

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГУРЄЄВ МАКСИМ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 697.12:628.87

ДИСЕРТАЦІЯ

Розосереджені енергетичні баланси у багатоквартирних житлових будівлях

144 – Теплоенергетика

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Максим ГУРЄЄВ

Науковий керівник: **Білоус Інна Юріївна**, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Гурсєєв М. В. Розосереджені енергетичні баланси у багатоквартирних житлових будівлях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 Теплоенергетика – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2025.

У роботі порушено актуальну проблему підвищення енергоефективності використання теплової енергії в житловому фонді України шляхом удосконалення підходів до оцінювання енергетичних характеристик будівель на основі тепломасообмінних процесів у зонах багатоквартирних будівель. В умовах зростання вартості енергоресурсів, нестабільного теплопостачання, руйнування генерувальних потужностей та потреби у зменшенні викидів парникових газів, особливої значущості набуває питання точного визначення динаміки теплових втрат і надходжень тепла. Існуючі методики часто базуються на спрощених стаціонарних розрахунках, що не відображають повною мірою змінних режимів експлуатації, теплоінерційності конструкцій та зовнішніх кліматичних коливань. Це знижує ефективність планування заходів з енергозбереження. У зв'язку з цим важливою є розробка підходів, заснованих на динамічному моделюванні енергетичних процесів у будівлях.

У вступі дисертації підкреслено актуальність обраної теми, де аргументовано важливість застосування динамічного енергетичного моделювання для достовірної оцінки теплових процесів у багатоквартирних житлових будівлях в умовах динамічної зміни кліматичних і експлуатаційних умов. Сформульовано мету, наукові завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Подано інформацію щодо апробації дослідження, публікацій та актів впровадження результатів, а також розкрито особистий внесок автора.

У першому розділі обґрунтовано актуальність комплексного підходу до підвищення енергоефективності житлового фонду, що зумовлено економічними, екологічними та соціальними вимогами сталого розвитку. Висвітлено фундаментальні фізичні процеси формування енергетичного балансу будівлі, зокрема теплопередачу через огорожувальні конструкції, повітрообмін, вплив систем ОВК та поведінкові чинники мешканців. Проведено критичний аналіз чинної нормативної бази України і порівняно її з підходами ЄС. Встановлено, що українські методики переважно спираються на стаціонарні розрахунки, тоді як європейські і американські стандарти все ширше застосовують динамічне моделювання та орієнтуються на фактичне, а не лише проєктне енергоспоживання.

Літературний огляд охоплює сучасні дослідження з параметричного аналізу сонячних теплонадходжень, масивності огорожень. Виявлено прогалини у вітчизняній науковій базі щодо динамічних характеристик багатоквартирних будівель, зокрема в умовах нестабільних режимів опалення, а також взаємодії кондиціонованих зон при неоднорідних теплофізичних характеристиках. На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність застосування динамічного моделювання з погодинним розрахунком, що забезпечує підвищення точності оцінки енергоспоживання і дозволяє моделювати реальні сценарії експлуатації житлових будівель. Отримані висновки стали підґрунтям для формування підходу, використаного в подальших етапах дослідження.

У другому розділі сформовано і верифіковано мультизональну динамічну модель 12-поверхового житлового будинку ОСББ «Наш дім на Галана» (Київ) як базову платформу для подальшого параметричного аналізу. Об'єкт дослідження описано на основі аудиторських даних, планів та фактичних показників теплопостачання, що гарантує репрезентативність і можливість екстраполяції результатів. Методика моделювання поєднує оцифрування геометрії в DesignBuilder із подальшим розрахунком у EnergyPlus; правильність моделі підтверджено порівнянням вихідних даних із реальними витратами тепла. Використано погодинні кліматичні дані IWEC, а теплопровідність огорожень змодельовано методом кондуктивної передавальної функції (Conduction Transfer

Function), що забезпечує врахування інерційності та фазових зсувів теплонадходжень.

Базова модель включає типовий склад огорожувальних конструкцій (опір теплопередачі), кратність повітрообміну $0,6 \text{ год}^{-1}$ та внутрішню температуру 20°C . Задано параметричну сітку сценаріїв, що варіює орієнтацію фасадів, масивність і рівень утеплення стін, характеристики вікон, товщину внутрішніх перегородок і режими денного/нічного зниження температури опалення. Така систематизація дає змогу виконати чутливісний аналіз і кількісно оцінити вплив кожного чинника на теплові втрати та пікові навантаження.

Розділ закладає концептуальну й інструментальну основу для дослідження динамічних теплових балансів та обґрунтування енергоефективних рішень для багатоквартирних будівель в умовах клімату України.

У третьому розділі дисертації кількісно оцінено вплив теплофізичних властивостей огорожувальних конструкцій (масивності і опору теплопередачі) на енергоспоживання багатоквартирної житлової будівлі. Дослідження ґрунтується на порівнянні результатів стаціонарних розрахунків за EN 12831 із погодинним динамічним моделюванням в EnergyPlus, що враховує добові коливання температури, інфільтрацію, сонячні теплонадходження й теплоаккумуляцію матеріалів.

Результати показали, що динамічний підхід демонструє на 6-8% нижчу розрахункову річну потребу в опаленні порівняно зі стаціонарною методикою та запобігає «перетопам» у перехідні періоди. Параметричний аналіз підтвердив, що збільшення масивності зовнішніх цегляних стін із 0,25 м до 0,77 м скорочує витрати енергії на опалення до 37%, а комплексна термомодернізація (шар мінеральної вати 0,1 м і двокамерні енергоефективні склопакети) майже на 45%. Врахування погодинних даних IWEC знизило втрати через повітрообмін на 3,9% порівняно з розрахунками за середньомісячними температурами.

Отримані результати доводять доцільність застосування динамічного моделювання та зонального регулювання температури для підвищення точності

прогнозування енергоспоживання і раціональної експлуатації систем опалення при реконструкції та модернізації житлових будівель.

У четвертому розділі дисертації здійснено комплексне дослідження енергетичних характеристик житлової будівлі при сталих, змінних та аварійних режимах роботи системи опалення. Враховано сучасні виклики, пов'язані з підвищенням вимог до енергоефективності, нестабільністю енергоринку та ризиками відключень теплопостачання. Проаналізовано вплив різних сценаріїв регулювання температури внутрішнього повітря (денне і нічне пониження температури внутрішнього повітря) на річне споживання теплової енергії, враховуючи масивність огорожувальних конструкцій, орієнтацію фасаду, термомодернізацію будівлі та внутрішні теплонадходження. Встановлено, що динамічне моделювання дозволяє оцінити інерційні процеси, теплові взаємодії між приміщеннями та особливості розподілу навантаження у змінних режимах. Показано, що застосування стратегій пониження температури в денний і нічний періоди дозволяє знизити річне енергоспоживання на 18-23%, а нічне пониження є більш ефективним для будівель з масивними стінами. Проведено моделювання аварійних сценаріїв із частковим та повним відключенням опалення, що дало змогу оцінити теплову стійкість будівлі та ризики охолодження приміщень. Встановлено, що при відключенні опалення у суміжних приміщеннях додаткове навантаження на систему опалення може зростати на 16-18%. Отримані результати дозволяють формувати рекомендації щодо адаптивного управління опаленням, підвищення пасивної термічної стійкості будівель, навчання систем автоматичного регулювання систем опалення на базі штучного інтелекту та розробки нормативів енергоефективності.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження підтверджено довідкою про впровадження, виданою ОСББ «Наш дім на Галана» та Кваліфікаційним центром "Центр підготовки енергоменеджерів навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту" КПІ ім. Ігоря Сікорського. Документом засвідчується придатність та ефективність розроблених методик і моделей енергетичного моделювання для планування комплексних

заходів з підвищення енергоефективності багатоквартирних житлових будівель. Результати можуть бути застосовані для налаштування режимів роботи індивідуального теплового пункту та систем автоматичного регулювання опалення, а також для точного прогнозування теплових витрат будівлі в умовах різних сценаріїв експлуатації суміжних приміщень, що сприятиме підвищенню енергетичної ефективності та забезпеченню комфортних умов проживання мешканців. У більшості кінцевих споживачів теплової енергії відсутній облік, тому отримані результати дослідження можуть бути використані при налаштуванні лічильників-розподільників теплової енергії. Зокрема, інформація щодо налаштування термостатів та удосконалення роботи опалювальних систем застосовуються у навчальному процесі для формування професійних компетентностей фахівців у сфері енергоефективності.

Ключові слова: використання енергії, кінцевий споживач теплової енергії, енергетичний баланс, енергетична ефективність, енергоспоживання, економія енергії, математичне моделювання, енергетичне моделювання, термомодернізація, регулювання відпуску теплоти, вентиляція, опалення, теплові перетоки, система опалення.

ABSTRACT

Hurieiev M.V. Distributed energy balances in multifamily residential buildings. – Manuscript.

The dissertation on completion of the Doctor of Philosophy degree on specialty 144 – Heat power engineering. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The study raises the relevant problem of improving the energy efficiency of heat energy use in residential buildings in Ukraine by improving approaches to assessing the energy characteristics of buildings based on heat and mass transfer processes in thermal zones of multifamily buildings. In the context of growing energy costs, unstable heat supply, destruction of generating capacities, and the need to reduce greenhouse gas emissions, the issue of accurately determining the dynamics of heat losses and gains is becoming especially important. Existing methods are often based on simplified, steady-state calculations that do not fully reflect variable operating modes, thermal inertia of structures, and external climatic fluctuations. This reduces the effectiveness of energy conservation planning. In this regard, it is important to develop approaches based on dynamic modeling of energy processes in buildings.

The introduction of the study emphasizes the relevance of the chosen topic, highlighting the importance of using dynamic energy modeling for reliable assessment of heat flows in multifamily residential buildings under dynamically changing climatic and operational conditions. The purpose, research objectives, object, subject, and methods of the study are presented, the scientific innovation and practical significance of the results are determined. Information on the approbation of the study, publications and acts of implementation of the results is presented, as well as the author's personal contribution is outlined.

The first chapter substantiates the relevance of a comprehensive approach to improving the energy efficiency of the housing sector, which is determined by the economic, environmental, and social requirements of sustainable development. It highlights the fundamental physical processes involved in the formation of a building's

energy balance, in particular heat transfer through building envelopes, air exchange, the influence of HVAC systems, and behavioral factors of residents. A critical analysis of the current regulatory framework in Ukraine is conducted and compared with EU approaches. It is established that Ukrainian methodologies are mainly based on steady-state calculations, while European standards increasingly use dynamic modeling and focus on actual, rather than just projected, energy consumption.

The literature review covers current research on parametric analysis of solar heat gains and the massiveness of enclosures. Gaps have been identified in the national scientific database regarding the dynamic characteristics of multifamily buildings, particularly under unstable heating conditions, as well as the interaction of conditioned zones with heterogeneous thermophysical characteristics. Based on the analysis, the feasibility of using dynamic modeling with hourly calculations was justified, which improves the accuracy of energy consumption estimates and allows modeling realistic scenarios for the operation of residential buildings. The conclusions obtained formed the basis for the approach used in the subsequent stages of the study.

The second chapter presents a verified multi-zone dynamic model of a 12-story residential building owned by the condominium “Nash Dim na Halana” (Kyiv) as a basic platform for further parametric analysis. The object of study is described based on audit data, plans, and actual heat supply metrics, which guarantees the representativeness and extrapolation of results. The modeling methodology combines digitization of geometry in DesignBuilder with subsequent calculation in EnergyPlus; the accuracy of the model is confirmed by comparing the initial data with actual heat consumption. Hourly climate data from IWEK was used, and the thermal conductivity of the enclosures was modeled using the Conduction Transfer Function method, which takes into account the inertia and phase shifts of heat gains.

The base model includes a typical building envelope configuration (heat resistance) with an air change rate of 0.6 air changes per hour and an internal temperature of 20 °C. A parametric grid of scenarios is set, varying the orientation of the facades, the massiveness and level of wall insulation, window characteristics, the thickness of internal partitions, and day/night heating temperature reduction modes. This systematization

allows for sensitivity analysis and quantitative assessment of the impact of each factor on heat flows and peak loads.

The section lays the conceptual and instrumental foundation for researching dynamic heat balances and justifying energy-efficient solutions for multi-family buildings in the Ukrainian climate.

The third chapter of the dissertation quantitatively assesses the impact of the thermophysical properties of building envelopes (massiveness and heat resistance) on the energy consumption of multifamily residential buildings. The study is based on a comparison of the results of steady-state calculations according to EN 12831 with hourly dynamic modeling in EnergyPlus, which takes into account daily temperature fluctuations, infiltration, solar heat gain, and heat accumulation of materials.

The results showed that the dynamic approach demonstrates a 6-8% lower calculated annual heating demand compared to the steady-state method and prevents “overheating” during transitional periods. Parametric analysis confirmed that increasing the mass of external brick walls from 0.25 m to 0.77 m reduces heating energy consumption by up to 37%, and comprehensive thermal modernization (0.1 m layer of mineral wool and triple-glazed energy-efficient windows) by almost 45%. Taking into account hourly IWEC data reduced air exchange losses by 3.9% compared to calculations based on average monthly temperatures.

The results obtained prove the feasibility of using dynamic modeling and zonal temperature control to improve the accuracy of energy consumption forecasting and rational operation of heating systems during the reconstruction and modernization of residential buildings.

The fourth chapter of the dissertation presents a comprehensive study of the energy characteristics of a residential building under constant, variable, and emergency modes of heating system operation. It takes into account current challenges related to increased energy efficiency requirements, energy market instability, and the risk of heat supply interruptions. The influence of various scenarios for regulating indoor air temperature (daytime and nighttime reduction of indoor air temperature) on annual heat energy consumption is analyzed, taking into account the massiveness of the building envelope,

the orientation of the facade, the thermal modernization of the building, and internal heat gains. It has been established that dynamic modeling allows for the assessment of inertial processes, thermal interactions between rooms, and load distribution characteristics in variable modes. It is shown that the use of strategies to lower the temperature during the day and night allows for a reduction in annual energy consumption by 18-23%, and that nighttime reduction is more effective for buildings with massive walls. Modeling of emergency scenarios with partial and complete shutdown of heating was carried out, which made it possible to assess the thermal stability of the building and the risks of cooling the premises. It has been established that when the heating is turned off in adjacent rooms, the additional load on the heating system can increase by 16-18%. The results obtained allow for the formation of recommendations for adaptive heating control, improving the passive thermal stability of buildings, training automatic control systems for heating systems based on artificial intelligence, and developing energy efficiency standards.

The practical value of the results of the dissertation research is confirmed by the certificate of implementation issued by the condominium “Nash Dim na Halana” and the Qualification Center “The Training Centre for Energy Management” of the Institute of Energy Saving and Energy Management of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". The document certifies the suitability and effectiveness of the developed energy modeling methods and models for planning comprehensive measures to improve the energy efficiency of multi-apartment residential buildings. The results can be used to optimally adjust the operating modes of individual heating stations and automatic heating control systems, as well as to accurately predict the heat consumption of a building under various scenarios of operation of adjacent premises, which will help to improve energy efficiency and ensure comfortable living conditions for residents. Most end users of heat energy do not have metering systems, so the results of this study can be used to configure heat energy meters and distributors. In particular, the information on setting thermostats and optimizing the operation of heating systems is used in the educational process to develop the professional competencies of energy efficiency specialists.

Keywords: energy use, heat energy end-user, energy balance, energy efficiency, energy consumption, energy savings, mathematical modeling, energy modeling, thermal modernization, heat release control, ventilation, heating, heat flows, heating system.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Deshko, V., Bilous, I., Buyak, N., Hetmanchuk, H., Hurieiev, M., & Odineca, T. (2025). Parametric Analysis of Heat Flows Through Building Envelope Considering Orientation, Massiveness, and Intermittent Heating Modes. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 27, 110–120. <https://doi.org/10.54740/ros.2025.010> (іноземне видання, включене до бази даних **Scopus** і **Web of Science**)
2. Deshko, V., Bilous, I., Hetmanchuk, H., & Hurieiev, M. (2024). Динамічні енергетичні баланси будівлі під впливом зміни теплоінерційних властивостей оболонки будівлі та режимів опалення. *Energy and Automation*, 6, 152–166. [https://doi.org/10.31548/energiya6\(76\).2024.152](https://doi.org/10.31548/energiya6(76).2024.152) (фахове видання)
3. Buyak, N., Deshko, V., Bilous, I., Gureev, M., & Holubenko, O. (2020). EN Assessment of the window replacement influence on building energy consumption and human thermal comfort on the basis of dynamic modeling. *Refrigeration Engineering and Technology*, 55(5–6), 282–292. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i5-6.1656> (фахове видання)
4. Deshko, V., Bilous, I., Buyak, N., & Gureev, M. (2020). Energy need dynamics estimation of mass-building buildings considering the exergetic model of heat comfort. *Energy and automation*, 1(47), 77–92. <https://doi.org/10.31548/energiya2020.01.077> (фахове видання)
5. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2024). Вентиляція як складова енергетичного динамічного балансу в будівлях. *Technologies and Engineering*, 1, 25–39. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.1.3> (фахове видання)
6. Дешко, В. І., Буяк, Н. А., Білоус, І. Ю., Гурєєв, М. В., & Голубенко, О. О. (2019). Вплив теплоінерційних особливостей огорожень на умови комфортності при впровадженні енергоощадних режимів опалення в будівлях. *Комунальне господарство міст*, 3(149), 44–50. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-3-149-44-50> (фахове видання)

7. Deshko, V. I., Buiak, N. A., Bilous, I. Y., Hurieiev, M. V., & Holubenko, O. O. (2019). Оцінка впливу заміни вікон на енергопотребу та умови комфорту в будівлі на основі динамічного моделювання. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*, 3, 52–62. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164428> **(фахове видання)**
8. Білоус, І. Ю., Гетманчук, Г. О., & Гурєєв, М. В. (2024). Оцінка енергоспоживання будівель на основі енергетичного моделювання з врахуванням мінливості природного повітрообміну. *Refrigeration Engineering and Technology*, 60(3), 205–214. <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.2950> **(фахове видання)**
9. Deshko, V., Bilous, I., Shovkaliuk, M., & Hurieiev, M. (2020, May 12-14). Evaluation of differentiated impact of apartment building occupants' behavior on energy consumption. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 196–200. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160046>
10. Buiak, N., Deshko, V., Bilous, I., Hurieiev, M., & Odineca, T. (2024, September 23-26). Parametric analysis of heat flows through building envelopes considering orientation, massiveness, and intermittent heating modes. *8th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering*, 239–248.
11. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2019, Травень 14-16). Аналіз впровадження регулювання системи опалення за допомогою енергетичного моделювання. *IX Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, 2, 183–185.
12. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2018, Квітень 17-19). Аналіз зміни енергопотреби будівлі при заміні вікон. *V Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'18*, 16.
13. Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2023, Травень 16-18). Використання програмного забезпечення EnergyPlus для визначення складової повітрообміну. *XV Науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» Присвячена 125-річчю КПІ*, 58–61.

14. Дешко, В. І., Буяк, Н. А., Білоус, І. Ю., Голубенко, О. О., & Гурєєв, М. В. (2019, Червень 4-5). Вплив теплоінерційних особливостей огорожень на умови комфортності під час впровадження енергоощадних режимів опалення житлових будівель. *II Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи»*, 2, 46–52.
15. Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2024, Квітень 23-26). Динамічне енергетичне моделювання для дослідження енергетичних балансів будівель. *XXI міжнародна науково-практична конференція молодих вчених і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»*, 1, 212–214.
16. Єщенко, О. І., & Гурєєв, М. В. (2018, Квітень 24-27). Енергоаудит системи опалення багатоквартирного будинку—Методика, ефективність результатів. *XVI Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»*, 2, 253.
17. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., Буяк, Н. А., & Гурєєв, М. В. (2019, Грудень 19). Оцінювання енергопотреб будівель на основі динамічних моделей та ексергетичній моделі теплового комфорту. *V Міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова «ПРЕАП-2019» «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК»*, 155–157.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	7
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	12
ЗМІСТ	15
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ	25
1.1 Теоретичні аспекти енергоефективності будівель	25
1.2 Нормативні аспекти енергоефективності будівель	27
1.3 Сучасні дослідження, присвячені житловим будівлям та енергетичним балансам в них	40
Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ	48
2.1 Характеристики об'єкту дослідження	48
2.2 Опис методики енергетичного моделювання	51
2.2.1 Етапи реалізації енергетичного моделювання	52
2.2.2 Програмне забезпечення для енергетичного моделювання будівель ..	54
2.3 Параметри енергетичної моделі	65
2.3.1 Параметри базової енергетичної моделі	68
2.3.2 Параметричний аналіз	70
Висновки до розділу 2	72
РОЗДІЛ 3 ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЛІ ПІД ВПЛИВОМ ЗМІНИ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОГОРОДЖЕНЬ БУДІВЛІ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	74
3.1 Порівняння стаціонарної та динамічної моделі розрахунків	74
3.1.1 Стаціонарна модель	75
3.1.2 Динамічна модель	86

3.2	Визначення впливу масивності стін на енергетичні характеристики будівлі.....	98
	Висновки до розділу 3	111
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЛІ ПРИ СТАЛИХ ТА ЗМІННИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ТА АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕННЯХ ОПАЛЕННЯ.....		113
4.1	Оцінка енергетичних характеристик будівлі з урахуванням застосування графіків пониження температури.....	114
4.1.1	Особливості стаціонарної моделі та її порівняння з динамічною	115
4.1.2	Оцінка впливу денного пониження температури на енергоспоживання будівлі	120
4.1.3	Оцінка впливу нічного пониження температури внутрішнього повітря на енергоспоживання будівлі.....	133
4.2	Аналіз впливу відключень опалення на теплові потоки через огорожувальні конструкції.....	142
4.2.1	Динаміка температури внутрішнього повітря під час повного або часткового відключення опалення	145
4.2.2	Вплив відключення опалення в суміжних зонах на навантаження та споживання теплової енергії репрезентативними приміщеннями	150
	Висновки до розділу 4	156
ВИСНОВКИ.....		158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		162
Додаток А.....		172
Список опублікованих праць за темою дисертації.....		172
Додаток Б.....		175

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

3D – three-dimensional – 3Д, тривимірний;

AI – Artificial Intelligence – штучний інтелект;

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря;

BAS – Building Automation System – система автоматизації будівлі;

BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method – метод екологічної оцінки будівель (Велика Британія);;

CEN – European Committee for Standardization – Європейський комітет зі стандартизації;

EED – Energy Efficiency Directive – Директива з енергоефективності (ЄС);

EN – European Standards – Європейський стандарт;

EPBD – Energy Performance of Buildings Directive – Директива щодо енергетичної ефективності будівель (ЄС);

EPW – EnergyPlus Weather file – файл погодних даних для EnergyPlus;

EU – European Union – Європейський Союз;

HVAC – Heating, Ventilation and Air Conditioning – опалення, вентиляція та кондиціонування повітря;

IDT – Identical – ідентичний (позначка відповідності стандарту);

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers – Інститут інженерів електротехніки та електроніки;

IoT – Internet of Things – Інтернет речей;

ISO – International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації;

IWEC – International Weather for Energy Calculations – міжнародні погодні дані для енергетичних розрахунків;

LEED – Leadership in Energy and Environmental Design – система сертифікації екологічного будівництва;

PDCA – Plan-Do-Check-Act – цикл Демінга (плануй–виконуй–перевірй–вдосконалюй);

QR – Quick Response – швидкий відгук (двовимірний штрихкод);

RP – Research Project – науково-дослідний проєкт;

TR – Technical Report – технічний звіт;

USA – United States of America – Сполучені Штати Америки;

USGBC – U.S. Green Building Council – Рада з екологічного будівництва США;

WUFI – Wärme und Feuchte Instationär – програмне забезпечення для гіротермічного аналізу огорожень;

ЄС – Європейський Союз;

ГВП – Гаряче водопостачання;

ДБН – Державні будівельні норми;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ЗЕЗ – Заходи з енергозбереження;

ККД – Коефіцієнт корисної дії;

КПІ – Київський політехнічний інститут;

ОВК – Опалення, вентиляція, кондиціонування;

ОСББ – Об’єднання співвласників багатоквартирного будинку;

ПЗ – Програмне забезпечення;

США – Сполучені Штати Америки;

УДК – Універсальна десяткова класифікація;

ІІІ – Штучний інтелект.

