантажень, розробки рішень з протипожежного захисту та інженерних мереж.	Підтримує створення 3D-моделей будівель та інженерних систем, наочні схеми й графіки; є інструменти для формування енергетичних сертифікатів згідно з національними нормами.
5	Archiphy SIK	Австрія	Програмний комплекс	Енергетичні розрахунки будівель і формування енергетичних сертифікатів; розрахунок потреб на опалення та охолодження, екологічних показників, а також підготовка одно- та багатозонних сертифікатів відповідно до австрійських стандартів.	Інтегрується з Archicad (через спеціальні додатки) і SketchUp, що дозволяє імпортувати геометрію будівель; передбачена графічна візуалізація та аналіз конструкцій, у тому числі для екологічної сертифікації.
6	GRAPHISOFT EcoDesigner STAR	Угорщина / міжнародна	Програмний комплекс (BIM-надбудова)	Розширена версія Archicad для енергетичного моделювання (BEM) на основі BIM-моделі: оцінка річного енергоспоживання, теплового балансу, первинної енергії, викидів парникових газів; порівняння різних варіантів об'ємно-планувальних рішень та інженерних систем.	Використовує повну 3D-BIM-геометрію будівлі з Archicad; генерує графіки теплових надходжень і втрат, дозволяє аналіз для окремих зон і всієї будівлі, проте початкові температурні параметри зон жорстко пов'язані з вибраною системою ОВК.
7	Optima	Польща	Програмний комплекс	Інструмент ранніх стадій проектування для швидкої оцінки енергетичних та економічних показників будівлі; розрахунок енергетичних показників на основі типових елементів оболонки, аналіз доцільності альтернативних джерел енергії та різних систем опалення.	Забезпечує можливість графічної побудови конфігурації оболонки; 3D-моделювання спрощене, орієнтоване на швидкість роботи, а не на деталізований аналіз внутрішньої геометрії.

Продовження таблиці Г.1

1	2	3	4	5	6
8	ETU– Planer	Німеч чина	Програмн ий комплекс модельова ння теплового балансу	Забезпечує розрахунок теплового балансу будівлі в єдиному інтерфейсі; дозволяє оцінювати теплове навантаження для окремих зон і приміщень з різними температурними режимами; виконує розрахунки параметрів радіаторів, систем обігріву підлоги та стін; формує діаграми, що відображають результати модельовання теплового балансу.	Підтримує перегляд 3D-моделей будівлі на різних етапах проектування; дає змогу виділяти зони та приміщення з окремими параметрами мікроклімату; результати розрахунків подаються у вигляді наочних графіків і діаграм.

