

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 сформулювати 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 енергомодельювання, 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.