ВСТУП

Актуальність теми. Енергозбереження є одним із головних пріоритетів сучасного суспільства. Використання теплової енергії має найбільший потенціал до енергозбереження. Серед кінцевих споживачів енергії на будівлі припадає близько 40% світового енергоспоживання та значна частина викидів парникових газів, основна частина яких пов'язана з споживанням теплової енергії. У контексті змін клімату та підвищення вартості енергоресурсів питання енергоефективності багатоповерхових житлових будівель набуває особливої важливості. Український житловий фонд, більшість якого збудовано в 60-90-х роках, не відповідає сучасним вимогам енергоефективності через застарілі конструктивні рішення та відсутність систематичної модернізації. Як наслідок, значна частина теплової енергії втрачається через огорожувальні конструкції, інфільтрацію повітря та недостатню теплоізоляцію.

Уникнення надмірних втрат енергії та забезпечення стабільного температурного режиму в приміщеннях стає можливим завдяки інтеграції сучасних інструментів енергетичного моделювання та використання результатів моделювання для налаштування (навчання) системи керування в системах опалення. Ці інструменти дозволяють досліджувати взаємодію теплових потоків, внутрішніх джерел тепла та вплив кліматичних умов на теплові втрати будівель. Наприклад, програмне забезпечення EnergyPlus та DesignBuilder дозволяє прогнозувати енергоспоживання як в нормальних умовах експлуатації, так і в аварійних або при надзвичайних ситуаціях. Окрім цього ці інструменти дозволяють оцінити ефективність заходів з модернізації та реконструкції, таких як утеплення стін, заміна вікон або регулювання режимів систем опалення, поквартирного розподілення тепла в будівлі.

Детальне моделювання динамічних процесів у багатоквартирних житлових будівлях стає основою для розробки адаптивних стратегій енергоефективності. Воно враховує не лише загальні теплові характеристики конструкцій, а й змінні зовнішні умови та експлуатаційні режими, що дозволяє покращити як існуючі, так

і нові проєкти будівель. Такі підходи мають велике значення для досягнення сталого розвитку в будівельній галузі, особливо в умовах України.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження теплофізичних процесів нестационарного теплообміну кондиціонованих зон багатопверхових житлових будівель як кінцевих споживачів паливно-енергетичних ресурсів, вдосконалення процесу обчислення та аналізу енергетичних потоків у будівлі шляхом складання розосереджених енергетичних балансів з використанням сучасних алгоритмів і програмного забезпечення, а також адаптацію моделей до специфічних умов, таких як кліматичні особливості, конструктивні характеристики будівлі та експлуатаційні режими.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- Розробити мультизональну модель кінцевого споживача, на прикладі багатоквартирної житлової будівлі з використанням програмного забезпечення EnergyPlus та DesignBuilder.
- Провести аналіз навантаження на систему опалення з урахуванням впливу мінливості кліматичних умов та теплових втрат через огорожувальні конструкції, системи вентиляції.
- Дослідити вплив теплофізичних властивостей матеріалів на енергетичні характеристики будівель як кінцевих споживачів теплової енергії.
- Скласти розосереджені енергетичні баланси та дослідити вплив різних конфігурацій на розподіл теплових потоків в кондиціонованих зонах будівлі.
- Розробити практичні рекомендації з метою розподілу та зниження енергоспоживання кінцевими споживачами теплової енергії для проєктування, експлуатації та реконструкції багатопверхових житлових будівель.

Об'єкт дослідження – нестационарні процеси теплообміну кондиціонованих зон багатопверхової житлової будівлі, яка виступає складною енергетичною

системою з притаманними їй теплофізичними характеристиками, що впливають на теплові втрати та теплові баланси.

Предмет дослідження – розосереджені енергетичні баланси та теплофізичні процеси, пов'язані з тепловими втратами, інфільтрацією повітря, енергоспоживанням та впливом кліматичних умов на енергетичну ефективність багатопверхових житлових будівель.

Методи дослідження. Науково-методичну основу проведених досліджень складо комп'ютерне моделювання динамічних енергетичних процесів у програмних середовищах EnergyPlus та DesignBuilder, що дозволяє створювати мультизональні енергетичні моделі будівель. Цей підхід забезпечує детальне врахування теплофізичних параметрів конструкцій, впливу кліматичних факторів та змінних експлуатаційних режимів. Параметричне моделювання використано для оцінки ефективності різних варіантів термомодернізації, включаючи заміну огорожувальних конструкцій, впровадження додаткової теплоізоляції та регулювання режимів опалення, таких як зниження температури у неробочі години. У цьому контексті особливу увагу приділено аналізу теплових втрат через конструктивні елементи будівлі та енергетичних потоків в приміщенні. Крім того, аналіз енергетичних балансів проводився для визначення точного впливу конструктивних змін та кліматичних умов на теплові втрати та енергоспоживання будівель.

Наукова новизна.

- Вперше для умов України інтегровано динамічне енергетичне моделювання в аналіз теплових балансів кінцевих споживачів, на прикладі кондиціонованих зон багатоквартирних житлових будівель, з урахуванням динамічних кліматичних змін, що дозволяють підвищити рівень управління енерговикористання в інженерних системах будівлі.
- Розвинено підхід до створення нестационарних багатозонних енергетичних моделей будівлі, як складної теплоенергетичної системи, що враховують взаємодію між зонами будівлі та зовнішнім середовищем, зокрема інфільтрацію, сонячних теплонадходжень та

теплової акумуляції та експлуатаційні особливості роботи інженерних систем будівлі.

- Удосконалено методи поглибленого аналізу теплоенергетичного стану кінцевого споживача енергії, на прикладі будівлі, для нормального режиму експлуатації, повного або часткового відключення будівлі від системи опалення, що характерно для періоду військового стану.

Практичне значення одержаних результатів.

Результати дослідження можуть бути використані:

- для рекомендацій щодо використання/розподілення енергії між кінцевими споживачами теплової енергії, зокрема, для поквартирного обліку теплової енергії з використанням лічильників-розподільників;
- для розробки національних стандартів з енергоефективності будівель як кінцевих споживачів в частині керування режимами роботи в системах опалення кондиціонованих зон будівель з урахуванням нестационарного теплообміну між зонами та зовнішнім середовищем;
- для управління енерговикористанням в будівлях як кінцевих споживачах енергії, що дозволить зменшити генерацію при виробництві теплової енергії.
- у навчальному процесі для підготовки спеціалістів з енергоефективності будівель та в кваліфікаційних центрах з підготовки фахівців з енергетичної ефективності.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею. Автор самостійно розроблено концепцію дослідження, виконано побудову мультизональної моделі житлової будівлі в програмному забезпеченні EnergyPlus та DesignBuilder, проведено аналіз теплових втрат і оцінено ефективність різних заходів термомодернізації. Здобувачем зібрано та систематизовано кліматичні дані, проведено параметричний аналіз та сформульовано рекомендації для практичного використання результатів дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень, викладених у дисертаційній роботі, було представлено на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: Міжнародна науково-практична конференція «2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)» (Київ, Україна, 2020); міжнародна науково-практична інтернет-конференція «8th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering» (Гливиці, Польща, 2024); міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, Україна, 2024); міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'18» (Київ, Україна, 2018); науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» Присвячена 125-річчю КПІ (Київ, Україна, 2023); міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи» (Київ, Україна, 2019); міжнародна науково-практична конференція молодих вчених і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Київ, Україна, 2024); міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Київ, Україна, 2018); міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова «ПРЕАП-2019» «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (Київ, Україна, 2019).

Результати досліджень також були представлені на всеукраїнському конкурсі "Молодь енергетиці України: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків" (Київ, 2019), де представлена на конкурсі робота була відзначена дипломом II ступеня; на міжнародному конкурсі студентських наукових робіт "Black Sea Science" де представлена на конкурсі робота була відзначена дипломом II ступеня (Одеса, 2018); на всеукраїнському конкурсі "Молодь енергетиці України: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків"

(Київ, 2020), де представлена на конкурсі робота була відзначена дипломом III ступеня.

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано у 17 наукових працях: 8 статей у наукових фахових виданнях (одна з яких внесена до міжнародної бази Scopus і Web of Science, сім статей у фахових виданнях України), 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 84 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 176 сторінок, 46 рисунків, 4 таблиць.

РОЗДІЛ 1 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

1.1 Теоретичні аспекти енергоефективності будівель

Енергоефективність будівель є ключовим фактором у зменшенні енергоспоживання та скороченні викидів парникових газів. Постійно зростаюча актуальність питання раціонального використання енергетичних ресурсів викликана рядом чинників, а саме:

- економічними міркуваннями [1];
- боротьбою з глобальним потеплінням [2,3];
- зменшенням ресурсної бази [4–6];
- відставанням швидкості розвитку відновлювальних джерел енергії від зростаючих енергетичних потреб [7–9];
- зростаючою часткою енергомістких технологічних процесів у економіках розвинених країн [10,11];
- зростаючим попитом на впровадження аспектів стійкого розвитку серед споживачів, а отже і зростаюча пропозиція від забудовників та виробників [12–14].

Будівлі споживають значну частку загального енергетичного балансу, і ефективне управління їхньою енергоємністю є одним із основних завдань сучасної інженерії та архітектури.

Теоретичні аспекти енергоефективності будівель включають комплексне розуміння фізичних процесів теплопередачі, динаміки повітряних потоків, роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВК), а також впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на енергоспоживання.

З одного боку, традиційні підходи до покращення енергоефективності будівель передбачають застосування високотехнологічних рішень, таких як покращена теплоізоляція, енергоефективні віконні системи, використання відновлюваних джерел енергії та автоматизованих систем керування [15]. З іншого

боку, практика експлуатації будівель демонструє, що технічні рішення повинні поєднуватися з урахуванням поведінкових та експлуатаційних особливостей користувачів [16].

Останні дослідження вказують на те, що технічні покращення самі по собі не завжди гарантують очікувані результати в реальних умовах [17]. Значну роль відіграють фактори, пов'язані з експлуатацією будівлі, зокрема режими використання приміщень, особливості зміни кліматичних параметрів, вплив автоматизації на поведінку мешканців та їх суб'єктивне сприйняття комфорту [18]. Все більшої популярності набуває ідея, що системи управління енергоспоживанням повинні враховувати не лише проєктні параметри, а й реальні сценарії використання будівельного середовища [19].

У цьому контексті особливу увагу слід приділяти внутрішнім процесам у будівлях, таким як нерівномірність розподілу тепла, так звані "перетопи" та їх вплив на загальний рівень комфорту [20]. Ці фактори можуть значно змінювати енергетичний баланс та ефективність застосованих заходів з енергозбереження.

Виходячи з вище сказаного, дослідження енергетичних балансів у багатоквартирних житлових будівлях, що має на меті досягти результатів розрахунків на реально існуючому об'єкті, має бути доповнене аналізом поведінкових аспектів користувачів, механізмів регулювання мікроклімату та інтегрованих стратегій керування енергією.

Глибокий аналіз, та як результат, розуміння цих процесів дозволить розробити нові методологічні підходи до оцінювання енергоефективності будівель, які враховують реальні умови експлуатації, що в майбутньому дозволить більш точно прогнозувати реальну економію від впроваджених заходів з енергозбереження (ЗЕЗ).

Додатково, виявлення нових підходів до регулювання енергоспоживання, адаптація технологічних рішень до поведінкових моделей користувачів і впровадження комплексних стратегій управління енергією допоможуть зменшити загальне споживання енергії у багатоквартирних житлових комплексах та підтримувати швидкість покращення ефективності будівельних систем, особливо в

випадках коли ми наблизимось до технічних бар'єрів подальшого збільшення рівня енергоефективності.

1.2 Нормативні аспекти енергоефективності будівель

Не зважаючи на виклики та перспективи розвитку енергоефективності, варто враховувати, що мінімальні вимоги до енергоефективності наразі слугують основою для будь-якого дослідження, оскільки їхньому впровадженню передували глибокий науковий аналіз, а також практичний досвід.

Зважаючи на це, варто дослідити нормативно-правову базу, що регулює енергоефективність в будівлях та спорудах України, та інших країн. Нормативам Європейського союзу було присвячено значну увагу, оскільки вони є близькими до вітчизняних норм, а також Європа приділяє значну увагу енергоефективності.

Закони та будівельні норми України

1. Закон України "Про енергетичну ефективність будівель" [21]

Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» (№ 2118-VIII, ухвалений 22 червня 2017 року) є ключовим нормативно-правовим актом, що закладає правові та організаційні основи для підвищення енергоефективності будівельного фонду України. Він є частиною імплементації Директиви 2010/31/ЄС про енергетичні характеристики будівель, спрямованої на зменшення споживання енергоресурсів та скорочення викидів парникових газів у будівельному секторі.

Закон запроваджує обов'язкову енергетичну сертифікацію будівель, що передбачає аналіз реальних теплових втрат, споживання енергії та відповідність будівель встановленим класам енергоефективності. Це дозволяє оцінювати та прогнозувати потенціал зниження енергоспоживання шляхом впровадження інноваційних технологій, таких як теплоізоляція, системи рекуперації тепла, сонячні панелі та інші відновлювані джерела енергії.

Крім того, в законі висвітлюються такі питання:

- встановлюється мінімальні енергетичні характеристики нових і реконструйованих будівель;
- визначається перспектива переходу на будівництво будівель з майже нульовим енергоспоживанням, що узгоджується з Європейською зеленою угодою та міжнародними ініціативами з декарбонізації;
- передбачається обов'язкове впровадження систем моніторингу енергоспоживання, що відповідає тенденціям у сфері «розумних» будівель та IoT (Internet of Things).

Попри значні теоретичні переваги та значущість закону, наукові дослідження вказують на низку проблем:

- відставання нормативної бази від сучасних інновацій у галузі будівельної фізики, таких як динамічне моделювання енергоспоживання та гібридні системи опалення [22,23];
- поведінкові аспекти енергоспоживання: закон та пов'язані з ним норми не враховують вплив користувачів на кінцеву ефективність заходів, хоча дослідження показують, що експлуатаційні фактори можуть значно змінювати реальне енергоспоживання будівель, особливо в умовах неповної зайнятості [23].

Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» є важливим кроком у формуванні політики енергозбереження, проте його ефективність залежить від комплексного підходу до впровадження науково обґрунтованих рішень. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку методів інтеграції технічних, поведінкових та економічних факторів для досягнення реальної енергоефективності будівельного сектору, а також спиратись на сучасні методи дослідження енергоефективності будівель.

2. Державні будівельні норми (ДБН) в сфері енергоефективності

Документи, що відносять до ДБН є основними регулюючими документами в сфері будівництва, що висувають вимоги до будівництва в Україні, як нових будівель, так і реновації. Частина цих норм фокусується на енергоефективності,

зокрема висуваючи вимоги до мінімального рівня енергоефективності, надаючи методи розрахунків, а також шляхи досягнення цих вимог.

Державні будівельні норми, що фокусуються на енергоефективності:

ДБН В.2.6-31:2021 "Теплова ізоляція та енергоефективність будівель" [24]. Цей документ встановлює науково обґрунтовані принципи проєктування та виконання теплоізоляційних систем, спрямованих на зменшення тепловтрат через огорожувальні конструкції. Він базується на аналізі теплових потоків, розрахунках теплового опору матеріалів та удосконалення конструктивних рішень для забезпечення мінімальних енерговитрат при опаленні та кондиціонуванні. Використання математичного моделювання теплових процесів дозволяє прогнозувати експлуатаційні характеристики будівель і підвищувати їх енергоефективність.

Також в документі визначається класифікація та характеристика теплоізоляційних матеріалів, вимоги до їх монтажу та експлуатації, що сприяє зменшенню енергетичних втрат.

ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування" [25]. Норма визначає вимоги до систем опалення, вентиляції та кондиціонування, їх проєктування, експлуатації та монтажу. з урахуванням принципів гідравліки, аеродинаміки та теплообміну. Висуваються вимоги до ККД опалювальних та холодильного коефіцієнту охолоджувальних приладів, вимоги до герметичності та ізоляції повітропроводів, а також утеплення трубопроводів з теплоносієм. Оскільки норма є обов'язковою до виконання, нею керуються при проєктуванні, будівництві та експлуатації ОВК обладнання.

Стандарт містить алгоритми для визначення необхідних потужностей опалювальних і охолоджувальних систем, враховуючи параметри повітрообміну, температуру зовнішнього середовища та інші фактори.

Також в документі охоплюються всі аспекти забезпечення комфортного мікроклімату в будівлях – від розрахунку теплових навантажень до параметрів вентиляції та кондиціонування.

Забезпечення правильного балансу між енергозатратами та комфортом дозволяє значно знизити витрати на опалення та кондиціювання, що є важливим для сталого розвитку будівництва.

ДСТУ ISO 50001:2020 [26]. Стандарт EN ISO 50001 [27], адаптований до національних умов, представляє систему управління енергією, що базується на циклі PDCA (Plan-Do-Check-Act). Науково обґрунтований підхід передбачає постійний моніторинг, вимірювання та аналіз показників енергоспоживання, що дозволяє організаціям виявляти неефективні ділянки і впроваджувати заходи щодо оптимізації. В основі стандарту лежать принципи системного аналізу та статистичної обробки даних, що сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень у сфері енергетики.

Документ описує впровадження моделі PDCA (Plan-Do-Check-Act), що дозволяє організаціям систематично планувати, впроваджувати, перевіряти та вдосконалювати заходи з управління енергоспоживанням. Є адаптованим до різних типів організацій і дозволяє інтегрувати існуючі енергетичні системи у єдину систему управління, таким чином, сприяючи більш раціональному використанню ресурсів.

Науковий підхід базується на зборі даних, їх аналізі та використанні статистичних методів для виявлення неефективних ділянок та розробки заходів для їх оптимізації.

ДСТУ EN 15232-1:2017 Енергоефективність будівель. Частина 1. Вплив автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями. [28] Цей документ охоплює, автоматизовані системи управління (BAS) та їх вплив на енергетичну ефективність будівель.

Він базується на принципах теорії управління, інтеграції інформаційних технологій і систем моніторингу, що дозволяє динамічно коригувати роботу систем опалення, вентиляції, кондиціювання та освітлення. Науковий підхід, який використовується в даній нормі, включає моделювання енергетичних потоків, аналіз сценаріїв автоматизації та розрахунки потенційних економічних переваг від впровадження, так званих, систем «розумного будинку».

Додатково, документ пропонує методи розрахунку потенційних економічних та енергетичних ефектів від інтеграції систем автоматизації, використовуючи математичне моделювання енергетичних потоків і сценаріїв роботи. Частиною стандарту є поєднання сучасних ІТ-технологій, сенсорних мереж і систем моніторингу у створенні "розумних" будівель, для комплексного адаптивного керування споживанням енергії в режимі реального часу.

ДСТУ EN ISO 52016-1:2022 Енергоефективність будівель. Енергопотреби для опалення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплотою. Частина 1. Методики розрахунку (EN ISO 52016-1:2017, IDT; ISO 52016-1:2017, IDT) [29] та ДСТУ CEN ISO/TR 52016-2:2022 Енергоефективність будівель. Енергетичні потреби для опалення та охолодження, внутрішні температури та потреби в охолодженні і опаленні, ступінь використання енергії. Частина 2 [30]: Ці два державні стандарти регламентують державну методику розрахунку енергетичних потреб для опалення та охолодження будівель.

По своїй суті, є математичною моделлю для визначення енергоефективності будівель, прийнятою на державному рівні, що допомагає об'єктивно визначити та порівняти рівні енергоефективності будівель, а також перевірити відповідність будівель нормам затвердженим в [21]. На додаток, використання цих нормативів на етапі проектування допомагає чітко спланувати заходи щодо покращення рівня енергоефективності будівель, таким чином оптимізуючи баланс капітальних та операційних витрат, при цьому залишаючи достатню гнучкість для врахування специфіки проекту.

ДСТУ 9190:2022 “Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання” [31]. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання» є національним стандартом України, що встановлює вимоги до методів розрахунку енергоспоживання будівель. Цей стандарт набув чинності 1 березня 2023 року, замінивши попередній ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [32].

По суті дана методика є спрощенням [29] та [30] для практичного використання офіційного розрахунку енергоспоживання при: атестації енергоефективності будівель, розробці енергетичних паспортів, оцінці заходів з енергозбереження. Не містить нових методів розрахунку, але роз'яснює параметри і допущення та пояснює, як вибирати метод розрахунку залежно від типу будівлі та цілей.

Довідкові дані з [31] були використані як припущення для задання параметрів внутрішнього мікроклімату в приміщеннях.

З наукової точки зору, наведені нормативні документи становлять комплексну систему вимог та методологій, які ґрунтуються на принципах термодинаміки, будівельної фізики, матеріалознавства та теорії управління енергоспоживанням.

Зважаючи на це, а також на обов'язковість їх виконання при будівництві, нормативні документи, описана вище, були використані в дослідження як базис з подальшим доопрацюванням певних аспектів та впровадженням динамічного енергетичного моделювання для більш точних розрахунків.