Дані та результати цифрового дослідження вузлів

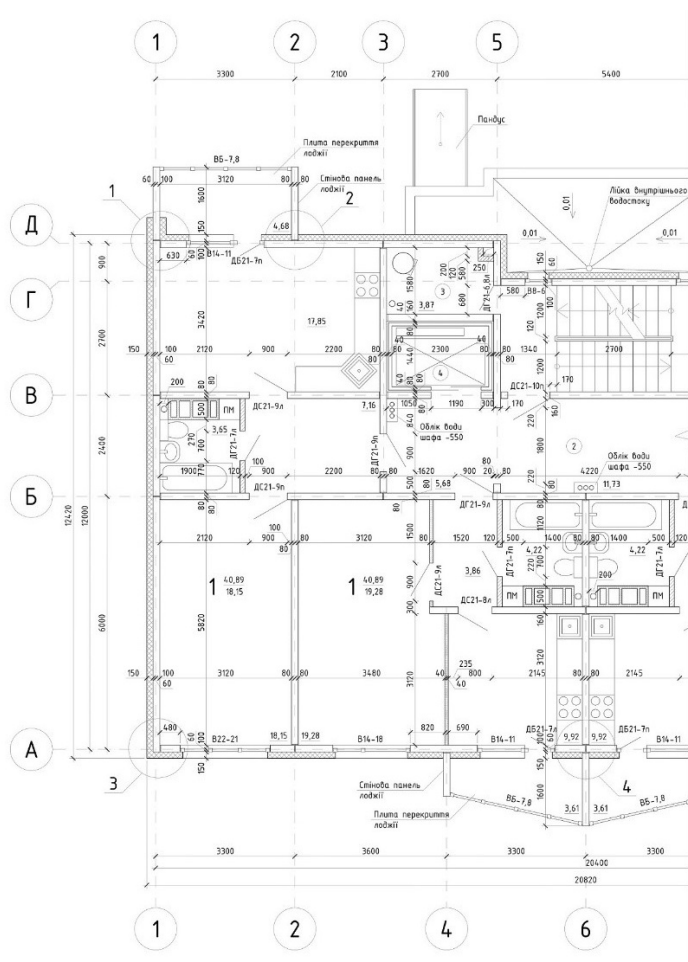


Рис. Д.1. Фрагмент плану типового поверху із зазначенням проблемних вузлів №1 – 4