Такий підхід дозволяє узгодити запропоновані методи з вітчизняними вимогами, а також актуалізує отримані данні, оскільки враховані найсучасніші тенденції в енергоефективності будівель.

Директиви Європейського союзу

На додаток до вітчизняних нормативів в сфері енергоефективності варто розглянути й Європейські, з ряду причин:

- оскільки Україна орієнтується на інтеграцію у Європейський союз, її нормативна знаходиться в процесі узгодження з нормами ЄС;
- досягнення цілей сталого розвитку є важливою частиною політики ЄС, відповідно, на тенденції в нормативній базі щодо енергоефективності можна покладатись як на провідні [33];

- нормативна база ЄС є однією з найжорсткіших вимог до енергоефективності в світі, хоча й поступається в цьому аспекті деяким окремим країнам.

Європейський Союз розробив низку нормативних актів, що регулюють енергоефективність будівель, промисловості та транспорту. Основні нормативи та документи, що стосуються енергоефективності:

Європейський зелений курс (European Green Deal, 2019) [34]. Передбачає масштабну реновацію будівельного фонду (Renovation Wave). Мета – досягнення кліматичної нейтральності ЄС до 2050 року.

Програма Fit for 55 (2021) [35] Пакет законодавчих ініціатив для скорочення викидів CO₂ на 55% до 2030 року. Висуває вимоги до енергоефективності у всіх секторах економіки.

Директива 2012/27/ЄС (EED - Energy Efficiency Directive) [36]. Визначає загальні зобов'язання для країн-членів ЄС щодо скорочення енергоспоживання на 32,5% до 2030 року. Серед вимог, описаних в документі:

- великі компанії зобов'язані проводити енергоаудити кожні 4 роки;
- встановлює вимоги до енергоефективності в державному секторі.

Директива (ЄС) 2023/1791 (оновлення, та доповнення [36]) [37]. Серед іншого, збільшує зобов'язання щодо скорочення енергоспоживання у державному секторі до 1,9% щорічно, а також додаткові вимоги до підвищення енергоефективності промисловості та транспорту.

Директива 2010/31/ЄС (EPBD - Energy Performance of Buildings Directive) [38]. Визначає мінімальні вимоги до енергетичних характеристик будівель, запроваджує обов'язкову сертифікацію енергоефективності будівель, а також вимагає, щоб всі нові будівлі з 2021 року були будівлями з майже нульовим споживанням енергії (nZEB - Nearly Zero Energy Buildings).

Директива (ЄС) 2018/844 (зміни до [38]) [39]. Посилює вимоги щодо енергоефективності існуючих будівель, впроваджує вимоги до розумних будівельних технологій та автоматизації, а також пропонує фінансові інструменти для модернізації будівельного фонду.

Серед нормативів ЄС, також є додаткові закріплені вимоги до конкретних приладів:

Регламент (ЄС) 2017/1369 [40] – рамковий регламент щодо енергетичного маркування:

- встановлює вимоги до класифікації енергоспоживання побутової техніки (A-G);
- впроваджує QR-коди для швидкого доступу до характеристик товарів.

Регламент (ЄС) 2019/2020 [41] – екодизайн для освітлення. Визначає мінімальні вимоги до енергоефективності ламп і освітлювальних приладів, забороняє використання малоефективних ламп.

Близькими аналогами українських ДБН у сфері енергоефективності є документи EN та ISO.

EN 16798-1:2019 [42] – Енергетична ефективність будівель. Визначення вимог до енергетичних характеристик будівель.

EN ISO 52000-1:2023 [43]– Загальні методи розрахунку енергоспоживання будівлі. Аналог нашого ДСТУ EN ISO 52016-1:2022.

EN 16798-3:2017 [44] – Вимоги до вентиляційних систем у будівлях. Дотичний до нашого ДБН В.2.5-67:2013.

EN 12831-1:2017 [45] – Розрахунок потреби в опаленні будівель. Аналог нашого ДБН В.2.5-67:2013.

ISO 7730:2005 [46] – Ергономіка теплого середовища. Визначення комфорту. Повний аналог в нашій нормативній базі відсутній, частина концепцій перетинається з ДСТУ EN ISO 52016-1:2022.

Ці нормативи є обов'язковими для країн-членів ЄС і безпосередньо впливають на стандарти енергоефективності в Україні в межах імплементації європейського законодавства.

Не зважаючи на спорідненість ДБН з стандартами EN та ISO, можна зазначити ряд відмінностей між ними [47–49]:

- Українські ДБН більш деталізовані та пристосовані до місцевих умов, тоді як EN є гнучкими стандартами, що застосовуються в різних кліматичних умовах Європи;
- в ЄС більший акцент на реальну експлуатаційну ефективність будівель, тоді як ДБН більше орієнтовані на проєктні показники;
- ДБН мають фіксовані нормативні значення та кліматичні коефіцієнти, а європейські стандарти передбачають використання моделей для розрахунків з урахуванням конкретних умов;
- в Україні використовується фіксований набір нормативних значень, тоді як в ЄС допускається адаптивний підхід до проєктування з урахуванням конкретних кліматичних умов;
- регулювання в ЄС більше орієнтоване на реальне споживання енергії, а не тільки на проєктні характеристики.

Підсумовуючи, Українські ДБН більш деталізовані та пристосовані до місцевих умов, тоді як EN є гнучкими стандартами, що застосовуються в різних кліматичних умовах Європи. Українські ДБН є більш жорсткими у своїх вимогах, вони встановлюють мінімальні нормативи без можливості відхилень.

Міжнародні стандарти зеленої сертифікації будівель

На додаток до нормативної бази ЕС та України, в процесі підготовки до роботи було розглянуто ряд програм «зелених» сертифікацій. В цілому, ці програми є добровільними до виконання, та регулюються приватними компаніями. Сертифікація не є безкоштовною, а впровадження мотивується рядом причин: маркетинг, очікування заохочень від держав для проєктів, що обирають одну з сертифікацій, бажання побудувати проєкт відповідно до провідних будівельних практик в стійкому розвитку.

1. BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) [50]

BREEAM – це одна з найстаріших систем оцінки екологічної ефективності будівель, розроблена у Великій Британії в 1990 році. Вона використовує багатокритеріальний підхід до оцінки впливу будівель на довкілля.

Основні вимоги BREEAM:

- енергоефективність: включає оцінку енергетичних витрат, використання поновлюваних джерел енергії та рівня викидів CO₂;
- матеріали: оцінюється вплив матеріалів на довкілля та їх відповідність принципам сталого розвитку;
- вода: оцінюється ефективність використання води, включаючи заходи з її економії;
- екологія та біорізноманіття: враховується вплив будівництва на навколишнє середовище;
- транспорт: оцінюється вплив будівлі на транспортну доступність і розвиток інфраструктури.

BREEAM має гнучку систему оцінки, дозволяючи адаптацію вимог під конкретні країни та регіони.

2. Passive House (Passivhaus) [51]

Passive House – це німецька система сертифікації, яка орієнтована на мінімізацію енергоспоживання будівель за рахунок пасивних заходів.

Основні вимоги Passive House:

- споживання теплової енергії не більше 15 кВт·год/м² на рік для опалення;
- загальне споживання первинної енергії (на всі потреби) – не більше 120 кВт·год/м² на рік;
- герметичність будівлі: $n_{50} \leq 0,6 \text{ год}^{-1}$ (кратність повітрообміну при тиску 50 Па);
- високий рівень теплоізоляції та мінімізація теплових містків;
- ефективна рекуперація тепла (мінімум 75% у системах вентиляції);

Ця система найжорсткіша щодо вимог до споживання енергії, що робить її особливо актуальною для кліматичних зон з холодними зимами. Аналіз вимог даної

системи сертифікації, дозволяють отримати чітке розуміння про передові ідеї в реальному секторі будівництва, з урахуванням реальних технічних можливостей сучасних проєктів.

Система покладається на енергетичне моделювання будівель в програмі WUFI Passive [52].

3. LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) [53]

LEED – американська система сертифікації, розроблена Радою з екологічного будівництва США (USGBC). Вона є однією з найбільш поширених у світі і використовує рейтингову систему для оцінки стійкості будівель.

Основні вимоги LEED:

- енергоефективність та зниження викидів CO₂;
- використання екологічно чистих матеріалів та зменшення відходів;
- ефективне водоспоживання;
- забезпечення якості внутрішнього середовища (зменшення рівня забруднень, вентиляція, денне освітлення тощо);
- транспортна доступність та розвиток інфраструктури;

Верифікація досягнутого рівня енергоефективності, найчастіше проводиться за допомогою динамічного моделювання згідно ASHRAE 90.1 [54,55].

LEED використовує бальну систему оцінювання, проте ряд вимог є обов'язковими до виконання, та має кілька рівнів сертифікації в залежності від досягнутих балів (Certified, Silver, Gold, Platinum).

Вимоги всіх вище згаданих програм прописані в відповідних документах, та мають нормативну базу країни проєкту як базис, висуваючи свої вимоги, лише в випадках, коли вони не зашкоджують виконанню локальних вимог.

Різниця між програмами зеленої сертифікації та вимогами до енергоефективності ЄС та України зведені до таблиці 1.1:

Таблиця 1.1 – Стандарти про енергоефективність України та ЄС і програми зеленої сертифікації

Критерій	Українські ДБН	Європейські нормативи (EN, ISO, EPBD)	BREEAM	Passive House	LEED
Обов'язковість	Обов'язкові	Впроваджуються через національні законодавства	Добровільна	Добровільна	Добровільна
Фокус на енергоефективність	Регламентується питоме енергоспоживання на опалення, охолодження та ГВП	Основний пріоритет – зменшення CO ₂ , вимоги мають певну гнучкість	Широкий підхід (енергія, екологія, вода)	Орієнтована на певний рівень споживання енергії	Бальний підхід, велика гнучкість в стратегії сертифікації

Продовження таблиці 1.1

Теплоізоляція	Вимагає певні рівні терміного опору для кожного типу конструкції	Використовує єдину методологію розрахунків, дозволяючи компенсувати слабкі місця в конструкції будівлі в інших аспектах оболонки	Вимагає відповідності регіональним нормам	Надзвичайно високі вимоги, в тому числі, зменшення теплових мостів, обов'язкове впровадження безперервної ізоляції	Вимагає відповідності регіональним нормам
Комфорт користувачів	Визначає мінімальні вимоги до температури та кратності повітрообміну	Висуває вимоги до цілого ряду параметрів мікроклімату	Включає вимоги до комфорту	Визначає мінімальні вимоги до температур та високі вимоги до якості повітря	Орієнтований на покращення комфорту
Методологія розрахунку енергоефективності	Стаціонарні та квазістаціонарні математичні моделі	Стаціонарні та квазістаціонарні математичні моделі, енергетичне моделювання	Енергетичне моделювання	Енергетичне моделювання	Енергетичне моделювання

Практики, що широко використовуються в системах «зеленої» сертифікації, було використано в подальшому дослідженні, оскільки вони є золотим стандартом в сфері будівництва. Зокрема, особливу увагу було приділено як дані системи висувають та задовольняють вимоги до комфорту споживачів, енергоефективності, повітрообміну. Зокрема, відповідно до практик розглянутих нормативів, динамічне енергетичне моделювання будівлі було обрано як основний метод дослідження.

1.3 Сучасні дослідження, присвячені житловим будівлям та енергетичним балансам в них

Класично, дослідження енергетичної ефективності, як в Україні та за кордоном починаються з аналізу впливу технічних покращень різної направленості. В таких дослідженнях, значну увагу приділяють підвищенню рівня ізоляції, модернізації систем опалення, впровадженню системи енергетичного менеджменту, та комбінаціям цих підходів.

До таких робіт належать [55–61], в деяких з них використовують, ще нове для України, динамічне енергетичне моделювання будівель в DesignBuilder [62] та EnergyPlus [63]. Роботи [55–57] присвячені дослідженню вітчизняних нормативів використовуючі покращені математичні моделі, з метою знаходження взаємодій між частинами споживання, що не проявляються в при стаціонарних та квазістаціонарних методах розрахунку запропонованих українськими ДБН та ДСТУ. [58–61] опираючись на нормативну базу України, досліджують вплив покращення окремих елементів оболонки на кінцеве споживання енергії в будівлях, за допомогою енергетичного моделювання.

З точки зору імплементації енергетичного моделювання в методологію сертифікації прийнятої в Україні є [54], де Шовкалюк М.М. та Зіменко С.В досліджують засади використання енергетичного моделювання в поєднанні з класичним енергетичним аудитом, для точного визначення енергопотреб будівлі.

В [61] автори застосували методи статистичного моделювання для оцінки взаємозв'язків між параметрами будівель, кліматичними умовами та показниками енергоспоживання. Основний підхід в роботі базується на побудові нелінійних

багатовимірних регресійних моделей, що дозволяють більш точно враховувати нелінійний характер взаємодії між змінними. Моделі були верифіковані за допомогою експериментальних даних і порівняльного аналізу.

Такий підхід дозволив комплексно оцінити вплив як зовнішніх (температура, вологість, швидкість вітру), так і внутрішніх факторів (теплова інерція, рівень ізоляції, внутрішні тепловиділення), а отже використання нелінійних регресивних моделей забезпечує кращу точність прогнозування, ніж традиційні лінійні методи.

Під час огляду наявної літератури було підмічено, що більшість робіт використовують класичний підхід, що розглядає будівля як, так званий, чорний ящик, тобто, дослідників, в першу чергу, цікавить взаємодія будівлі з зовнішнім середовищем, а процесам в середині будівлі особливої уваги не приділяється.

На противагу тенденція вітчизняних вчених, закордонні їх колеги активно досліджують це питання, розглядаючи як безпосередню взаємодію між зонами будівлі, так і вплив цієї взаємодії на системи будівлі.

Козлов та Козлова у своїй роботі [64] досліджували вплив локального регулювання опалення на енергоспоживання багатоквартирних будинків. Вони встановили, що навіть при індивідуальному регулюванні температури в окремих квартирах існують значні перетоки тепла між приміщеннями, що змінює загальний енергетичний баланс будівлі.

Дослідження [65] присвячене теоретичним основам теплопередачі в будівлях. У роботі Tamami Kusuda розглянув основи теплопередачі у будівлях, зокрема багатозональні теплові процеси. Автор підкреслює, що врахування теплопередачі між приміщеннями є критичним для точного моделювання енергоспоживання будівель.

Kiavarz та ін. вважають, що класичних підходів для визначення впливу перетоків тепла між приміщеннями, тому в [66] запропонували використати графову модель аналізу енергетичних взаємодій між приміщеннями. Вони довели, що розподіл теплових потоків залежить не лише від температурних параметрів, але й від геометрії будівлі та матеріалів стін.

Zhang та ін. [67] провели експериментальне дослідження впливу вакантних приміщень на перетоки тепла. Вони встановили, що у житлових будівлях із нерівномірним заселенням перетоки тепла можуть суттєво впливати на розподіл теплових навантажень у системах опалення.

A Zhou та ін. [68] дослідили взаємозв'язок між змінами температури та потоками енергії у будівлях. Вони показали, що динамічні процеси теплопередачі між приміщеннями мають суттєвий вплив на рівень енергоспоживання.

Взаємозв'язок технічних рішень та перетоків також підпадають під аналіз.

Наприклад, вплив конструктивних рішень на перетоки тепла досліджують Zhang, Lu і Wang [69]. В роботі вони проаналізували теплові навантаження у будівлях із великими внутрішніми просторами та стратифікованими системами кондиціонування. Вони довели, що перетоки енергії між зонами з різними температурними режимами можуть бути оптимізовані в цьому ключі для зниження загального енергоспоживання.

Основна причина перетоків – різниця температур в приміщеннях, відповідно використання децентралізованого контролю температури робить ці процеси більш виразними. Zhang та ін. в [70] розглянули можливості децентралізованого контролю температури через інтегровані ОВК-системи. Вони зазначили, що ефективне управління потоками енергії між приміщеннями може знизити витрати на опалення та охолодження.

Відповідно до досліджень вище, перетоки енергії між приміщеннями суттєво впливають на енергетичний баланс будівлі. Дослідження підтверджують, що оптимізація цих потоків через покращене проєктування, ефективне зональне керування та вдосконалення теплоізоляційних матеріалів може значно підвищити енергоефективність будівель. Подальші дослідження у цьому напрямку мають включати більш детальні моделювання та, бажано, практичні випробування в реальних умовах експлуатації, оскільки через складнощі реалізації такого дослідження на реальній житловій будівлі, досліджень такого типу гостро не вистачає.

З робіт вище, також видно, що енергетичний баланс будівель є ключовим фактором у забезпеченні їх енергоефективності та комфорту, особливо в випадках врахування внутрішніх процесів в приміщеннях з використанням динамічного моделювання., виходячи з цього, також було розглянуто ряд робіт присвячених і конкретно цьому питанню.

Основними складовими енергетичного балансу є теплова ізоляція, втрати тепла через вентиляцію, використання електроенергії, поведінка мешканців та системи відновлюваної енергії. Літературна база, приведена нижче, досліджує взаємозв'язок між цими факторами та кінцевим споживанням енергії, спираючись на результати українських і міжнародних досліджень.

Ряд досліджень наголошує на значній ролі поведінкових факторів у формуванні кінцевого енергоспоживання будівель. Так, Udin та ін. в [71] зазначають, що контроль внутрішнього середовища мешканцями може істотно впливати на показники енергоефективності. Дослідження Hong та ін. [72] підтверджує, що варіації у поведінці користувачів можуть спричинити значні розбіжності між розрахунковими та фактичними значеннями споживання енергії.

Сучасні Українські роботи, доречі, торкаються цього питання, хоча і фокусуються на неповній зайнятості в період війни. Так, в [23] та [73], розглядаються як вплив поведінки користувачів, так і взаємозв'язок між зонами будівлі в умовах неповної зайнятості, на прикладі школи. Досліджуючи комфорт людей, споживання енергії та пропонуючи технічні рішення для підвищення цих показників при використанні лише частини приміщень будівлі. Серед знахідок, значне зниження комфортності перебування в приміщеннях в такому випадку, рекомендації як це нівелювати, максимізуючи надходження від сонця, змінюючи графік перебування дітей в школі.

Дослідження в схожому ключі проводились і закордонними вченими, правда фокусуючись на нормальній експлуатації. Так, у [74] і [75] розглядається вплив поведінки мешканців на енергетичні характеристики будівель. Автори підкреслюють необхідність врахування поведінкових факторів при моделюванні енергоспоживання для досягнення більш точних результатів.

В контексті технічних рішень, що дозволяють зменшити вплив користувача на енергетичний баланс будівлі, також варто розглянути роботи, що присвячені системам типу «розумний будинок». Системи розумного будинку дозволяють інтегрувати різні елементи енергоспоживання в єдиний контрольований механізм, що скоротити витрати енергії. В теорії, системи такого типу, можуть забезпечити індивідуальний контроль над кожною складовою балансу, та, враховуючи їх зв'язок між собою, скоротити енергоспоживання будівлі, при цьому виключаючи людський фактор.

У дослідженні [76] автори аналізують різні системи автоматизації будівель, такі як розумне освітлення, автоматизоване керування опаленням, вентиляцією та кондиціонуванням повітря (HVAC), як окремі складові енергетичного балансу будівлі. Дослідження показує, що впровадження автоматизованих систем, а також індивідуальний підхід та врахування зв'язку між різними частинами споживання дозволяє зменшити загальне енергоспоживання будівлі до 30% за рахунок адаптивного керування та аналізу поведінки користувачів.

Сучасніші наукові надбання в цій сфері, також намагаються впровадити нейромережі в такі системи.

В [77] автор розглядає вплив IoT-рішень на зміну моделей енергоспоживання. Він виявив, що інтеграція датчиків і штучного інтелекту в системи управління енергією дає змогу скоротити споживання електроенергії, адаптуючись до реальних потреб мешканців, та враховуючи вплив різних складових енергетичного балансу будівлі один-на-одну. Також дослідження підкреслює важливість зворотного зв'язку між користувачами та системою для підвищення енергоефективності.

В вхожому напрямку спрямоване й дослідження [78]. У цій роботі автори аналізують алгоритми адаптивного управління системами HVAC, що використовують машинне навчання для прогнозування потреб в опаленні та охолодженні. Згідно з результатами дослідження, адаптивне управління дозволяє знизити споживання енергії на 20–25% без погіршення комфорту мешканців.

Автори навчають модель враховувати індивідуальні складові балансу, та їх вплив на кінцеве енергоспоживання будівлі.

Автори в [79] фокусуються на застосуванні штучного інтелекту в керуванні енергетичними ресурсами будівель. Вони розглядають використання глибокого навчання для аналізу поведінки користувачів та автоматичного налаштування роботи систем HVAC. Було доведено, що використання AI дозволяє досягати значних знижень у споживанні енергії, особливо в будівлях з нерівномірним навантаженням.

Ці дослідження підкреслюють важливість автоматизації в управлінні енергоспоживанням будівель, демонструючи потенціал сучасних технологій для підвищення ефективності, показуючи, що зі зростанням можливостей систем, автоматизація буде враховувати все більше частин енергетичного балансу будівлі, та зменшуючи негативний вплив користувача на систему.

Узагальнюючи, дослідження показують, що автоматизація сприяє:

- зниженню енергетичних втрат через покращене керування кліматичними параметрами приміщень;
- використанню прогностичного аналізу та алгоритмів машинного навчання для підвищення ефективності енергоспоживання;
- адаптивному регулюванню мікроклімату, що покращує комфорт мешканців і водночас економить енергію.

В українській літературі, питання високотехнологічного регулювання будівель з використанням ШІ та індивідуальним врахуванням різних аспектів енергоспоживання висвітлено слабо.

З розглянутих статей, що присвячені перетокам енергії в середині будівлі, енергетичним балансам будівель, та автоматизації жодна не розглядає вплив таких чинників:

- потенціал систем, що будуть індивідуально регулювати кожен аспект споживання будівлі;
- вплив масивності будівлі на окремі частини енергетичного балансу.

Додатково, було помічено, що дуже мало уваги присвячено системам розумного будинку в реаліях України.

Відповідно, подальше дослідження фокусується на цих питаннях.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі проведено комплексний аналіз теоретичних та нормативних аспектів енергоефективності будівель. Було розглянуто ключові чинники, що впливають на енергоспоживання будівельного сектору, включаючи економічні, екологічні та технологічні аспекти. Визначено, що ефективне управління енергетичним балансом будівель є перспективним напрямком сучасної інженерії та архітектури, пропонуючи як високий потенціал досліджень, так і значну інтеграцію з сучасними технологіями ІІІ, нейромереж та машинного навчання.

Теоретичні основи енергоефективності включають в себе детальне вивчення механізмів теплопередачі, динаміки повітряних потоків, експлуатаційних особливостей систем опалення, вентиляції та кондиціонування.

Розглянуті нормативні документи свідчать про узгодженість наявних загальноприйнятих методик оцінки енергетичної ефективності будівель та науковість запропонованих підходів як в Українській та Європейській нормативних базах, які багато в чому відповідають одна одній, так і приватних сертифікаційних програм. Огляд нормативної документації був використаний в роботі як базис для подальшого дослідження, гарантуючи, що результати не будуть суперечити мінімальним вимогам, а також використовуючи надбання передових стандартів в сфері сталого будівництва.

Варто зазначити, що аналіз показав певні недоліки сучасної вітчизняної нормативної бази, а саме щодо врахування динамічних сценаріїв використання будівельного середовища. Європейські та міжнародні стандарти, такі як ISO та EN, роблять акцент на адаптивних моделях енергоспоживання та забезпеченні реальної ефективності, тоді як українські ДБН орієнтовані на встановлення чітких нормативних значень, та стаціонарні або квазістаціонарні математичні моделі.

Аналіз сучасних досліджень показав, що досягнення високого рівня енергоефективності вимагає не лише впровадження технологічних інновацій, таких як теплоізоляційні матеріали, енергоефективні віконні системи чи відновлювані джерела енергії, але й врахування поведінкових та експлуатаційних факторів, а також показав, що в сучасних реаліях не лише є можливим розглядати будівлю не як «чорний ящик», але й це має свої переваги перед ігноруванням внутрішніх процесів між зонами будівлі.

Окрему увагу приділено питанням автоматизації енергоспоживання. Впровадження систем «розумний будинок» дозволяє не лише знижувати енергетичні втрати, а й адаптувати параметри мікроклімату до реальних умов експлуатації, а також зменшувати людський фактор в енергоспоживанні, роблячи прогнозування реальних процесів в будівлях простішим. Передові дослідження в цьому питанні розглядають використання штучного інтелекту, нейромереж, машинного навчання та Інтернету речей у будівлях, виводячи адаптивність систем автоматизації на рівень раніше недоступний, що дозволяє досягти додаткового скорочення енергоспоживання без зниження рівня комфорту.

Таким чином, сучасне оцінювання енергоефективності будівель вимагає комплексного підходу, що включає:

- використання сучасних методів математичного моделювання для прогнозування енергетичних характеристик будівель;
- урахування поведінкових та експлуатаційних факторів для забезпечення ефективної роботи будівельних систем;
- інтеграцію автоматизованих систем управління енергоспоживанням з можливістю адаптації до реальних умов експлуатації.

Отримані результати свідчать про необхідність подальших досліджень у напрямку вдосконалення методологій оцінки енергоефективності, особливо з урахуванням впливу автоматизації, масивності будівлі, індивідуальних складових енергетичного балансу будівлі та поведінкових аспектів на реальне енергоспоживання будівель.

РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі обґрунтовано підхід до моделювання енергетичних характеристик житлової будівлі, обраної як об'єкт дослідження. Розділ присвячено підготовці вхідних даних та побудові енергетичної моделі будівлі, що забезпечує адекватність подальших розрахунків. Представлено детальний опис геометричних, конструктивних та теплотехнічних властивостей будівлі, що дозволяє забезпечити високий рівень відповідності моделі до реальних умов експлуатації.

Особливу увагу приділено методиці моделювання, заснованій на динамічному підході, що забезпечує можливість урахування змін кліматичних факторів, теплової інерційності огорожувальних конструкцій, добових та сезонних коливань зовнішнього середовища, а також взаємодії теплових потоків між приміщеннями. Такий підхід дозволяє оцінювати не лише загальне річне енергоспоживання, а й динаміку внутрішніх процесів, що мають важливе значення при запровадженні заходів з термомодернізації або удосконалення режимів опалення.

У розділі наведено ключові параметри енергетичної моделі, використаної у подальших розрахунках, та обґрунтовано її застосовність для аналізу різних сценаріїв експлуатації будівлі, включаючи нестандартні умови, такі як часткове або повне відключення системи тепlopостачання.

2.1 Характеристики об'єкту дослідження

Як основу для проведення досліджень і побудови енергетичної моделі було обрано багатоквартирний житловий будинок ОСББ «Наш дім на Галана», розташований у житловому масиві міста Києва за адресою: вул. А. Волошина (колишня Я. Галана), 2 (рисунок 2.1). Будівля зведена за індивідуальним спеціальним проектом і введена в експлуатацію у 1993 році. Архітектурно-планувальні рішення відображають характерну для початку 1990-х років

орієнтацію на створення багатоквартирного житлового фонду в умовах щільної міської забудови.



Рисунок 2.1 – ОСББ «Наш дім на Галана»

Будівля має 12 поверхів і складається з чотирьох секцій (під'їздів), кожна з яких містить по чотири квартири на поверсі (дві двокімнатні та дві трикімнатні), а також сходові клітини й коридори загального користування. На фасаді переважають засклені балкони та лоджії, що формують складну теплотехнічну конфігурацію огорожувальних конструкцій.

Перший поверх будівлі займають нежитлові приміщення комерційного призначення, які здаються в оренду. Їх режим опалення та експлуатації може суттєво відрізнятися від житлових поверхів і впливає на внутрішній тепловий баланс будівлі.

Для формування енергетичної моделі будівлі було використано узагальнені параметри, які базуються на даних технічної документації, результатах візуального обстеження, а також матеріалах енергетичного аудиту, що проводився для цього об'єкта. Додатково було зібрано інформацію про фактичне споживання теплової енергії протягом опалювальних сезонів, що дозволило використати ці дані для верифікації результатів моделювання.

Варто зазначити, що деякі параметри будівлі в моделі були адаптовані чи узагальнені з метою покращення відтворюваності й можливості аналізу різних сценаріїв експлуатації. Отже, ця будівля не є точним об'єктом дослідження в класичному розумінні, але виконує роль репрезентативного прототипу для дослідження теплотехнічної поведінки типової багатоповерхової житлової споруди.

Узагальнені параметри будівлі наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Загальна інформація про об'єкт дослідження

Рік будівництва	1993
Кількість поверхів, шт	12
Площа забудови, м ²	1754
Об'єм будівлі, м ³	65860
Загальна площа, м ²	13441,4
Площа балконів і терас, м ²	998
Житлова площа, м ²	6863
Кількість квартир, шт	175
Кількість кімнат, шт	431
Площа квартир, м ²	11111
Площа нежитлових приміщень, м ²	1941
Площа крівлі, м ²	1518
Площа фасадів, м ²	8844

На підставі зібраної інформації дана будівля була обрана як основа для формування типового сценарію енергетичного моделювання, що дозволяє оцінити ефективність різних режимів роботи систем опалення та термомодернізаційних заходів у багатоквартирних житлових будинках аналогічного типу.

2.2 Опис методики енергетичного моделювання

Енергетичне моделювання будівель є інструментом, що дозволяє здійснювати чисельну оцінку енергоспоживання, теплових потоків, коливань температури та впливу різних змін на енергоефективність будівлі. На відміну від спрощених розрахункових методик, які зазвичай базуються на статичних середньомісячних показниках, динамічне моделювання забезпечує значно детальніше прогнозування теплових процесів, що відбуваються в будівлі в динамічному розрізі. Це особливо актуально при дослідженні нестационарних сценаріїв, таких як перерви в опаленні, зміна температурного режиму або вплив інерційності огорожувальних конструкцій.

У цьому дослідженні реалізовано погодинний підхід до моделювання, тобто всі основні розрахункові параметри (температура повітря, тепловтрати, внутрішні надходження, навантаження системи опалення тощо) визначаються з годинним кроком протягом усього року. Такий підхід дозволяє точно простежити вплив короткострокових змін, зокрема нічного або денного зниження температури, аварійного відключення опалення чи варіативної присутності мешканців.

Оскільки об'єктом дослідження є житлова багатоквартирна будівля, модель було реалізовано як багатозональну, із виділенням окремих теплових зон для квартир з різною орієнтацією, суміжних приміщень, коридорів та нежитлових площ. Це дозволяє оцінити не лише загальне енергоспоживання, а й локальні впливи, наприклад, зростання навантаження на опалення однієї зони при знижених температурних умовах сусідньої.

Модель є динамічною, тобто враховує теплову інерційність конструкцій, акумуляцію тепла, зміну зовнішньої температури, сонячну інсоляцію, внутрішні теплові надходження (від людей, побутових приладів, освітлення) та втрати на

інфільтрацію. Завдяки цьому забезпечується можливість аналізу поведінки будівлі в умовах змінного середовища та нештатних режимів експлуатації.

Загальна методика моделювання базується на енергетичному балансі для кожної зони: для кожної годинної точки визначаються всі потоки теплової енергії, що надходять у приміщення чи залишають його через огорожувальні конструкції, вентиляційні системи або інші джерела. Система опалення в моделі працює як механізм компенсації цих втрат, підтримуючи задану температуру з урахуванням встановлених сценаріїв її зміни.

Таким чином, побудована модель дозволяє не лише виконати загальну оцінку енергоефективності, а й проаналізувати широкий спектр сценаріїв, що включають часткові та повні відключення опалення, зміни режимів споживання та вплив теплотехнічних характеристик будівельних конструкцій на поведінку системи.

2.2.1 Етапи реалізації енергетичного моделювання

Процес створення енергетичної моделі будівлі в рамках цього дослідження базувався на поетапному підході, який охоплює повний цикл – від збору даних про реальний об'єкт до проведення багатоваріантного параметричного аналізу. Послідовність основних етапів подано на рисунку 2.2.

1. *Збір та підготовка вхідних даних.* На цьому етапі проводилася інспекція і енергоаудит об'єкту дослідження, виконувався збір інформації про геометричні, конструктивні та експлуатаційних характеристик будівлі. Використовувалися матеріали технічної документації, результати візуального обстеження, а також дані енергетичного аудиту. Плани поверхів були оцифровані, а отримані креслення адаптовані для подальшої роботи у середовищі моделювання.

2. *Побудова базової 3D-моделі в DesignBuilder.* На основі підготовлених креслень і конструктивних параметрів виконувалося формування тривимірної оболонки будівлі. Модель включала поділ на теплові зони, з урахуванням орієнтації приміщень та типів огорожувальних конструкцій. Після цього здійснювалося налаштування геолокації та підключення кліматичних даних типового погодного року для м. Київ.

3. *Налаштування теплофізичних властивостей конструкцій.* Кожен елемент огорожувальної оболонки (стіни, вікна, перекриття, дах, підлога) описувався з урахуванням шару матеріалів, товщини та термічного опору. Теплопровідність, щільність і теплоємність матеріалів були обрані відповідно до ДБН та довідкових джерел. Для побудови достовірної енергетичної моделі визначаються граничні умови, що враховують зовнішні кліматичні впливи, тепловий контакт із суміжними зонами та режими роботи інженерних систем.

4. *Налаштування параметрів інженерних систем.* У модель інтегрувалися системи опалення, вентиляції, освітлення, побутових навантажень і внутрішніх джерел тепла (люди, обладнання). Для кожної системи налаштовувалися режими роботи, потужність і часові графіки.

5. *Визначення графіків експлуатації.* Задавалися сценарії присутності людей, режимів використання приміщень, активності побутових приладів і систем освітлення. Це дозволяє моделювати реалістичні умови енергоспоживання.

6. *Експорт в EnergyPlus і верифікація.* Після завершення налаштувань модель експортувалася в симулятор EnergyPlus, де перевірялася на коректність імпорту та додатково уточнювалася. Було реалізовано сценарії для порівняння варіантів термомодернізації, відключень опалення, зміни температурного режиму.

Після експорту моделі в EnergyPlus та проведення попередніх симуляцій було здійснене уточнення параметрів моделі згідно з результатами енергетичного аудиту та фактичним енергоспоживанням, що дозволило підвищити достовірність подальших розрахунків.

7. *Налаштування параметричного аналізу.* Задані змінні параметри (орієнтація, масивність огорожувальних конструкцій, заходи з термомодернізації, сценарії опалення) групувалися у моделі та передавалися на симуляцію в різних комбінаціях. Також визначалися ключові вихідні параметри – температурні профілі, теплові потоки, енергоспоживання.

8. *Проведення симуляцій та аналіз результатів.* За допомогою EnergyPlus проводилися годинні симуляції протягом усього опалювального періоду. Отримані результати візуалізувалися у вигляді графіків, гістограм та

балансів. Після цього здійснювалася їх інтерпретація з точки зору теплової поведінки будівлі, енергоспоживання та потенційних заходів підвищення ефективності.

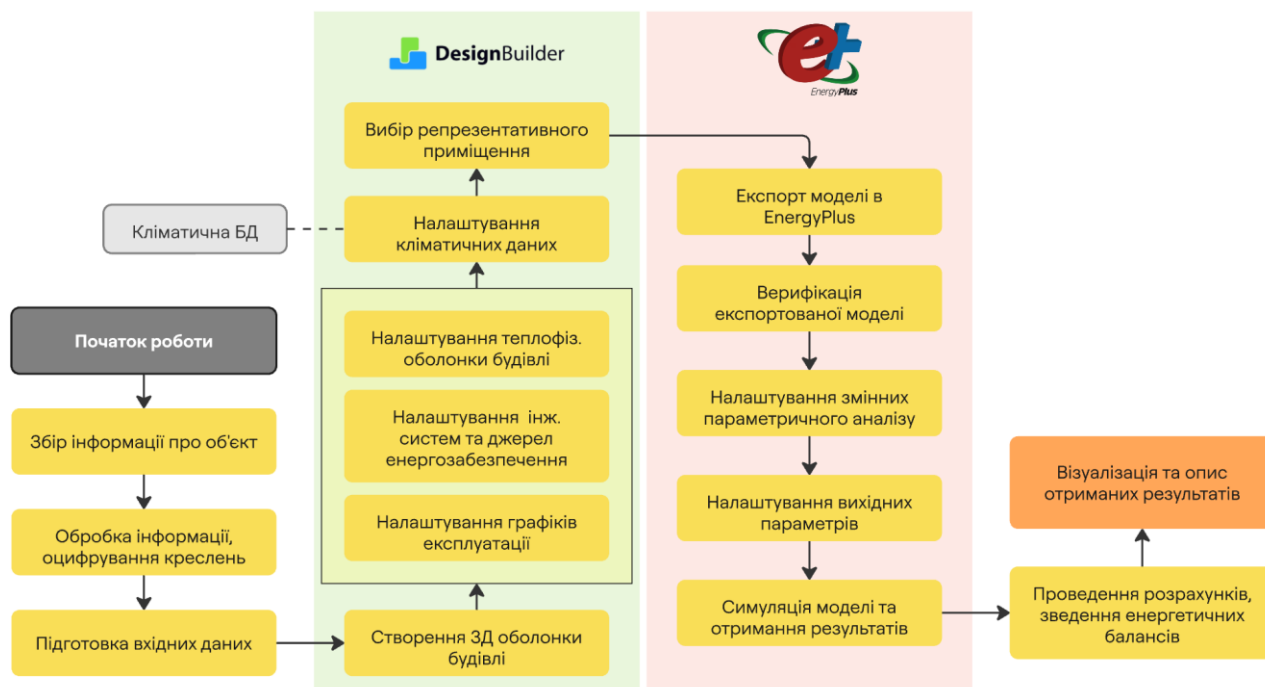


Рисунок 2.2 – Схема проведення досліджень

2.2.2 Програмне забезпечення для енергетичного моделювання будівель

Для реалізації енергетичного моделювання у цьому дослідженні використано зв'язку програмного забезпечення DesignBuilder як графічного інтерфейсу для побудови моделі будівлі та EnergyPlus як розрахункового ядра. Такий підхід поєднує зручність 3D-моделювання з широкими технічними можливостями обчислювального рушія.

DesignBuilder – це інтегроване програмне середовище, яке дозволяє створювати тривимірні моделі будівель, налаштовувати їхні геометричні, теплофізичні та експлуатаційні параметри, а також здійснювати початковий аналіз енергоефективності. Завдяки своїй зручності та гнучкості, у світовій практиці DesignBuilder широко застосовується в комерційних цілях: для оцінки рівня енергоефективності будівель, перевірки відповідності нормативам та участі у

програмах сталого розвитку і зеленої сертифікації (зокрема, LEED, BREEAM тощо) та при проходженні процедур підтвердження енергоефективності відповідно до національних і міжнародних будівельних норм. Основні можливості DesignBuilder, які використовувалися в рамках цього дослідження:

- Побудова 3D-геометрії будівлі з можливістю деталізації зон, поверхів, вікон, дверей і будівельних елементів;
- Налаштування будівельних конструкцій: матеріалів, товщин, теплопровідності, теплоємності та опорів теплопередачі;
- Імпорт кліматичних даних з бази даних IWEC [80];
- Задання графіків експлуатації, включаючи присутність мешканців, освітлення, електроприлади, графіки роботи систем;
- Налаштування інженерних систем: опалення, вентиляції;
- Експорт до EnergyPlus для виконання повного динамічного розрахунку.

EnergyPlus є високоточним інструментом для динамічного енергетичного моделювання, що дозволяє проводити симуляції з годинним або меншим кроком протягом року. Програма враховує широкий спектр фізичних процесів:

- Теплопередача через огорожувальні конструкції, включаючи теплову інерцію матеріалів;
- Інфільтрація та вентиляція, з можливістю застосування різних алгоритмів моделювання (DesignFlowRate, FlowCoefficient тощо);
- Тепловий комфорт мешканців та вплив внутрішніх джерел тепла;
- Вплив сонячного випромінювання, включаючи геометричне затінення;
- Навантаження на системи (опалення, охолодження, вентиляція) та їх енергоспоживання;

EnergyPlus є надзвичайно гнучким та деталізованим інструментом, що дозволяє моделювати широкий спектр теплофізичних процесів із високим рівнем точності. Водночас, через складність структури, потребу в глибокому налаштуванні параметрів та специфічний формат виводу, його застосування у комерційних проєктах може бути недоцільним. Проте саме ці характеристики

роблять EnergyPlus ефективним вибором для проведення наукових досліджень та високоточних інженерних симуляцій.

Складові теплового балансу в EnergyPlus

У рамках дослідження для поглибленого аналізу теплових процесів у будівлі використовувалася деталізація теплового балансу з урахуванням розподілу теплових потоків між різними складовими. Завдяки інструментарію EnergyPlus, теплові потоки моделювалися з урахуванням фізичної природи процесів (конвекція, радіація, провідність, інфільтрація тощо):

1. Теплонадходження від системи опалення

Тепловий потік від системи опалення можна розділити на дві складові, які відповідають різним механізмам передачі енергії у простір приміщення:

- Radiant Heating Rate – інтенсивність радіаційного теплового потоку від системи опалення;
- Convective Heating Rate – конвективне надходження тепла до повітря приміщення.

2. Теплообмін через огорожувальні конструкції (Рисунок 2.3)

Теплообмін між внутрішнім повітрям і конструктивними поверхнями приміщення (стінами, підлогою та стелею) описується як сукупність трьох основних компонентів:

- Surface Inside Face Convection Heat Gain Rate – конвективний обмін тепла між повітрям приміщення та внутрішньою поверхнею стіни;
- Surface Inside Face Net Surface Thermal Radiation Heat Gain Rate – довгохвильове радіаційне випромінювання між внутрішніми поверхнями;
- Surface Inside Face System Radiation Heat Gain Rate – радіаційне тепло, передане від системи опалення до поверхонь конструкцій.

3. Теплові потоки через вікна

Тепловий потік через віконні конструкції (Surface Window Net Heat Transfer Rate) моделюється з урахуванням окремих складових:

- Раму, яка моделюється як окрема будівельна конструкція з відповідним коефіцієнтом теплопередачі;
- Прозору частину, що деталізується за допомогою двох основних складових:
 - Surface Window Inside Face Glazing Zone Convection Heat Gain Rate – конвекційна передача тепла до/від повітря зони;
 - Surface Window Inside Face Glazing Net Infrared Heat Transfer Rate – інфрачервоне випромінювання (довгохвильове) між склінням та іншими внутрішніми поверхнями.

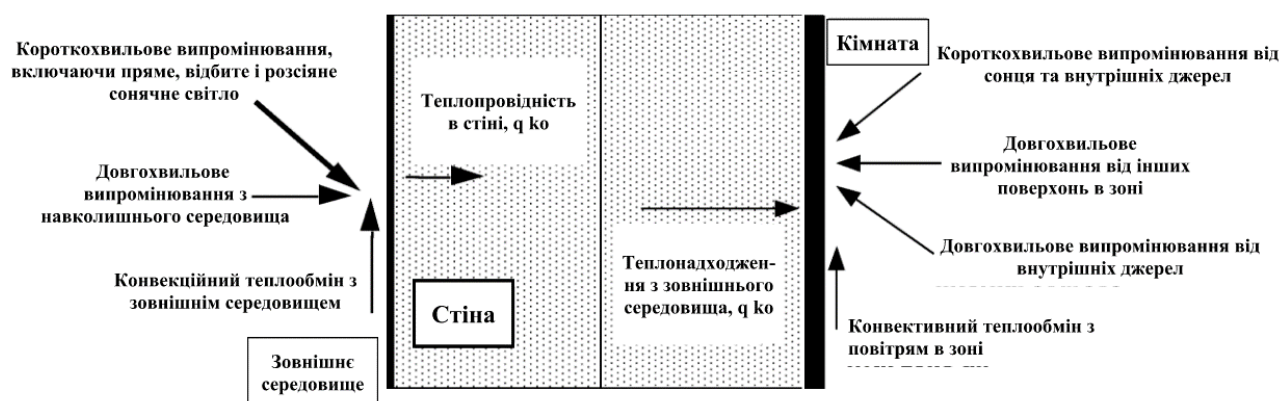


Рисунок 2.3 – Теплові потоки через зовнішню стіну будівлі

4. Внутрішні теплонадходження

Джерела внутрішніх теплонадходжень включають:

- Людей (Zone Lights Total Heating Rate) з урахуванням фізичної активності, кількості осіб та їх присутності в приміщенні;
- Освітлення (Zone People Total Heating Rate), враховуючи графіки ввімкнення та питомі характеристики джерел світла;
- Побутові прилади (Zone Other Equipment Total Heating Rate), який включає теплові надходження від кухонного обладнання, холодильників, комп'ютерної техніки тощо.