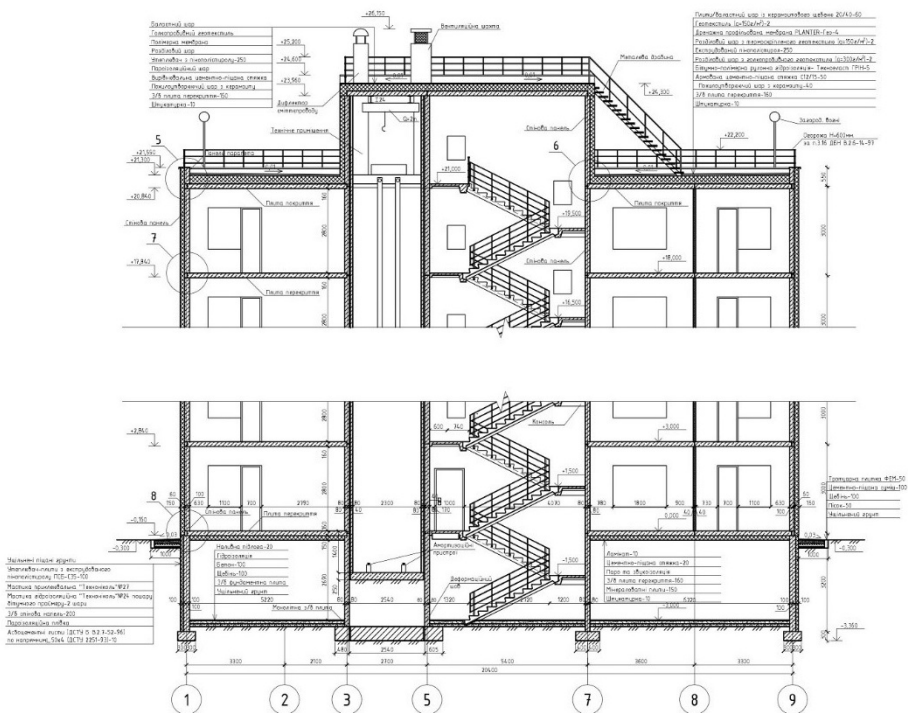


Рис. Д.2. Розріз 1 із зазначенням проблемних вузлів №5 – 8

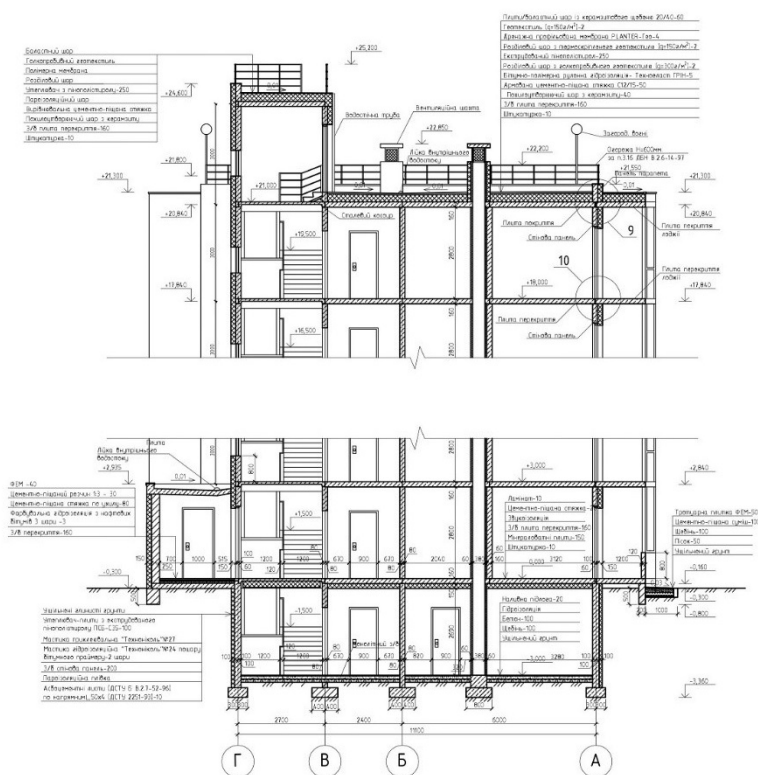


Рис. Д.3. Розріз 2 із зазначенням проблемних вузлів №9, 10

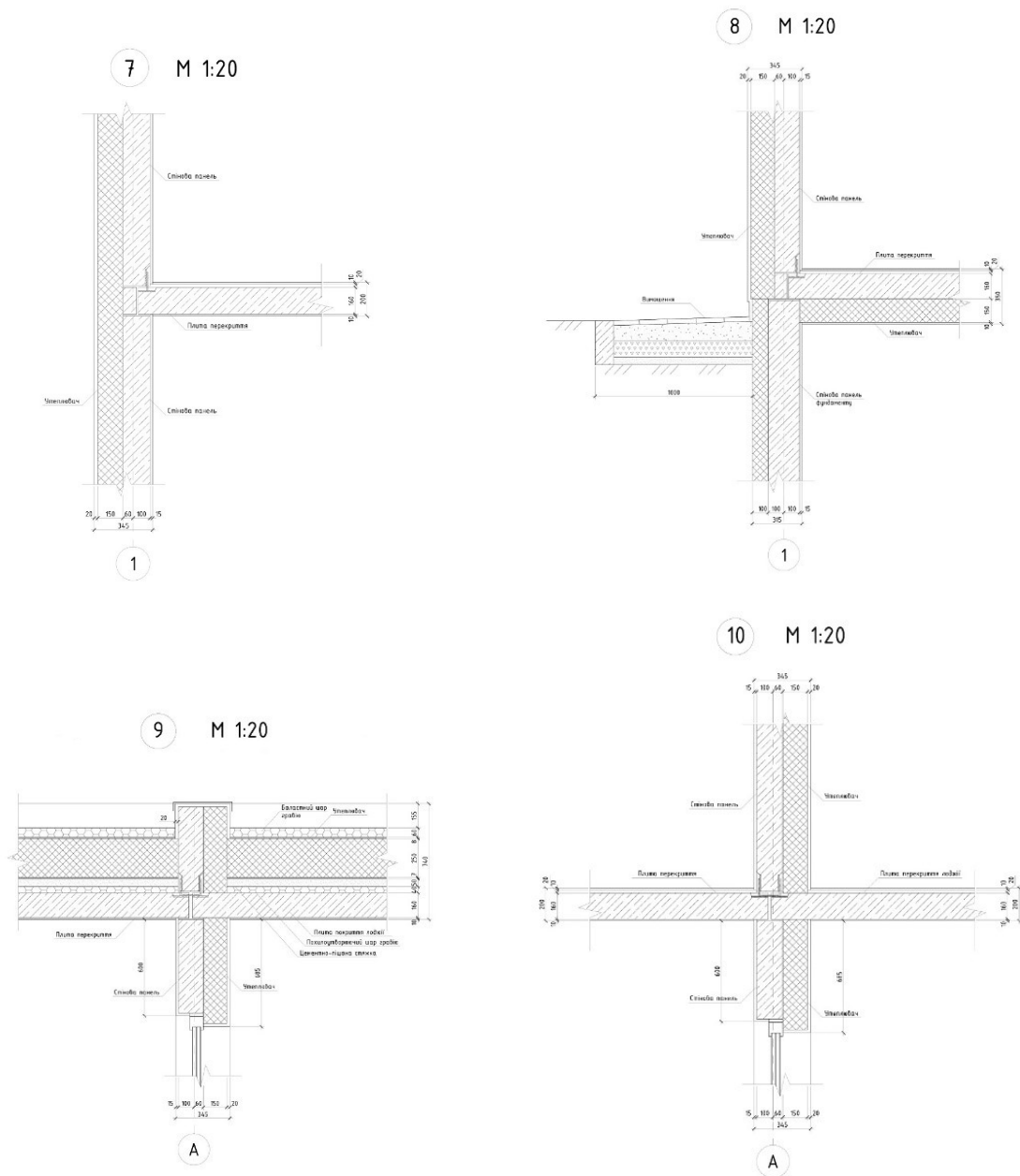
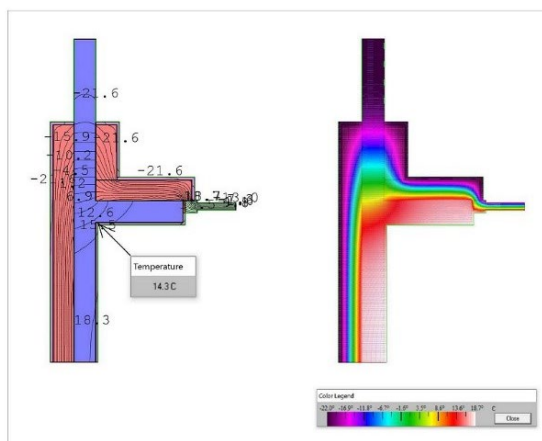
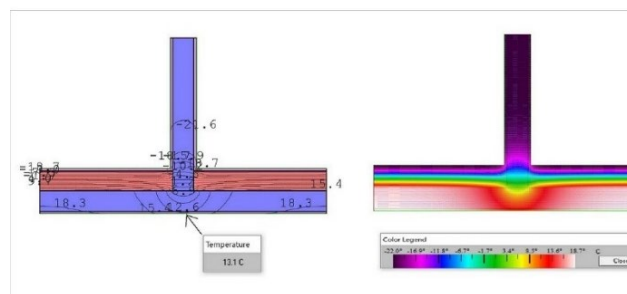