5. Сонячні теплонадходження

Сонячне випромінювання моделювалося як короткохвильове надходження через світлопрозорі конструкції (вікна), враховуючи пряме, відбите та розсіяне світло. Zone Windows Total Transmitted Solar Radiation Rate, відображає кількість сонячної радіації, що передається крізь віконні конструкції в межі теплової зони. Цей компонент дозволяє оцінити внесок сонячних надходжень у загальний тепловий баланс приміщення з урахуванням геометрії, орієнтації, типу скління та затінення.

6. Інфільтрація

Повітрообмін є одним із ключових чинників, що впливають на тепловий режим та енергоспоживання будівлі [31]. Його роль полягає не лише у забезпеченні належної якості повітря в приміщеннях, а й у формуванні загального енергетичного балансу. Особливо важливо враховувати повітрообмін у холодному кліматі, де на підігрів припливного повітря витрачається значна частка енергетичних ресурсів, необхідних для підтримання комфортної температури в опалювальний період.

У програмному середовищі EnergyPlus реалізовано низку алгоритмів, що дозволяють моделювати як вентиляційні, так і інфільтраційні потоки повітря. Вибір відповідного методу залежить від специфіки дослідження та доступних вхідних даних. Зокрема, інфільтрація враховується як неконтрольований повітрообмін, що виникає внаслідок нещільностей у будівельних конструкціях (вікнах, дверях тощо), і може бути змодельована з урахуванням впливу вітру, температурного градієнта та геометричних параметрів будівлі.

Кожен із вбудованих алгоритмів має власну систему параметризації та математичні моделі, що дозволяють моделювати як сталий, так і змінний характер повітрообміну. Деякі з методів базуються на заданому сталому значенні витрати повітря, тоді як інші враховують реальні фізичні властивості будівлі та змінні кліматичні умови. Такий підхід забезпечує високий рівень деталізації моделі та дозволяє більш точно оцінити вплив повітрообміну на енергетичну ефективність будівлі.

Ці алгоритми враховують комплекс зовнішніх і внутрішніх чинників: температуру, вологість, швидкість вітру, площу нещільностей, орієнтацію отворів, типи конструкцій тощо. Такий підхід забезпечує можливість адаптивного моделювання повітрообміну з високим рівнем деталізації, що є особливо важливим для енергетичного аналізу будівель та прийняття ефективних рішень щодо заходів з енергозбереження. Нижче показані основні алгоритми, що використовуються для розрахунку повітрообміну в будівлях:

- **ZoneInfiltration:DesignFlowRate** – найпоширеніший алгоритм для розрахунку інфільтрації, який базується на заданому проєктному значенні повітрообміну з можливістю коригування на температурну різницю та швидкість вітру.
- **ZoneInfiltration:EffectiveLeakageArea** – модель, що оцінює інфільтраційні потоки на основі ефективної площі нещільностей. Розрахунки виконуються з урахуванням геометрії огорожувальних конструкцій та впливу зовнішніх умов, таких як температура, швидкість вітру і вологість.
- **ZoneInfiltration:FlowCoefficient** – алгоритм, що оперує коефіцієнтом проникності, визначеним на основі емпіричних або експериментальних даних. Дозволяє враховувати складну залежність між температурним градієнтом, вітром і тисковими перепадами.
- **ZoneVentilation:DesignFlowRate** – підхід, що оперує фіксованим значенням повітряного потоку для розрахунку вентиляційних процесів. Використовується в ситуаціях, де доступна або задана конкретна величина витрати повітря.
- **ZoneVentilation:WindandStackOpenArea** – алгоритм, який моделює природну вентиляцію через прорізи (вікна, отвори), враховуючи дію вітру та термічної тяги. До уваги беруться параметри отворів і кліматичні умови, що впливають на повітрообмін.
- **ZoneAirBalance:OutdoorAir** – метод балансування повітряних потоків між зовнішнім та внутрішнім середовищем. Забезпечує розрахунок

припливу або видалення повітря для підтримки цільового рівня вентиляції приміщення.

У цьому дослідженні для моделювання інфільтраційних процесів використано алгоритм ZoneInfiltration:DesignFlowRate, реалізований у середовищі EnergyPlus. На відміну від підходів, які базуються на фіксованому значенні кратності повітрообміну, дана модель дозволяє враховувати динамічні зміни умов зовнішнього та внутрішнього середовища. Зокрема, обсяг інфільтраційного повітря визначається з урахуванням добових та сезонних коливань температури, швидкості вітру, режиму експлуатації приміщення, що забезпечує більш реалістичне відтворення фактичної тепловтрати. У холодний період року, коли температурний перепад між середовищами максимальний, значення інфільтрації суттєво зростає порівняно з умовним нормативним рівнем, який часто застосовується у стандартних розрахунках [31].

Розрахунок інфільтраційного повітрообміну здійснюється відповідно до формули 2.1:

$$\text{Інфільтрація} = (I_{\text{пр}})(F_{\text{графік}})[A + B |T_{\text{вн}} + T_{\text{зовн}}| + C (\text{Шв. Вітру}) + D (\text{Шв. Вітру}^2)], \quad (2.1)$$

де $I_{\text{пр}}$ – це проєктне значення інфільтрації, яке визначає очікуваний потік повітря через інфільтрацію при стандартних умовах, m^{-1} ;

$F_{\text{графік}}$ – фактор відображає графік роботи та режим експлуатації будівлі. Він враховує зміни в інфільтрації в залежності від часу і дня тижня;

$T_{\text{вн}}$ – внутрішня температура повітря, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{\text{зовн}}$ – зовнішня температура повітря, $^{\circ}\text{C}$;

Шв. Вітру – швидкість вітру згідно кліматичних даних, m/s ;

A , B , C і D – емпіричні коефіцієнти, що враховують вплив температурного перепаду та вітрових факторів.

2.2.3 Математичні рівняння теплових потоків у багатозонній моделі

Для опису динамічних процесів теплообміну в багатозонній енергетичній моделі будівлі використовуються математичні рівняння, що базуються на балансі теплових потоків повітряних зон та поверхонь огорожень. Такий підхід, реалізований у програмному комплексі EnergyPlus, дозволяє враховувати перехідні режими роботи інженерних систем, змінні зовнішні умови та міжзонні взаємодії протягом розрахункового періоду з високою точністю та погодинною дискретизацією.

Найбільш поширеним підходом до розв'язання цієї задачі є формулювання рівнянь теплового балансу, що базуються на принципі збереження енергії та дають змогу визначити зміну температури в зонах із урахуванням усіх суттєвих теплових потоків у реальному часі.

Ключовим рівнянням, яке описує динамічну зміну температури повітря в кожній зоні будівлі, є диференціальне рівняння теплового балансу зонального повітря, яке визначає швидкість зміни температури повітря зони, враховуючи внутрішні теплонадходження, теплообмін з поверхнями, міжзонні потоки повітря, інфільтрацію зовнішнього повітря та роботу інженерних систем. Аналітичне формулювання цього рівняння представлено формулою (2.2):

$$C_Z \frac{dT_Z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_Z) + \\ + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{Zi} - T_Z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_Z) + \dot{Q}_{sys}, \quad (2.2)$$

де $C_Z \frac{dT_Z}{dt}$ – зміна внутрішньої енергії повітряної зони у часі, Дж/с;

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ – сума внутрішніх теплових надходжень від приладів, освітлення та людей, Вт;

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_Z)$ – конвективний теплообмін між поверхнями огорожень і повітрям у зоні, Вт;

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{Zi} - T_Z)$ – теплообмін при міжзонному масопереносі повітря, Вт;

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_Z)$ – тепловіддача за рахунок інфільтрації зовнішнього повітря, Вт;
 \dot{Q}_{sys} – інженерні системи вентиляції та опалення, які підводять або відводять тепло від зони будівлі, Вт;
 $C_Z = \rho_{air} C_p C_T$ – ефективна теплоємність повітря зони, Дж/К;
 ρ_{air} – густина повітря у зоні, кг/м³;
 C_p – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);
 C_T – коригувальний коефіцієнт до теплоємності.

Розрахунок теплових втрат і надходжень через огорожувальні конструкції в багатозонних моделях виконується на основі детального балансу потоків енергії на зовнішній поверхні стіни. Це дозволяє враховувати всі суттєві процеси теплообміну, що впливають на загальний енергетичний баланс будівлі, зокрема поглинання сонячної радіації, випромінювання, конвективний теплообмін ззовні та теплопровідність через стіну.

Тепловий баланс на зовнішній поверхні описується рівнянням 2.3:

$$q''_{sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0, \quad (2.3)$$

де q''_{sol} – густина теплового потоку від сонячної радіації, Вт/м²;
 q''_{LWR} – густина теплового потоку від довгохвильового випромінювання, Вт/м²;
 q''_{conv} – конвективна складова теплового потоку, Вт/м²;
 q''_{ko} – густина теплового потоку через огорожувальну конструкцію, Вт/м².

В основі методики теплового балансу лежить внутрішній баланс енергії для поверхонь, що оточують зону. Такий баланс охоплює всі ключові процеси теплообміну: провідність через огороження, конвекцію з повітрям зони, поглинання короткохвильового випромінювання (від сонця і світильників), а також взаємодію з довгохвильовим випромінюванням (від поверхонь, обладнання та людей). Сукупний вплив усіх цих потоків визначає тепловий стан внутрішньої поверхні та термодинамічні умови у приміщенні.

Тепловий баланс на внутрішній поверхні описується у вигляді рівняння 2.4:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0, \quad (2.4)$$

де q''_{LWX} – густина теплового потоку від довгохвильового (інфрачервоного) випромінювання між поверхнями всередині зони або групи зон, Вт/м²;

q''_{SW} – густина теплового потоку короткохвильового випромінювання від освітлювальних приладів на поверхню, Вт/м²;

q''_{LWS} – густина теплового потоку довгохвильового випромінювання від обладнання у зоні або групі зон, Вт/м²;

q''_{ki} – густина теплового потоку через огорожувальну конструкцію (стіну), Вт/м²;

q''_{sol} – густина теплового потоку поглинутої сонячної радіації на поверхні, Вт/м²;

q''_{conv} – густина конвективного теплового потоку до повітря зони, Вт/м².

Одним із ключових етапів розрахунку динамічного теплового балансу в енергетичних моделях багатозонних будівель є опис теплопровідності через огорожувальні конструкції. Для цього у сучасних моделях, таких як EnergyPlus, застосовується метод кондуктивної передавальної функції (Conduction Transfer Function, CTF), що дозволяє точно врахувати теплову інерційність матеріалів та акумулювання енергії стінами.

Основна ідея методу CTF полягає у представленні щільності теплового потоку на поверхні огороження як лінійної комбінації температур на внутрішній та зовнішній поверхнях, а також історичних (відкладених у часі) значень температур і теплових потоків. Це дозволяє замінити складні інтегрально-диференціальні рівняння на систему алгебраїчних співвідношень з фіксованим числом коефіцієнтів.

Базове рівняння факторів відгуку для зовнішньої стіни:

$$q''(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta}, \quad (2.5)$$

де $q''(t)$ – густина теплового потоку через зовнішню поверхню конструкції у момент часу t , Вт/м²;

$T_{o,t-j\delta}$ – температура зовнішньої поверхні в момент часу $t-j\delta$, °C;

$T_{i,t-j\delta}$ – температура внутрішньої поверхні в момент часу $t-j\delta$, °C;

X_j, Y_j – коефіцієнти СТФ для відповідної конструкції (визначаються типом і шарами огороження), Вт/(м²·K);

δ – часовий крок дискретизації, с.

На основі узагальненого представлення (2.5) алгоритм СТФ переходить від нескінченної серії температурних значень до скінченної системи алгебраїчних рівнянь, де фіксовані коефіцієнти зберігають температурну історію конструкції.

У такому формулюванні тепловий потік на кожній стороні огороження виражається через рівняння 2.6 і 2.7:

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta}, \quad (2.6)$$

де $q''_{ki}(t)$ – густина теплового потоку через внутрішню поверхню конструкції, Вт/м²;

Z_o, Z_j – коефіцієнти СТФ для внутрішньої поверхні, Вт/(м²·K);

Y_o, Y_j – перехресні коефіцієнти СТФ, Вт/(м²·K);

$T_{i,t-j\delta}$ – температура внутрішньої поверхні у момент часу $t-j\delta$, °C;

$T_{o,t-j\delta}$ – температура зовнішньої поверхні у момент часу $t-j\delta$, °C;

Φ_j – потокові коефіцієнти СТФ (безрозмірні);

$q''_{ki,t-j\delta}$ – густина теплового потоку через внутрішню поверхню у момент часу $t-j\delta$, Вт/м²;

nz – кількість температурних членів;

nq – кількість поточкових членів;

δ – часовий крок дискретизації, с.

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta}, \quad (2.7)$$

де $q''_{ko}(t)$ – густина теплового потоку через зовнішню поверхню конструкції, Вт/м²;

Y_o, Y_j – перехресні коефіцієнти СТФ, Вт/(м²·K);

X_o, X_j – коефіцієнти СТФ для зовнішньої поверхні, Вт/(м²·K);

$T_{i,t-j\delta}$ – температура внутрішньої поверхні у момент часу $t-j\delta$, °C;

$T_{o,t-j\delta}$ – температура зовнішньої поверхні у момент часу $t-j\delta$, °C;

Φ_j – потокові коефіцієнти CTF (безрозмірні);

$q''_{ko,t-j\delta}$ – густина теплового потоку через зовнішню поверхню у момент часу $t-j\delta$, Вт/м²;

n_z – кількість температурних членів;

n_q – кількість поточкових членів;

δ – часовий крок дискретизації, с.

Метод кондуктивних передавальних функцій дозволяє компактно і точно моделювати теплову інерційність огорожень, замінюючи розв'язання повного диференціального рівняння теплопровідності на обчислення алгебраїчних сум із наперед визначеними коефіцієнтами. Завдяки рівнянням (2.5) - (2.7) динамічна модель має наступні переваги:

- коректно відтворює фазові зсуви та згладжує пікові навантаження, що виникають через акумулювання тепла у масивних стінах;
- мінімізує обчислювальні витрати, оскільки потребує зберігати лише обмежену кількість значень температур та теплових потоків для кожної конструкції;

формує надійну основу для подальшого параметричного аналізу та сценаріїв роботи інженерних систем у подальших розділах, де точне прогнозування теплових потоків критично впливає на результати енергоспоживання будівлі.

2.3 Параметри енергетичної моделі

Для забезпечення достовірного аналізу енергетичних характеристик житлових будівель у різних умовах експлуатації в рамках дослідження була побудована деталізована енергетична модель на базі досліджуваного об'єкта (рисунки 2.4). Метою створення цієї моделі є можливість кількісної оцінки споживання теплової енергії, розподілу теплових потоків, впливу конструктивних характеристик огорожувальних елементів, кліматичних умов та режимів роботи

системи опалення на загальну енергоефективність. Побудова такої моделі дозволяє не лише здійснювати розрахунок річного теплового навантаження, але й моделювати поведінку будівлі у нестандартних або аварійних режимах, що особливо актуально в сучасних умовах.



Рисунок 2.4 – 3Д модель в ПЗ DesignBuilder

Враховуючи просторову неоднорідність теплових процесів у багатоквартирних будинках, у моделі застосовано мультizonальний підхід, який дає змогу враховувати вплив суміжних приміщень, відмінності в орієнтації фасадів, локальні джерела тепла та інші чинники, що суттєво впливають на результати симуляції. На відміну від спрощених одноzonальних моделей, мультizonальна структура дає змогу точніше відтворювати теплові взаємодії між зонами, дозволяє реалізувати варіанти часткового опалення, а також забезпечує більш гнучкий і фізично обґрунтований підхід до опису реальної будівлі в умовах динамічного навантаження.

Для забезпечення надійності, узагальненості й відтворюваності результатів чисельного моделювання енергетичних характеристик будівлі було обрано підхід, що ґрунтується на використанні репрезентативного приміщення – окремого просторового об'єкта, який найбільш повно відображає типові умови експлуатації будівель даного класу. Такий підхід дозволяє зменшити складність моделі, водночас зберігаючи точність результатів щодо питомих характеристик енергоспоживання.

Згідно з положеннями ДСТУ Б В.2.2-39:2016 [81], зокрема розділом 5, для проведення розрахунків та вимірювань енергетичних характеристик доцільно використовувати так звані приміщення-представники (репрезентативні приміщення). Стандарт вказує, що до таких приміщень для житлових будинків можуть належати житлова кімната, коридор, ліфтовий хол, сходові клітки, підвал, горище тощо. При цьому необхідно забезпечити охоплення різних поверхів та орієнтацій за сторонами світу.

У даній роботі для проведення аналізу була обрана типова житлова кімната, розташована в центральній квартирі на четвертому поверсі будівлі. Такий вибір обумовлений тим, що це приміщення є частиною загального контексту функціонування житлової зони, оточене з усіх сторін суміжними просторами (зверху, знизу, зліва і справа), що дозволяє враховувати характерні теплові потоки через внутрішні огорожувальні конструкції. Крім того, положення приміщення у центрі житлової зони виключає крайові ефекти, притаманні кутовим або верхнім поверхам.

Такий вибір забезпечує відповідність моделі методологічним рекомендаціям стандарту і дозволяє проводити порівняльну оцінку параметричних сценаріїв при умовах експлуатації.

На рисунку 2.5 наведено тривимірну модель будівлі та план поверху, на якому видно вибране приміщення. Така локалізація дозволяє створити мультизональну модель із реалістичним урахуванням впливу суміжних зон, відповідно до рекомендацій стандарту та принципів динамічного моделювання енергетичних процесів.

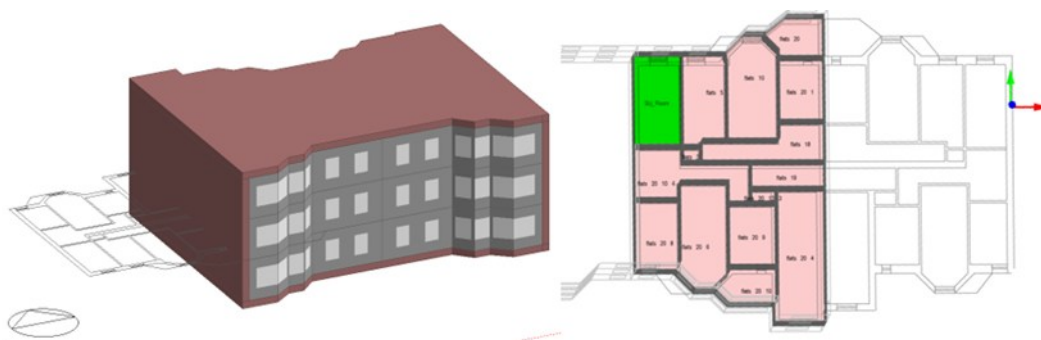


Рисунок 2.5 – Фрагмент моделі та планування поверху фрагменту з репрезентативним приміщенням

2.3.1 Параметри базової енергетичної моделі

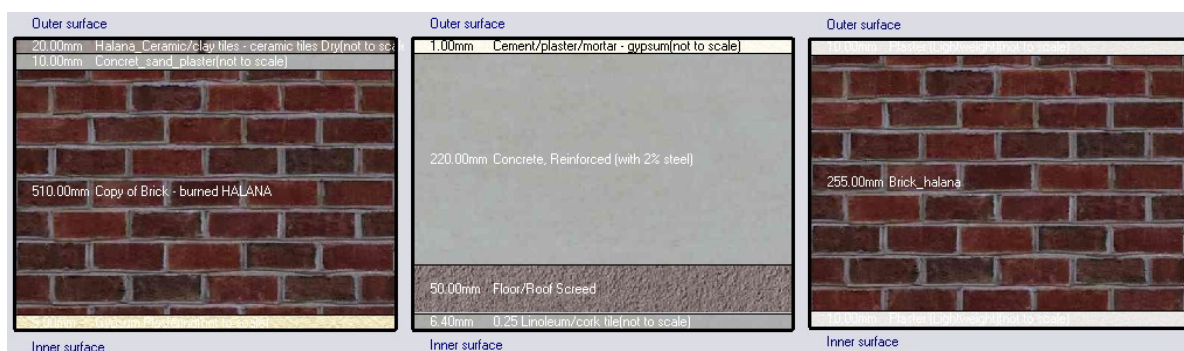
Створена динамічна модель будівлі враховує погодинні зміни кліматичних умов та внутрішніх навантажень, включаючи сонячні теплові надходження у приміщення, теплові втрати через огорожувальні конструкції, повітрообмін, а також накопичення тепла в матеріалах. Для забезпечення достатньої точності було обрано погодинний інтервал моделювання, який дає змогу з достатньою точністю відтворювати добову циклічність та швидкі зміни режимів, що особливо важливо при дослідженні ефектів від регулювання температури або аварійних сценаріїв.

Під базовою моделлю у цьому контексті мається на увазі енергетична модель будівлі з типовими для наявного стану значеннями конструктивних та інженерних параметрів. Саме вона слугувала відправною точкою для подальшого параметричного аналізу. Усі наступні варіації моделі базувалися на зміні одного або кількох параметрів цієї базової конфігурації, що дозволяло досліджувати чутливість енергетичних характеристик до окремих чинників.

Основні характеристики базової моделі наведено нижче:

- *Кліматичні умови*: моделювання виконано з використанням кліматичних даних для м. Київ.
- *Висота поверху*: становить 3 м, що відповідає типовим параметрам для багатоповерхових житлових будинків радянської та пострадянської забудови.

- *Зовнішні стіни*: самонесучі, з керамічної пористої цегли загальною товщиною 510 мм. Зовнішня поверхня облицьована керамічною плиткою, внутрішня – оштукатурена. Опір теплопередачі стіни становить $0,67 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$. Склад конструкції представлено на рисунку 2.6а.
- *Горизонтальні міжповерхові перекриття*: виконані з монолітної залізобетонної плити товщиною 220 мм, з нижнім шаром штукатурки та верхнім оздобленням у вигляді підлогового перекриття з лінолеумом на основі коркового шару. Опір теплопередачі перекриття становить $0,30 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ (рисунок 2.6б).
- *Внутрішні міжквартирні стіни*: цегляна кладка товщиною 255 мм, оштукатурені з обох боків. Опір теплопередачі – $0,58 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ (рисунок 2.6в).



а.

б.

в.

Рисунок 2.6 – Склад огорожувальних конструкцій кімнати:

а – зовнішніх стін; б – внутрішнього горизонтального перекриття; в – внутрішніх стін між квартирами

- *Світлопрозорі конструкції*: встановлено двокамерні склопакети типу 4-10air-3-10air-4 з двома повітряними камерами. Опір теплопередачі вікон становить $0,48 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$.
- *Система опалення*: підтримує сталу температуру 20°C протягом усього періоду опалення, без автоматичного регулювання температури в залежності від внутрішніх або зовнішніх умов.

- *Повітрообмін*: кратність повітрообміну прийнята на рівні $0,6 \text{ h}^{-1}$ відповідно до нормативних вимог для житлових приміщень без системи вентиляції.

Зазначені параметри сформували вихідну конфігурацію моделі, яка була надалі використана для аналізу енергетичних характеристик у різних сценаріях, зокрема впровадження заходів з енергоефективності та дослідження поведінки будівлі при змінних режимах опалення та аварійних ситуаціях.

2.3.2 Параметричний аналіз

З метою виявлення впливу окремих будівельних та експлуатаційних характеристик на енергетичну поведінку приміщення був проведений параметричний аналіз. Його основною метою було визначення чутливості результатів до зміни окремих параметрів огорожувальних конструкцій, теплоізоляції, і режимів роботи системи опалення. Це дозволяє оцінити доцільність і ефективність впровадження конкретних заходів з енергозбереження, а також прогнозувати поведінку будівлі в різних сценаріях експлуатації.

Для забезпечення повноцінного аналізу було обрано ряд ключових параметрів, кожен з яких змінювався в межах типових або нормативно обґрунтованих діапазонів. Варіація цих параметрів виконувалась із використанням єдиної уніфікованої системи позначень, наведеної на рисунку 2.7. Усі комбінації параметрів були зафіксовані в назві моделі, що дозволяє зручно ідентифікувати кожен сценарій під час аналізу результатів. Такий підхід дозволив детально оцінити як окремий, так і комбінований вплив кожного параметра на енергетичні характеристики будівлі.

Зміна параметрів у моделі проводилася в межах діапазонів, які відповідають реальним технічним характеристикам існуючого житлового фонду в Україні, а також вимогам і рекомендаціям чинних нормативних документів [31]. Вибрані значення враховують як ситуації до термомодернізації, так і умови після впровадження енергоефективних заходів.

Параметри, що варіювалися в межах аналізу:

- Орієнтація зовнішніх стін приміщення:
 - Південна орієнтація (S);
 - Північна орієнтація (N).
- Теплотехнічні властивості зовнішніх стін:
 - Неізольовані стіни з термічним опором $R = 0,82 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$;
 - Утеплені стіни мінеральної вати товщиною 0,1 м з загальним термічним опором $R = 3,31 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$ (після термомодернізації).
- Масивність зовнішніх стін:
 - 0,25 м – стіни товщиною в 1 цеглу;
 - 0,51 м – стіни товщиною в 2 цегли;
 - 0,77 м – стіни товщиною в 3 цегли.
- Теплові характеристики вікон:
 - $R = 0,54 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$ – базові вікна без енергозберігаючих заходів (4-10air-3-10air-4);
 - $R = 0,98 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$ – енергоефективні вікна (двокамерний склопакет із селективним покриттям – 4i-12air-4-12air-4i).
- Масивність внутрішніх стін (товщина):
 - 0,125 м – легкі перегородки (0,5 цегли);
 - 0,255 м – середні стіни (1 цегла);
 - 0,385 м – масивні стіни (1,5 цегли).
- Режим роботи системи опалення:
 - t_{const} – постійна температура 20 °С (базовий сценарій);
 - t_{varres} – денне пониження температури до 17 °С (з 08:00 до 18:00);
 - t_{varcomm} – нічне пониження температури до 17 °С (з 22:00 до 08:00).

Параметричний аналіз (Приклад назви: m-01_S_EWallUnins0.25m_WinR0.54_IWall0.255_tconst)						
m-01	S	EWallUnins	0.25m	WinR0.54	IWall0.255	tconst
Порядковий номер моделі в групі	Орієнтація зовнішніх стін	Ізоляція зовнішніх стін	Масивність зовнішніх стін	Термічний опір вікон	Масивність внутрішніх стін	Режим роботи системи опалення
<ul style="list-style-type: none"> • 1 • 2 • ... • n 	<ul style="list-style-type: none"> • S – південна • N – північна 	<ul style="list-style-type: none"> • Неізовані ($R = 0,67 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$) • Ізовані ($R = 3,31 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 цегли - 0,25 м • 2 цегли - 0,51 м • 3 цегли - 0,77 м 	<ul style="list-style-type: none"> • $R = 0,48 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$ • $R = 0,73 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,5 цегли - 0,125 м • 1 цегли - 0,255 м • 1,5 цегли - 0,385 м 	<ul style="list-style-type: none"> • tconst - незмінний температурний режим • tvarres - зменшення температури вдень • tvarcomm - зменшення температури вночі

Рисунок 2.7 – Варіанти моделей та їх назви

Завдяки такій систематизації та нормативному обґрунтуванню, параметричний аналіз охоплює як реалістичні сценарії для типових будівель, так і пограничні варіанти, що дозволяють оцінити потенціал модернізації та оптимізації.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було побудовано та обґрунтовано енергетичну модель досліджуваної багатоквартирної житлової будівлі, що стала основою для подальших досліджень. Детально проаналізовано геометричні та конструктивні параметри, а також наведено логіку побудови мультизональної моделі з урахуванням реальних умов експлуатації та нормативних вимог.

Для побудови моделі було обрано репрезентативне приміщення згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.2-39:2016. Такий підхід дозволив скоротити обсяг моделювання без втрати репрезентативності результатів. Було обґрунтовано доцільність використання саме мультизонального підходу, що забезпечує адекватне відображення теплових взаємодій між суміжними зонами.

Параметри базової моделі було визначено на основі даних щодо матеріалів, конструкцій огорожувальних елементів, мікрокліматичних умов та інфільтрації повітря. Особливу увагу приділено визначенню термічного опору елементів огороження, типам вікон, кратності повітрообміну та кліматичним даним для Києва.

У підрозділі 2.3.2 виконано опис параметричного аналізу, в якому системно варіювалися ключові характеристики, що впливають на теплову поведінку будівлі

– орієнтація будівлі, масивність та теплоізоляція стін, термічний опір вікон та режими роботи системи опалення. Такий підхід дозволив всебічно дослідити вплив окремих параметрів на споживання енергії та тепловантаження.

Таким чином, розділ 2 створює повноцінне підґрунтя для проведення поглибленого динамічного аналізу енергетичних характеристик будівлі в різних експлуатаційних сценаріях, що розглядаються у наступних розділах.

РОЗДІЛ 3 ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЛІ ПІД ВПЛИВОМ ЗМІНИ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОГОРОДЖЕНЬ БУДІВЛІ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Енергетична ефективність будівель є одним із ключових аспектів сталого розвитку в умовах сучасних економіки та екології. Теплофізичні властивості огорожувальних конструкцій і режими роботи систем теплопостачання суттєво впливають на енергетичний баланс будівель. Їхній аналіз дозволяє виявити можливості для зменшення енергоспоживання та підвищення теплового комфорту.

У даному розділі розглядаються методи оцінювання енергетичних характеристик будівель з урахуванням змін теплофізичних параметрів матеріалів огорожень і режимів роботи систем теплопостачання. Зокрема, аналізується взаємозв'язок між конструктивними особливостями будівель і тепловими процесами у внутрішньому середовищі.

Окрему увагу приділено параметричному аналізу теплових потоків через огорожувальні конструкції. Враховуються такі фактори, як вплив орієнтації будівлі, масивність конструкцій і переривчасті режими опалення.

Отримані результати моделювання дозволяють провести оцінки впливу різних факторів на теплові потоки через зовнішні стіни. В даному розділі наведено результати досліджень, як саме орієнтація зовнішніх огорожуючих конструкцій, термомодернізація зовнішніх огорожень та можливі режими пониження температури всередині приміщення можуть впливати на споживання теплової енергії.

3.1 Порівняння стаціонарної та динамічної моделі розрахунків

Аналіз енергетичних характеристик будівель є недостатньо обґрунтованим без застосування математичного моделювання, яке дозволяє відтворити теплову поведінку об'єкта за різних експлуатаційних і кліматичних умов. Традиційно в нормативній практиці найчастіше застосовується стаціонарний підхід, що

передбачає використання сталих температурних та кліматичних параметрів. Така методика є простою в реалізації, дає змогу виконувати розрахунки згідно з чинними стандартами та широко використовується у проєктуванні систем опалення.

Разом з тим, актуальні виклики в сфері енергозбереження потребують більш гнучких та точних інструментів, які здатні враховувати змінність зовнішніх умов, теплову інерцію конструкцій і режими експлуатації. Тому порівняння стаціонарної та динамічної моделей дозволяє виявити обмеження традиційного підходу, оцінити похибки в розрахунках і краще зрозуміти механізми теплового обміну в сучасних будівлях.

У цьому підрозділі спочатку наведено розрахунок теплових втрат на основі стаціонарної моделі, з акцентом на вплив термомодернізації та температурного режиму суміжних приміщень. Надалі ці результати порівнюються з моделюванням у динамічному середовищі, що дозволяє враховувати погодинні зміни клімату, теплову інерційність матеріалів та варіативність у поведінці користувачів.

3.1.1 Стаціонарна модель

Аналіз енергетичних характеристик будівель неможливо здійснити без застосування відповідних методів математичного моделювання. На початковому етапі доцільно звернутися до стаціонарної моделі теплового балансу, яка широко застосовується в нормативній практиці та дозволяє оцінити максимальне проєктне теплове навантаження при сталих зовнішніх умовах. Цей підхід базується на методиці, викладеній у стандарті EN 12831, та є основою для типового проєктування систем опалення.

У цьому підрозділі наведено розрахунок теплових втрат за допомогою стаціонарної моделі, з урахуванням особливостей будівлі після термомодернізації. Результати моделювання дають змогу оцінити вплив температурного режиму в суміжних приміщеннях на річну енергопотребу досліджуваної зони. Надалі ці результати буде порівняно з аналогічними розрахунками, виконаними з використанням динамічного підходу, що враховує зміну зовнішніх і внутрішніх умов у часі.

Опис стаціонарної моделі

Стаціонарна модель теплового балансу житлової будівлі базується на розрахунку проєктного теплового навантаження за умов сталих кліматичних і експлуатаційних параметрів. Такий підхід є базовим інструментом енергетичного аналізу і широко використовується у проєктуванні систем опалення. В основі методики лежить європейський стандарт EN 12831:2003, рекомендований до впровадження в Україні згідно з ДБН В.2.5-67:2013.

Стаціонарний розрахунок дозволяє визначити максимальне теплове навантаження в точці проєктної зовнішньої температури, без врахування динамічних змін мікроклімату чи інерційності огорожувальних конструкцій.

Методика розрахунку

Згідно зі стандартом EN 12831, повне проєктне теплове навантаження окремого приміщення визначається як сума трьох основних складових:

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} + \Phi_{RH,i}, \quad (3.1)$$

де $\Phi_{HL,i}$ – проєктне теплове навантаження приміщення (i), Вт;

$\Phi_{T,i}$ – проєктні втрати тепла опалюваного простору (i) за рахунок теплопередачі через огороження (трансмісійні тепловтрати), Вт;

$\Phi_{V,i}$ – проєктні вентиляційні втрати тепла опалюваного простору (i), Вт;

$\Phi_{RH,i}$ – додатковий запас теплової потужності, Вт.

Втрати тепла через огороження розраховуються за формулою:

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e), \quad (3.2)$$

де $H_{T,ie}$ – коефіцієнт втрат тепла за рахунок теплопередачі з опалюваного простору (i) до навколишнього середовища (e) через оболонку будівлі, Вт/К;

$H_{T,iue}$ – коефіцієнт втрат тепла за рахунок теплопередачі з опалюваного простору (i) до навколишнього середовища (e) через неопалювані простори (u), Вт/К;

$H_{T,ig}$ – коефіцієнт втрат тепла за рахунок теплопередачі з опалюваного простору (i) до ґрунту (g) у сталих умовах, Вт/К;

$H_{T,ij}$ – коефіцієнт втрат тепла за рахунок теплопередачі з опалюваного простору (i) до суміжного опалюваного простору (j) за різниці температур більше 3 °С (тобто до суміжного опалюваного простору в тій самій частині будинку або в прилеглій частині будинку), Вт/К;

$\theta_{int,i}$ – проєктна внутрішня температура опалюваного простору (i), °С;

θ_e – проєктна температура зовнішнього повітря, °С.

Втрати тепла безпосередньо назовні:

$$H_{T,ie} = \sum_k (A_k \cdot U_k) + \sum_l (\psi_l \cdot l_l), \quad (3.3)$$

де $H_{T,ie}$ – втрати тепла за рахунок теплопередачі з опалюваного простору (i) до навколишнього середовища (e), Вт/К;

A_k – площа елемента будинку (k), м²;

U_k – коефіцієнт теплопередачі огородження (k), Вт/(м²·К);

ψ_l – коефіцієнт теплопередачі лінійного теплового мосту (l), Вт/(м·К);

l_l – довжина лінійного теплового мосту (l) між внутрішнім і зовнішнім просторами, м.

При розрахунку тепловтрат за рахунок теплопередачі теплові мости можна враховувати спрощеним методом, який полягає в коригуванні значення коефіцієнта теплопередачі за такою формулою:

$$U_{kc} = U_k + \Delta U_{tb}, \quad (3.4)$$

де U_{kc} – скоригований коефіцієнт теплопередачі елемента будівлі (k) з урахуванням лінійних теплових мостів, Вт/(м²·К);

U_k – базовий коефіцієнт теплопередачі елемента (k), Вт/(м²·К);

ΔU_{tb} – коригувальний коефіцієнт, що залежить від типу елемента будівлі, Вт/(м²·К).

Втрати тепла через неопалюваний простір:

Формула для розрахунку коефіцієнта теплопередачі через неопалюваний простір згідно зі стандартом EN 12831:

$$H_{T,iue} = \sum_k (A_k \cdot U_k \cdot b_u) + \sum_l (\psi_l \cdot l_l \cdot b_u), \quad (3.5)$$

де A_k – площа елемента будівлі (k), м²;

U_k – коефіцієнт теплопередачі огороження (k), Вт/(м²·К);

ψ_l – коефіцієнт теплопередачі лінійного теплового мосту (l), Вт/(м·К);

l_l – довжина лінійного теплового мосту (l) між внутрішнім і зовнішнім простором, м;

b_u – коефіцієнт пониження температури, який враховує різницю між температурою неопалюваного простору та проектною зовнішньою температурою, безрозмірна величина.

Оскільки досліджуване приміщення не контактує з неопалювальними просторами, то $H_{T,iue} = 0$.

Втрати тепла до суміжного опалюваного простору з нижчою внутрішньою температурою

Часто виникають ситуації, коли в багатоквартирному будинку окремі приміщення (житлові квартири, офіси, магазини, готельні номери) протягом тривалого часу залишаються без використання або відключені від системи опалення. У таких випадках температура в них знижується відносно проектної. Це створює температурну асиметрію по обидва боки внутрішнього огороження, що спричиняє помітні втрати тепла через внутрішні конструкції, особливо у разі їх недостатньої теплоізоляції.

Суміжним опалюваним простором може бути як інше приміщення в тій самій квартирі, так і в сусідній квартирі або навіть у суміжному будинку. Зважаючи на

відсутність ізоляції внутрішніх стін у більшості проєктів, навіть незначна різниця температур може спричинити істотні теплові потоки.

Для врахування цих втрат використовується коефіцієнт теплопередачі до суміжного приміщення:

$$H_{T,ij} = \sum_k (f_{ij} \cdot A_k \cdot U_k), \quad (3.6)$$

де f_{ij} – коефіцієнт пониження температури, що враховує різницю між температурою суміжного опалюваного простору та проєктною зовнішньою температурою, безрозмірна величина;

A_k – площа елемента будівлі (k), м²;

U_k – коефіцієнт теплопередачі огороження (k), Вт/(м²·К).

У разі розрахунку втрат тепла до суміжного опалюваного простору з нижчою температурою не враховується вплив теплових мостів. Натомість вводиться коефіцієнт пониження температури, який враховує температуру суміжного простору відносно зовнішньої температури. Формула для його обчислення:

$$f_{ij} = \frac{(\theta_{int,i} - \theta_j)}{(\theta_{int,i} - \theta_e)}, \quad (3.7)$$

де $\theta_{int,i}$ – проєктна внутрішня температура опалюваного простору (i), °С;

θ_j – температура прилеглого (суміжного) опалюваного простору (j), °С;

θ_e – проєктна температура зовнішнього повітря, °С.

Коефіцієнт втрат тепла за рахунок теплопередачі до ґрунту:

Відповідно до стандарту EN 12831, коефіцієнт втрат тепла через огорожувальні конструкції, що контактують з ґрунтом, обчислюється з урахуванням впливу середньорічних температур, температурного градієнта та гідрологічних умов. Формула для розрахунку теплопередачі до ґрунту має вигляд:

$$H_{T,ig} = f_{g1} \cdot f_{g2} \cdot (\sum_k (A_k \cdot U_{equiv,k})) \cdot G_w, \quad (3.8)$$

де f_{g1} – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив річних коливань зовнішньої температури, безрозмірна величина;

f_{g2} – коефіцієнт пониження температури, який враховує різницю між середньорічною та проєктною зовнішньою температурою, безрозмірна величина;

A_k – площа елемента будівлі (k), м²;

$U_{equiv,k}$ – рівноважний коефіцієнт теплопередачі елемента огородження (k), Вт/(м²·К);

G_w – коефіцієнт, що враховує вплив ґрунтових вод, безрозмірна величина.

Оскільки огорожувальні конструкції досліджуваного приміщення не контактують з ґрунтом, приймаємо $H_{T,ig} = 0$.

Розрахунок проєктних вентиляційних втрат тепла у випадку природної вентиляції:

У стандарті EN 12831 запроваджено поняття проєктних вентиляційних втрат тепла, що враховують тепловтрати на нагрівання припливного повітря до рівня внутрішньої проєктної температури. При цьому розглядаються два джерела вентиляції:

- організований повітрообмін, відповідно до нормативів повітрообміну;
- неорганізована інфільтрація повітря крізь огорожувальні конструкції.

Для обчислень вибирають більше з двох значень. Розрахунок проєктних вентиляційних втрат тепла виконується за формулою:

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e), \quad (3.9)$$

де $\Phi_{V,i}$ – проєктні вентиляційні втрати тепла приміщення (i), Вт;

$H_{V,i}$ – коефіцієнт проєктних вентиляційних втрат тепла, Вт/К;

$\theta_{int,i}$ – проєктна внутрішня температура приміщення (i), °С;

θ_e – проєктна температура зовнішнього повітря, °С.

Коефіцієнт проєктних вентиляційних втрат тепла $H_{V,i}$ визначає кількість тепла, що втрачається внаслідок вентиляції при різниці температур між внутрішнім та зовнішнім середовищем. Він обчислюється за формулою:

$$H_{V,i} = \tilde{V}_i \cdot \rho \cdot c_p, \quad (3.10)$$

де \tilde{V}_i – об'ємна витрата вентиляційного повітря, м³/с;

ρ – густина повітря при температурі $\theta_{int,i}$, кг/м³;

c_p – питома теплоємність повітря при температурі $\theta_{int,i}$, Дж/(кг·К).

Для спрощення обчислень часто нехтують залежністю густини і питомої теплоємності повітря від його температури та переводячи витрату повітря в м³/год та застосовують апроксимоване рівняння для \tilde{V}_i в м³/год:

$$H_{V,i} = 0,34 \cdot \tilde{V}_i. \quad (3.11)$$

Спосіб визначення об'ємної витрати вентиляційного повітря залежить від наявності або відсутності механічної вентиляції. У разі її відсутності припускається, що повітря надходить у приміщення ззовні природним шляхом, маючи ті ж параметри, що й зовнішнє повітря.

EN 12831 визначає, що необхідно розглядати два джерела вентиляційного повітря:

- повітря, що інфільтрується через огорожувальні конструкції будівлі;
- мінімальний нормативний об'єм повітря, визначений гігієнічними вимогами.

Для розрахунку приймають максимальне зі значень:

$$\tilde{V}_i = \max(\tilde{V}_{inf,i}, \tilde{V}_{min,i}), \quad (3.12)$$

де \tilde{V}_i – загальна об'ємна витрата вентиляційного повітря для простору (i), м³/год;

$\tilde{V}_{inf,i}$ – інфільтраційна витрата повітря, м³/год;

$\tilde{V}_{min,i}$ – мінімально допустима витрата згідно з гігієнічними нормами, м³/год.

Для розрахунку інфільтраційних втрат повітря стандарт EN 12831 пропонує таку формулу:

$$\tilde{V}_{inf,i} = 2 \cdot V_i \cdot n_{50} \cdot e_i \cdot \varepsilon_i, \quad (3.13)$$

де V_i – об’єм опалюваного простору (i), м³ (в межах світлих розмірів);

n_{50} – кратність повітрообміну при різниці тиску 50 Па, год⁻¹;

e_i – поправочний коефіцієнт на вплив розташування опалюваного простору (висота, вітрова зона), безрозмірна величина;

ε_i – коефіцієнт, що враховує напрям повітряного потоку (враховується найгірший варіант, коли повітря потрапляє з усіх боків одночасно), безрозмірна величина.

Кратність повітрообміну прийнята згідно з нормативним документом ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [25], і для житлових будівель становить, $n_{nat} = 0,6$, год⁻¹.

Порівняння річної енергопотреба теплової енергії для досліджуваної зони на основі стаціонарного розрахунку, проведеного в моделі з термомодернізованими огорожувальними конструкціями показано на рисунку 3.1. Діаграма демонструє енергоспоживання для п’яти сценаріїв температурного режиму в суміжних приміщеннях, які суттєво впливають на тепловий баланс:

1. Температура 20 °С у всіх приміщеннях (базовий сценарій);
2. Зниження температури в одному суміжному приміщенні;
3. Зниження температури в усіх суміжних приміщеннях;
4. Локальне регулювання температури лише у досліджуваних приміщеннях;
5. Регулювання температури у всіх приміщеннях будівлі.