Рис. Д.5. Конструктивні вузли № 7 – 10

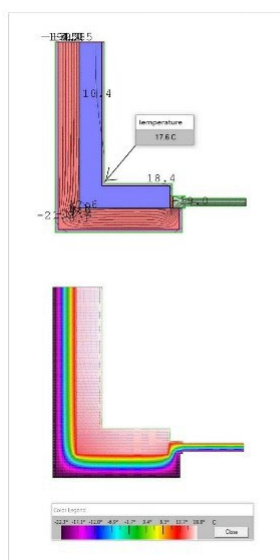
Температурне поле двовимірної моделі вузла 1



Температурне поле двовимірної моделі вузла 2



Температурне поле двовимірної моделі вузла 3



Температурне поле двовимірної моделі вузла 4

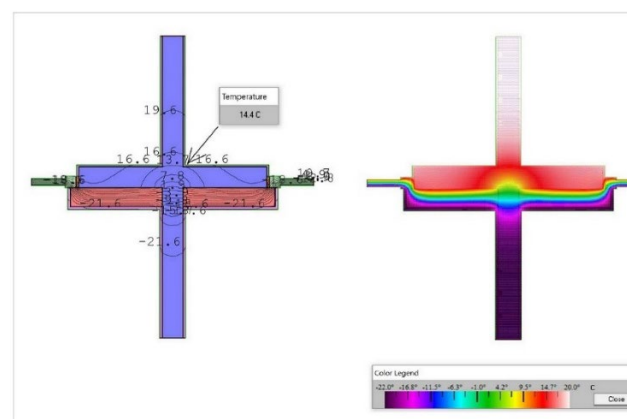


Рис. Д.6. Температурні поля кутових вузлів № 1 – 4 (вид зверху)