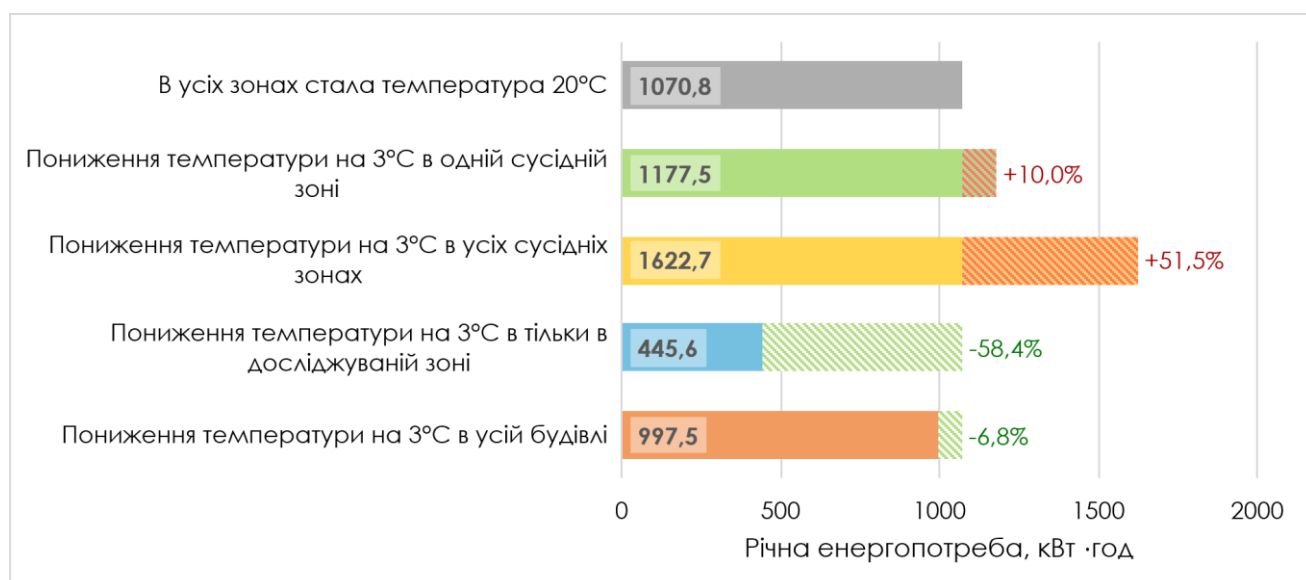


Рисунок 3.1 – Річна енергопотреба на опалення для досліджуваної зони розрахована за стаціонарним методом (після термомодернізації)

Аналіз результатів, представлених на рисунку 3.1, свідчить про суттєвий вплив конфігурації температурних режимів у суміжних зонах на річну потребу в тепловій енергії досліджуваного приміщення, навіть після термомодернізації. У базовому сценарії, де у всіх приміщеннях підтримується температура +20 °С, річна енергопотреба на опалення становить 1070,8 кВт·год.

Зменшення температури на 3 °С лише в одній суміжній зоні призводить до збільшення теплових втрат у досліджуваній зоні, результатом чого є зростання енергопотреби до 1177,5 кВт·год, що становить +10,0% відносно базового рівня. Це пояснюється появою теплового потоку через спільну внутрішню перегородку, спрямованого до охолодженої сусідньої зони.

Найбільш критичним є сценарій пониження температури в усіх суміжних приміщеннях, який демонструє різке зростання енергопотреби до 1622,7 кВт·год, що відповідає +51,5% порівняно з базовим варіантом. Такий результат підтверджує високу чутливість досліджуваної зони до умов у навколишніх приміщеннях, особливо за відсутності теплоізоляції внутрішніх конструкцій.

Натомість зниження температури лише у досліджуваній зоні до +17 °С призводить до значного зниження річного енергоспоживання – 445,6 кВт·год, що

становить -58,4% відносно базового значення. Це свідчить про ефективність локального регулювання температури в контексті енергоощадності.

Сценарій, в якому пониження температури реалізується одночасно в усій будівлі, показує помірне скорочення енергоспоживання до 997,5 кВт·год (-6,8%), що свідчить про позитивний ефект синхронного регулювання, хоча й менш виражений порівняно з локальним зниженням лише в цільовій зоні.

Таким чином, результати підтверджують доцільність зонального управління температурою як дієвого інструменту підвищення енергоефективності навіть у термомодернізованих будівлях. Особливо важливо враховувати теплові взаємодії через внутрішні огорожувальні конструкції, що набувають суттєвого значення за умов неоднорідного температурного поля.

Обмеження стаціонарної моделі

Попри свою простоту та нормативну підтримку, стаціонарна методика розрахунку теплових втрат має низку суттєвих недоліків, що обмежують її придатність для комплексної оцінки енергетичної поведінки будівлі. Такий підхід базується на припущенні про сталість умов – зокрема, зовнішньої температури, внутрішнього теплового режиму, теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, а також ігноруванні інерційних властивостей матеріалів.

Серед основних недоліків слід відзначити:

- Неможливість врахування добових та сезонних коливань кліматичних параметрів, таких як температура зовнішнього повітря, сонячна радіація та вітер;
- Неможливість врахування регульованих режимів роботи системи опалення, зокрема зміни температури залежно від часу доби, тривалості її зниження та особливостей плавного регулювання;
- Не враховуються теплоакумуючі властивості внутрішніх та зовнішніх огорожень будівлі, що суттєво впливає на динаміку теплового балансу, особливо у масивних огороженнях;

- Спрощене уявлення про внутрішні теплові надходження від людей, техніки, освітлення, які можуть суттєво знижувати фактичне теплове навантаження;
- Не враховуються змінні режими роботи вентиляції та теплопостачання, які є типовими для реальної експлуатації будівель;
- Відсутність можливості моделювати поведінку у перехідних або аварійних режимах, наприклад, при раптових змінах температури або відключенні систем опалення.

У результаті, хоча стаціонарна модель забезпечує нормативну оцінку опалювального навантаження, вона не дозволяє врахувати динамічну взаємодію між кліматичними, будівельними та поведінковими чинниками. Це обмежує її ефективність при аналізі енергоефективних заходів, оптимізації режимів експлуатації або оцінці роботи в нетипових умовах.

Саме тому для глибшого аналізу у подальших розділах використано динамічне моделювання, яке враховує зміну параметрів у часі та дозволяє адекватно оцінити вплив різних факторів на енергетичні характеристики досліджуваної зони.

Варто також зазначити, що стаціонарна методика має схильність до суттєвого спотворення результатів за умов нерівномірного розподілу температур у суміжних зонах. Вона не враховує часового зміщення теплових потоків, пов'язаного з теплоакумуючими властивостями огорожувальних конструкцій, а також реальних режимів використання приміщень. Зокрема, як буде показано у подальших розділах, стаціонарний підхід демонструє завищену чутливість енергоспоживання до локальних знижень температури в окремих приміщеннях. Це створює хибне уявлення про масштаби втрат теплової енергії та може призводити до некоректного обґрунтування ефективності заходів з оптимізації температурного режиму, а також налаштування систем роботи автоматики.

Таким чином, використання динамічної моделі є необхідним для адекватної оцінки теплової поведінки будівлі в умовах змінного режиму експлуатації, що

дозволяє враховувати не лише миттєві теплові потоки, а й накопичення та розсіювання тепла в будівельних конструкціях у часі.

3.1.2 Динамічна модель

Попри широке використання стаціонарного підходу, сучасна практика моделювання енергетичних процесів у будівлях дедалі частіше звертається до динамічного аналізу, який дозволяє враховувати зміну зовнішніх кліматичних умов, теплову інерційність огорожень, режими роботи інженерних систем та поведінкові особливості користувачів.

Особливо це актуально для житлових будівель, у яких теплова поведінка значною мірою визначається нерівномірністю теплових надходжень, періодичними коливаннями температури та варіативністю у використанні приміщень.

Динамічне моделювання забезпечує більш реалістичне уявлення про зміну теплового балансу в часі, дозволяючи не лише точно визначати річну енергопотребу, а й досліджувати добові піки, фазові зсуви теплової відповіді та ефективність регулювання системи опалення.

У цьому підрозділі розглянуто методику побудови динамічної моделі, обґрунтовано вибір кліматичних даних, а також проаналізовано ключові чинники, що впливають на результат – зокрема сонячні теплонадходження, інфільтрацію повітря та теплову інерційність огорожень.

Опис методики

У даній роботі для моделювання енергетичних характеристик будівель використано програмні комплекси EnergyPlus та DesignBuilder [62,63], які широко застосовуються у світовій практиці для аналізу динамічних теплових процесів у будівлях. Використання цих програм дозволяє з високою точністю враховувати змінні параметри зовнішнього середовища, характеристики будівельних матеріалів та режими роботи інженерних систем.

Для моделювання використовувався погодинний інтервал, оскільки він дозволяє з високою точністю відтворювати динаміку змін зовнішнього середовища та внутрішнього теплового навантаження будівлі, що є важливим при оцінці енергетичної ефективності та порівнянні різних заходів з енергозбереження.

Для отримання максимально точних результатів у моделюванні застосовувалися погодинні кліматичні дані типового року, що містяться у міжнародному погодному файлі IWEC (International Weather for Energy Calculation) для м. Києва [80]. В рамках дослідницького проєкту RP-1015 U.S. National Climatic Data Center були створені кліматичні файли типового року International Weather for Energy Calculations (IWEC) для ряду міст. Процедура отримання даних була заснована на виборі типового року протягом 15-річної послідовності погодних даних. Погодинні значення з файлу IWEC [80] включають в себе температуру сухого термометра, відносну вологість, швидкість та напрям вітру, барометричний тиск, пряму (виражена через direct normal) та розсіяну сонячну радіацію на горизонтальну поверхню (diffuse horizontal) тощо. Дані у форматі EPW інтегрувалися з імітаційними моделями, що забезпечувало можливість реалістичного відтворення впливу зовнішніх факторів на енергетичний баланс будівлі.

Основними кліматичними факторами, що впливають на енергоспоживання будівлі, є сонячні теплонадходження та температура зовнішнього повітря.

Температура зовнішнього повітря

Температурний режим зовнішнього повітря є одним із ключових чинників, що визначає теплові втрати будівлі та навантаження на систему опалення. Для порівняльної оцінки підходів до моделювання теплових втрат проаналізовано погодинні, середньомісячні та середньорічні значення температури повітря, отримані з IWEC-даних та ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [82].

На рисунку представлено погодинні значення температури зовнішнього повітря протягом року згідно з IWEC-даними, а також середньомісячні та середньорічні температури відповідно до IWEC і нормативу [82]. Як видно з

графіка, погодинна температура демонструє значні добові та сезонні коливання, які не враховуються при використанні усереднених значень.

Таке спрощення є типовим для стаціонарного підходу, що базується на середньомісячних чи середньорічних температурах. У результаті це призводить до зниження точності розрахунків тепловтрат, особливо в перехідні сезони, коли динаміка зовнішніх температур є найбільш вираженою.

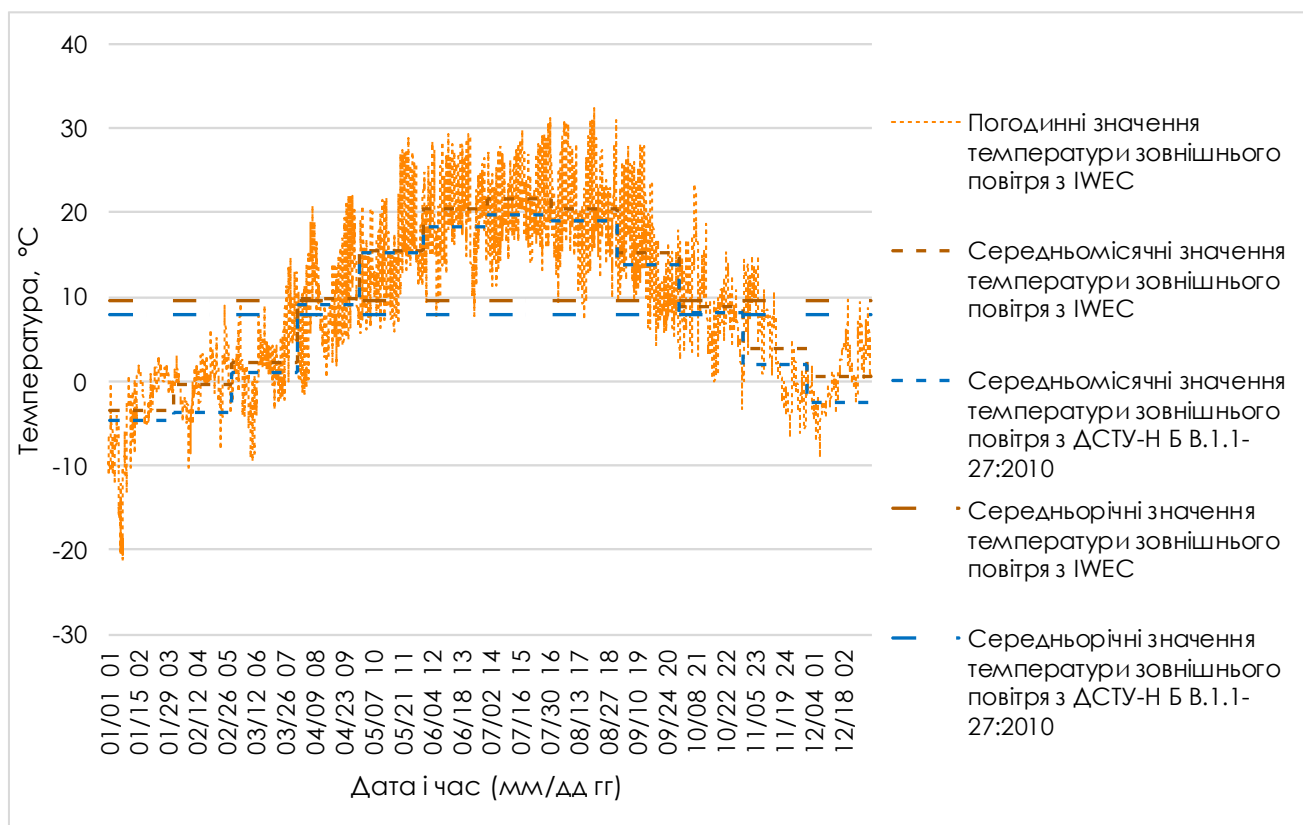


Рисунок 3.2 – Порівняння значень температури зі стаціонарної і динамічної моделі

Середня температура зовнішнього повітря в IWEC вища за стандарт [82], що обумовлюється різними періодами, які були використані для створення кліматичних даних типового року (рисунок 3.2). Середньорічна температура зовнішнього повітря за даними IWEC становить 9,61 °C, тоді як за нормативом – 8,0 °C, що свідчить про різницю у 1,61 °C. Подібна розбіжність спостерігається і під час опалювального періоду: 1,74 °C за IWEC проти -0,1 °C за ДСТУ, що становить різницю в 1,84 °C.

Використання динамічного моделювання з погодинними кліматичними даними дозволяє не лише точніше оцінити тепловтрати, а й моделювати зміну навантаження на систему опалення в реальному режимі часу. Це особливо актуально для аналізу ефективності заходів з регулювання температурного режиму, інерційності огорожень та оптимізації роботи інженерних систем.

Сонячні теплонадходження

Сонячні теплонадходження є одним із ключових джерел пасивного тепла в опалюваних будівлях. Вони формуються в результаті проникнення сонячного випромінювання через світлопрозорі огорожувальні конструкції (вікна, засклені фасади тощо) та його поглинання внутрішніми поверхнями приміщень – стінами, підлогою, меблями.

Отримана сонячна енергія трансформується у тепло, яке зменшує навантаження на систему опалення, особливо в денні години за умов інсоляції. Величина таких надходжень суттєво залежить від орієнтації конструкцій, сезонності, ступеня засклення, оптичних характеристик матеріалів.

Для точного оцінювання їхнього впливу на енергетичний баланс будівлі в даній роботі здійснено погодинне моделювання сонячних теплонадходжень з урахуванням реального кліматичного профілю для м. Києва.

На рисунку 3.3 наведена зміна сонячних теплонадходжень у приміщення з Південною (Пд) та Північною (Пн) орієнтаціями світлопрозорих огорожень до проведення термомодернізації, а також відповідні погодинні значення температури зовнішнього повітря протягом опалювального періоду.

Сонячні надходження на південну орієнтацію мають виражений добовий та сезонний характер. Максимальні піки сягають понад 400-500 Вт у сонячні дні. Це пояснюється тим, що південні вікна отримують максимальну кількість прямого сонячного випромінювання протягом дня, особливо в осінньо-весняний період, коли сонце знаходиться низько, але довше перебуває в полі зору південного фасаду. Водночас у період з грудня по лютий інтенсивність зменшується через коротку тривалість світлового дня та низький кут сонячного підйому.

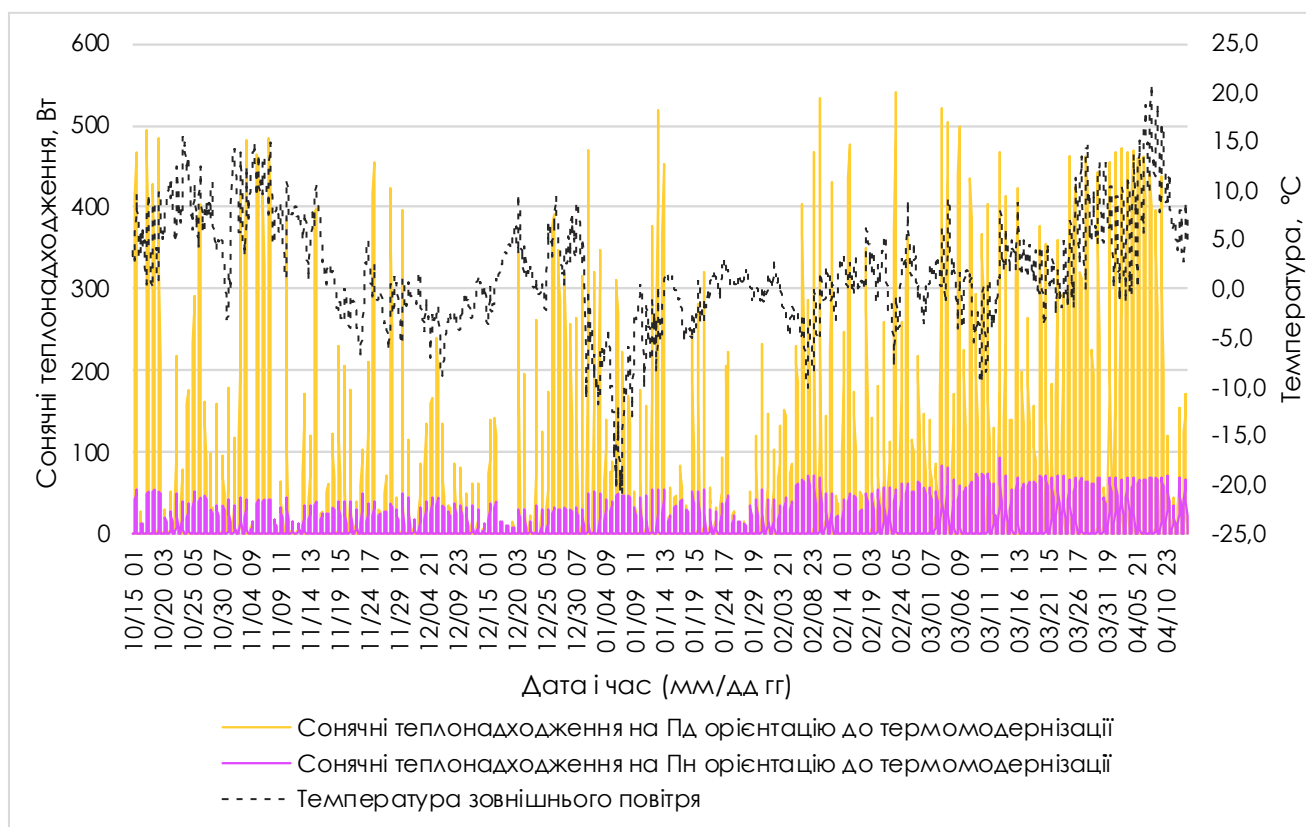


Рисунок 3.3 – Сонячні теплонадходження (до термомодернізації будівлі)

Північна орієнтація демонструє значно нижчі теплонадходження, що не перевищують 40-70 Вт. Це зумовлено розсіяним та відбитим сонячним випромінюванням, яке потрапляє на північні вікна навіть за відсутності прямої інсоляції. Таке випромінювання виникає внаслідок розсіювання світла в атмосфері (переважно в хмарну погоду) і є основним джерелом пасивного сонячного тепла з цього напрямку.

Температура зовнішнього повітря варіюється в межах від -20 °C до +10 °C з характерними короткостроковими коливаннями, формуючи характерний зимовий температурний профіль. Низькі температури в поєднанні з недостатнім сонячним опроміненням створюють пікові умови для роботи опалювальної системи.

У результаті термомодернізації будівлі змінюються теплофізичні характеристики огорожувальних конструкцій, зокрема світлопрозорих елементів, які відіграють ключову роль у надходженні сонячної енергії до приміщення. Заміна старих вікон на енергоефективні склопакети знижує коефіцієнт пропускання

сонячного випромінювання, що, у свою чергу, призводить до зменшення величини пасивних теплонадходжень у денний час.

Цей ефект особливо актуальний у південних орієнтаціях, де домінує пряме сонячне випромінювання. У північних зонах, де основним джерелом є розсіяна радіація, зміни відбуваються менш помітно, але все ж фіксуються.

На рисунку 3.4 представлено результати моделювання сонячних теплонадходжень після термомодернізації, зокрема для Південної (Пд) та Північної (Пн) орієнтацій. Для порівняння наведені також відповідні дані до модернізації, а також температура зовнішнього повітря.

З графіка видно, що після термомодернізації показники сонячних теплонадходжень знизилися в середньому на 45% для обох орієнтацій внаслідок зменшення прозорості нових конструкцій.