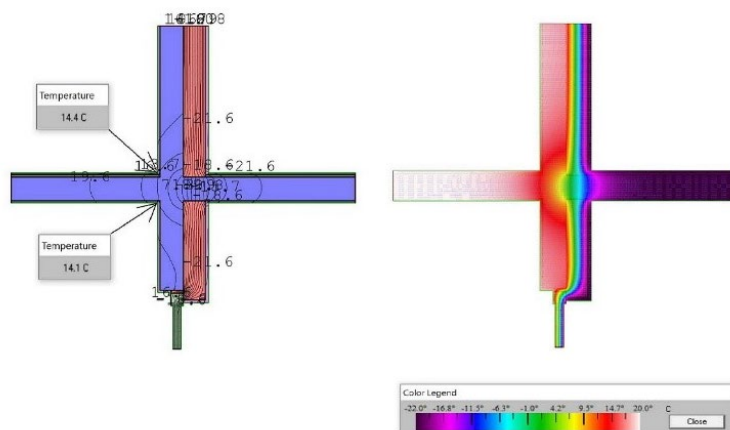
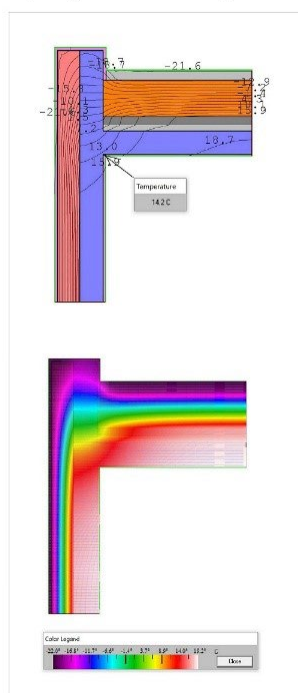


Рис. Д.9. Температурне поле кутового вузла № 10 (вид збоку)

Температурне поле двовимірної моделі вузла 5



Температурне поле двовимірної моделі вузла 6



Рис. Д.10. Температурні поля кутових вузлів № 5, 6 (вид збоку)

Вузол №1

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
наружная поверхность	0.2802	42.0	4716.5	N/A	Total Length
внутренняя стена	0.6277	42.0	2105.5	N/A	Total Length
% Error Energy Norm 6.47%					

Export OK

Вузол №2

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
наружная поверхность	0.3188	42.0	3990	N/A	Total Length
внутренняя стена	0.5809	42.0	2190	N/A	Projected X
% Error Energy Norm 8.77%					

Export OK

Вузол №3

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
внутренняя стена	0.5672	42.0	2105.5	N/A	Total Length
наружная поверхность	0.4152	42.0	2876.5	N/A	Total Length
% Error Energy Norm 9.18%					

Export OK

Вузол №4

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
внутренняя стена	0.4965	42.0	4211	N/A	Total Length
наружная поверхность	0.4792	42.0	4363	N/A	Total Length
% Error Energy Norm 9.85%					

Export OK

Вузол №5

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
наружная поверхность	0.2659	42.0	3240	N/A	Total Length
внутренняя стена	0.4407	42.0	1000	N/A	Projected Y
перекрытие	0.4209	42.0	1000	N/A	Projected X
% Error Energy Norm 6.97%					

Export OK

Вузол №6

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
внутренняя стена	0.1126	42.0	2585	N/A	Projected Y
наружная поверхность	0.2136	42.0	1845	N/A	Total Length
перекрытие	0.1030	42.0	1000	N/A	Projected X
% Error Energy Norm 6.03%					

Export OK

Вузол №7

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
наружная поверхность	0.2429	42.0	2200	N/A	Projected Y
перекрытие	0.0969	42.0	1000	N/A	Projected X
внутренняя стена	0.2387	42.0	2000	N/A	Projected Y
% Error Energy Norm 1.04%					

Export OK

Вузол №8

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
наружная поверхность	0.2561	42.0	4379.04	N/A	Total Length
перекрытие	0.5593	42.0	1000	N/A	Projected X
внутренняя стена	0.5623	42.0	1000	N/A	Projected Y
% Error Energy Norm 7.71%					

Export OK

Вузол №9

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
внутренняя стена	0.9915	42.0	1105.5	N/A	Total Length
наружная поверхность	0.3511	42.0	4841.5	N/A	Total Length
перекрытие	0.6040	42.0	1000	N/A	Projected X
% Error Energy Norm 9.71%					

Export OK

Вузол №10

	U-factor W/m ² ·K	delta T C	Length mm	Rotation	
внутренняя стена	0.6679	42.0	2105.5	N/A	Total Length
наружная поверхность	0.4119	42.0	4186.5	N/A	Total Length
перекрытие	0.3182	42.0	1000	N/A	Projected X
% Error Energy Norm 7.05%					

Export OK

Рис. Д.11. Отримані коефіцієнти теплопровідності (U-Factors)
для вузлів №1–10