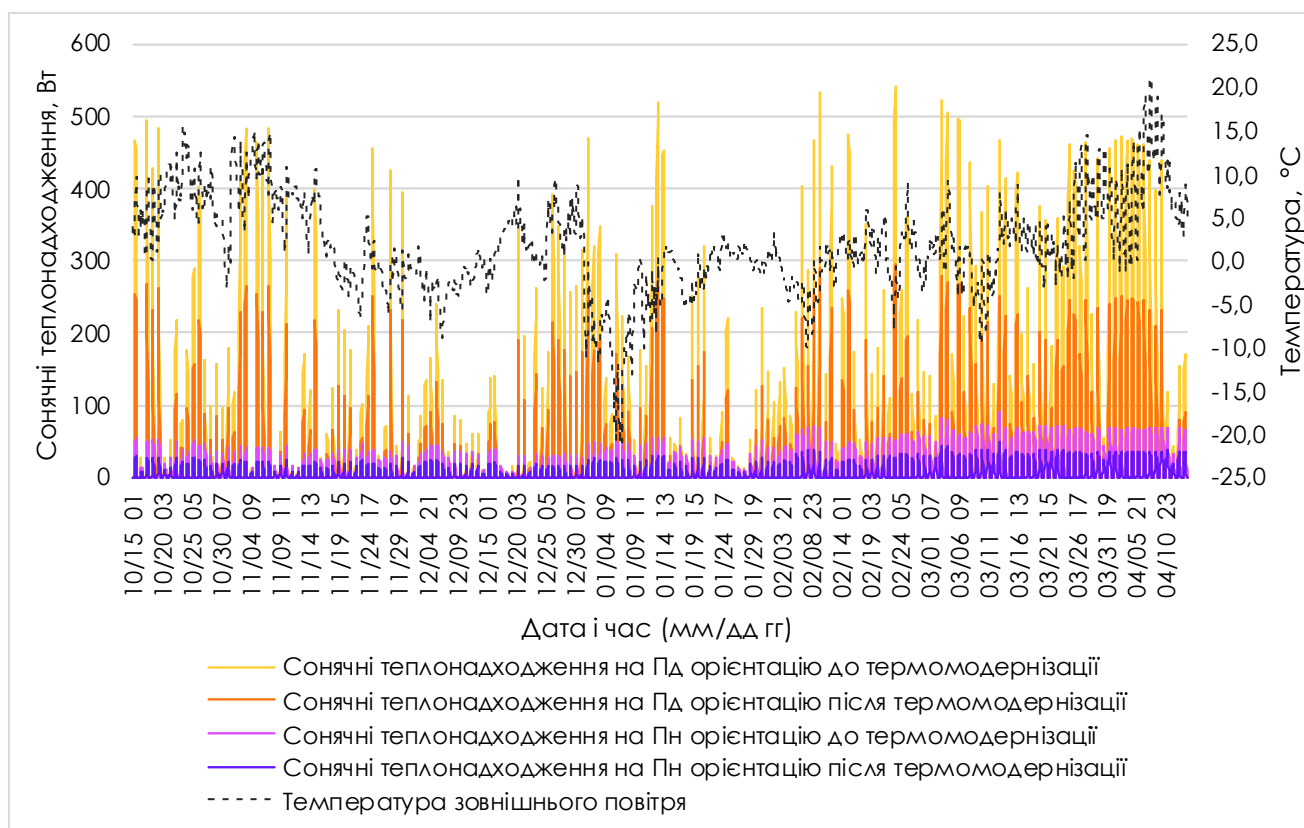


Рисунок 3.4 – Сонячні теплонадходження (до та після термомодернізації будівлі)

Зниження теплонадходжень після термомодернізації пояснюється тим, що сучасні енергоефективні вікна, крім підвищеного опору теплопередачі, також

характеризуються зменшеним коефіцієнтом світлопропускання (для видимого спектру) та нижчим коефіцієнтом пропускання сонячного випромінювання – тобто здатністю пропускати інфрачервону частину сонячного випромінювання, яка відповідає за перетворення радіації в тепло всередині приміщення.

Хоча такі зміни знижують рівень пасивного сонячного опалення, вони дозволяють значно зменшити теплові втрати, особливо в нічний час або за умов хмарності. Для помірно континентального клімату, який характерний в тому числі і для м. Києва термомодернізація забезпечує енергетичний баланс з менш вираженими коливаннями і зменшує загальне навантаження на систему опалення.

Вентиляційна складова

У процесі енергетичного аналізу будівель вентиляція відіграє ключову роль у формуванні загального енергетичного балансу, оскільки саме через повітрообмін відбуваються значні втрати теплової енергії. Цей компонент особливо актуальний в умовах холодного клімату, коли зовнішнє повітря потребує підігріву до комфортної внутрішньої температури.

У стаціонарних розрахунках [45] повітрообмін зазвичай враховується як сталий параметр (наприклад, інфільтрація зі сталою кратністю), що не дозволяє врахувати реальні погодинні коливання вітру, температури та тиску, які впливають на інтенсивність інфільтраційного процесу.

У динамічному моделюванні використання погодинних кліматичних даних дозволяє більш точно визначити фактичну кратність повітрообміну та пов'язані з нею теплові втрати. Такий підхід є критично важливим для адекватного прогнозування енергоспоживання, особливо в кліматичних умовах України, де інфільтрація є домінуючим типом повітрообміну в житлових будівлях без механічної вентиляції.

На рисунку 3.5 наведено кратність повітрообміну, яка задається при налаштуванні моделей і в розрахунку за [45], для житлових будівель допускається $0,6 \text{ год}^{-1}$ [25]. Відповідно, до формули (2.1) при погодинному розрахунку заданого

значення кратності повітрообміну протягом опалювального періоду змінюється в діапазоні від 0,59 до 0,69 год⁻¹.

З графіка видно, що в реальних умовах повітрообмін через інфільтрацію є змінним у часі і суттєво залежить від зовнішніх кліматичних факторів, передусім вітрового тиску та перепаду температур. У холодні місяці (січень–березень, листопад–грудень) кратність стабільно перевищує нормативне значення. Середнє значення змодельованої кратності повітрообміну становить 0,631 год⁻¹, що на 5,2% вище за значення прийняте в стаціонарних розрахунках.

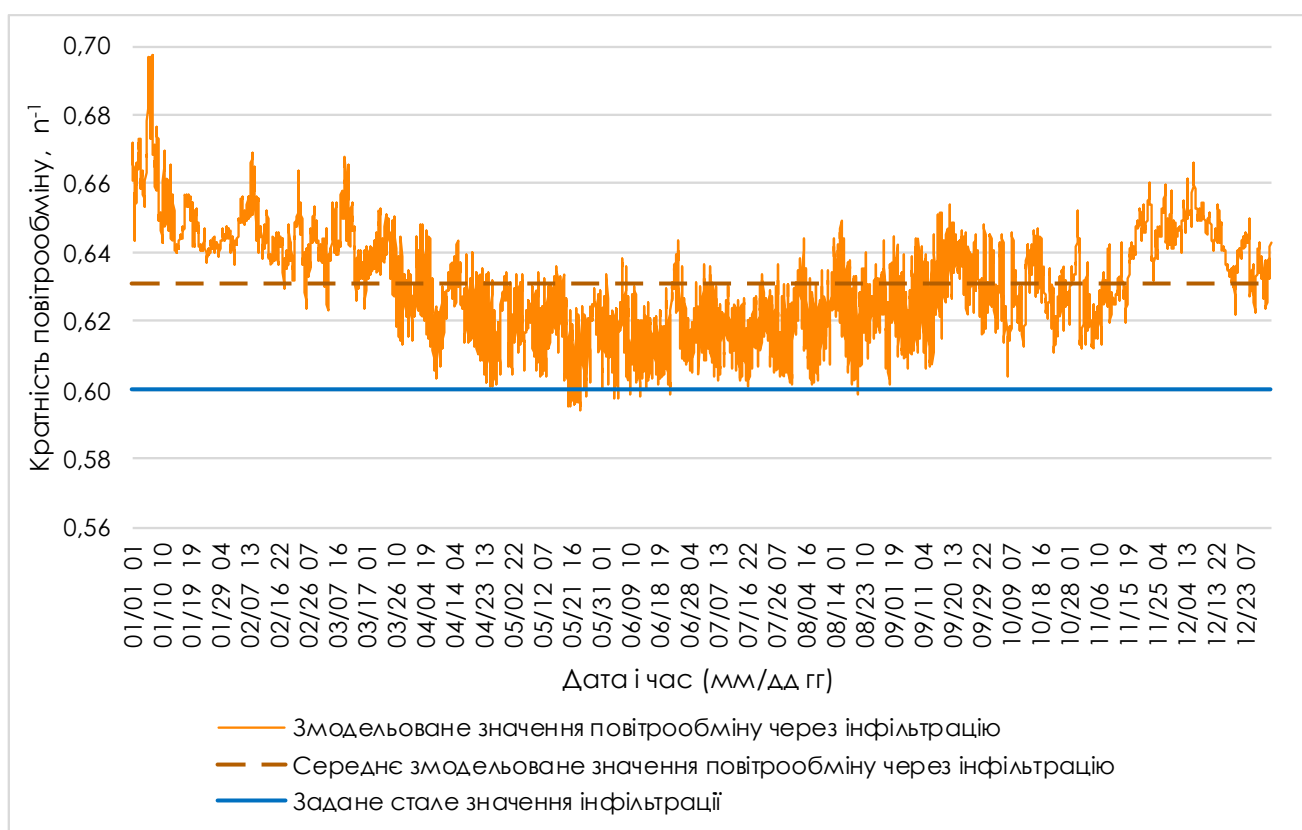


Рисунок 3.5 – Порівняння кратності повітрообміну для стаціонарної і динамічної моделі

Рисунок 3.6 ілюструє результати розрахунку теплових втрат через інфільтрацію за різними підходами:

- Розраховані з використанням погодинних значень температури і кратності повітрообміну для верифікації стаціонарної методики і результатів енергетичної моделі;

- Змодельовані з використанням погодинних динамічних параметрів;
- Розраховані за середньомісячними температурами з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [82];
- Середньомісячні результати динамічної моделі.

З рисунку 3.6 слідує, що основним фактором, що впливає на зростання тепловтрат в зимовий період, це збільшення різниці температур між внутрішнім та зовнішнім повітрям. Також інфільтрація може посилюватися через виникнення стак ефекту – це явище, яке виникає, коли тепле повітря в середині будівлі піднімається вгору і виходить через вентиляційні отвори або витоки, створюючи низький тиск у нижніх поверхах. Це спричиняє засмоктування холодного повітря ззовні через двері, вікна або інші прогалини [83,84].

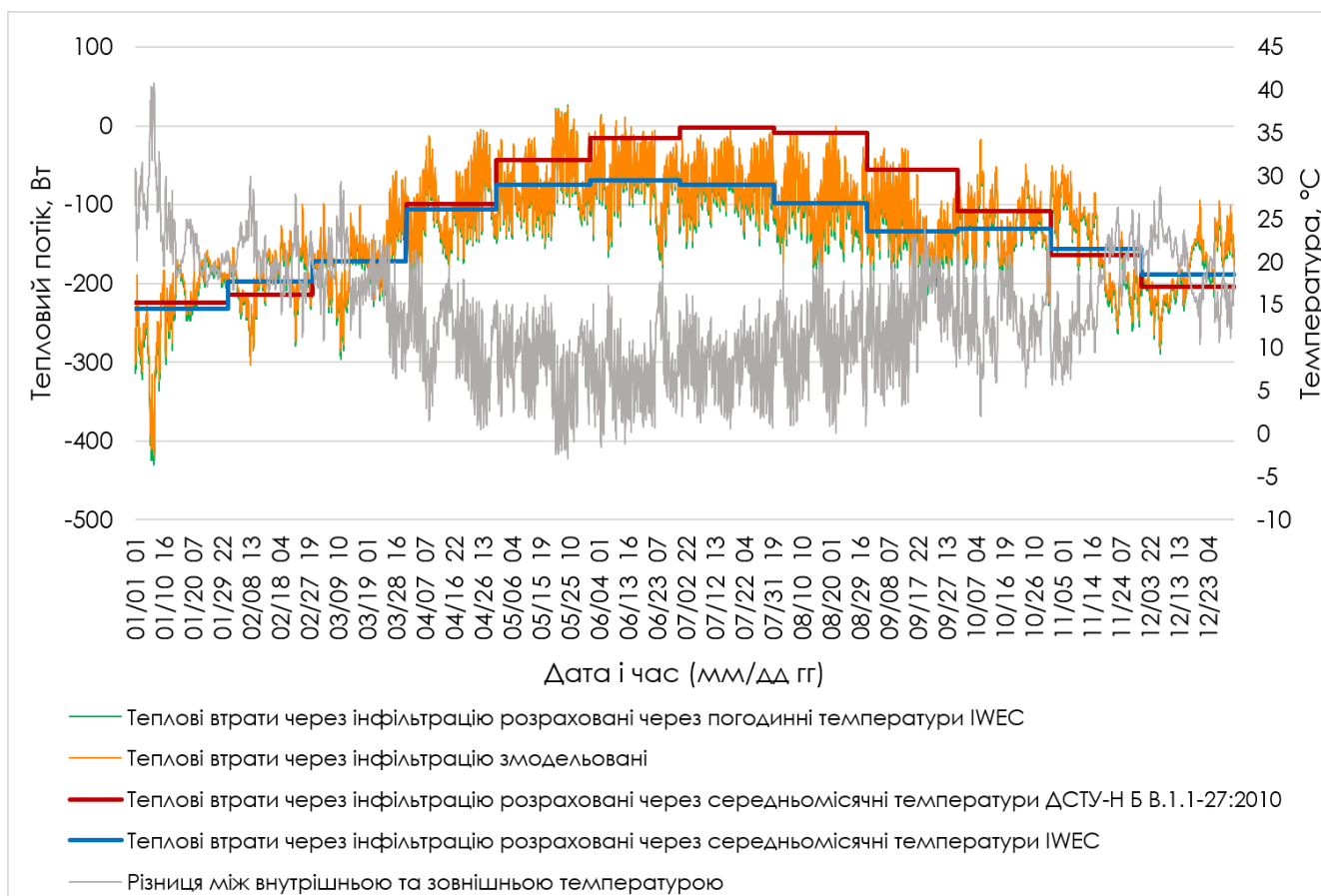


Рисунок 3.6 – Порівняння теплових втрат для стаціонарної і динамічної моделі

Загалом, результати показують, що змодельовані теплові втрати через інфільтрацію за опалювальний період є на 3,9% меншими, ніж ті, що розраховані за стаціонарною методикою з використанням середньомісячних температур.

Це пояснюється тим, що стаціонарна методика передбачає застосування занижених зовнішніх температур. У результаті формується систематичне завищення теплових втрат, що призводить до переоцінки потреби в теплопостачанні.

Таким чином, динамічний підхід забезпечує більш точне відтворення реальної картини тепловтрат, дозволяючи уникнути надмірного резервування потужностей та підвищити точність розрахунку енергетичного балансу будівлі.

Переваги динамічного підходу

Для об'єктивного оцінювання теплової поведінки будівель в реальних умовах експлуатації надзвичайно важливим є врахування динамічної змінності теплових потоків. Саме енергетичне моделювання дозволяє розглядати будівлю не як статичну систему, а як динамічний об'єкт з неперервною тепловою взаємодією із навколишнім середовищем.

На відміну від стаціонарного підходу, який базується на усереднених або постійних значеннях температури, повітрообміну та теплових навантажень, динамічне моделювання враховує погодинні зміни кліматичних та внутрішніх параметрів. Це забезпечує більш точну оцінку як теплових втрат, так і внутрішніх надходжень енергії, включаючи сонячну радіацію, роботу побутових приладів, інфільтрацію та акумуляційні властивості огорожень.

На рисунку 3.7 представлено тепловий баланс приміщення у погодинному розрізі за січень, згрупований за джерелами та напрямками теплових потоків.

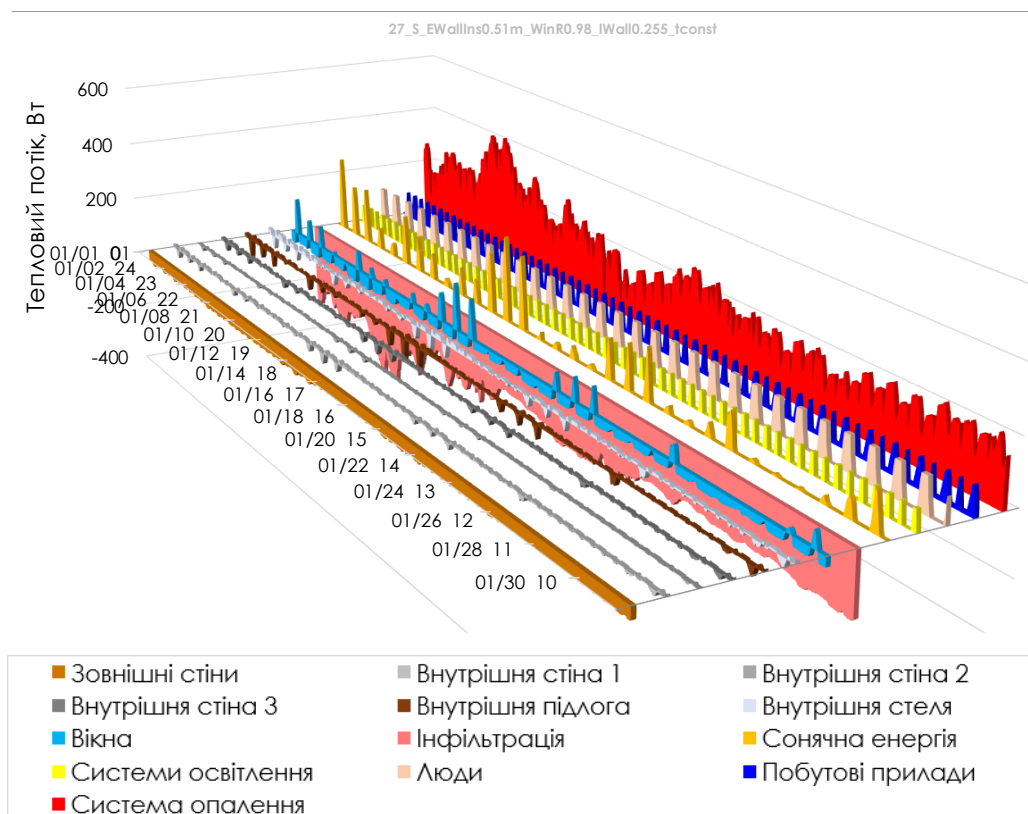


Рисунок 3.7 – Тепловий баланс репрезентативної кімнати в місячному розрізі

Видно, що найбільші втрати пов'язані з інфільтрацією повітря та теплопередачею через огороження, тоді як основними джерелами надходжень тепла є система опалення, сонячна енергія, освітлення та побутове обладнання.

Рисунок 3.8 деталізує ці процеси у форматі добового балансу – для типової денної (12:00) та нічної (24:00) години. Добре помітно, як змінюється роль окремих компонентів: удень зростає внесок сонячної енергії та освітлення, тоді як уночі зростає навантаження на систему опалення за рахунок відсутності пасивного тепла.

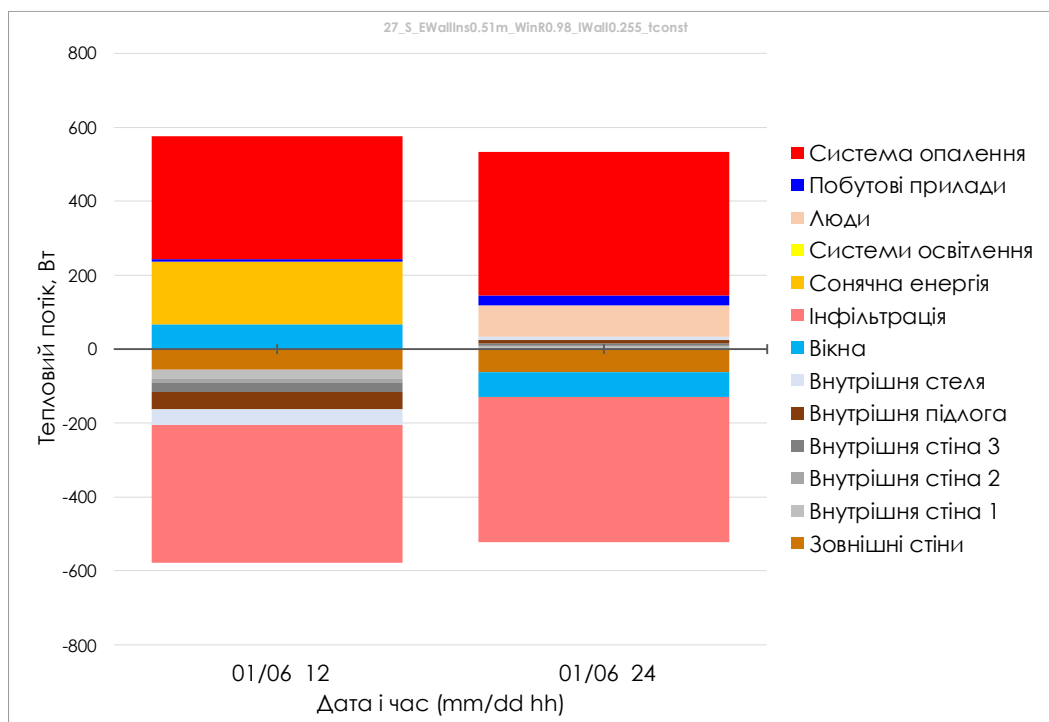


Рисунок 3.8 – Тепловий баланс в годинному розрізі для денної і нічної години

Проведений аналіз демонструє, що динамічне моделювання теплового балансу будівлі забезпечує більш гнучке та точне відображення реальних умов експлуатації, порівняно зі стаціонарним підходом. Зокрема:

- Врахування погодинної зміни температури та сонячної радіації дозволяє адекватно оцінити ефект пасивного опалення та короткочасних похолодань;
- Теплові втрати через інфільтрацію змінюються в часі і не можуть бути точно враховані за допомогою сталих коефіцієнтів;
- Вплив внутрішніх джерел тепла (люди, побутова техніка, освітлення) суттєво коливається протягом доби, що важливо враховувати при оптимізації систем опалення;
- Динамічна модель дає змогу оцінити ефект акумуляції тепла в огорожувальних конструкціях, що повністю ігнорується у стаціонарних розрахунках.

З урахуванням зазначеного, динамічне моделювання є доцільним і необхідним інструментом для оцінювання енергоефективності житлових будівель у сучасних умовах.

3.2 Визначення впливу масивності стін на енергетичні характеристики будівлі

Одним із важливих чинників у формуванні теплової поведінки будівлі є масивність огорожувальних конструкцій, тобто їх здатність накопичувати та віддавати тепло у часі. Особливо це стосується зовнішніх і внутрішніх стін, які беруть участь у перерозподілі теплової енергії між приміщеннями та між будівлею й зовнішнім середовищем.

На відміну від легких конструкцій, масивні стіни можуть згладжувати добові коливання температури, зменшувати пікові теплові навантаження на систему опалення та забезпечувати теплову інерційність, що критично важливо для енергоефективності в умовах змінного клімату.

Вплив масивності зовнішніх стін на енергоспоживання

Для аналізу впливу масивності зовнішніх стін у динамічному моделюванні було використано три варіанти товщини конструкцій:

- 0,25 м (1 цегла);
- 0,51 м (2 цегли);
- 0,77 м (3 цегли).

Такий вибір обумовлений тим, що наведені варіанти відповідають типовим товщинам зовнішніх стін у багатоквартирному житловому фонді, побудованому в різні періоди в Україні. Зокрема:

- стіни товщиною 0,25 м характерні для легких конструкцій або несучих перегородок у каркасних будівлях,
- 0,51 м – поширений варіант для зовнішніх несучих стін у цегляних будинках радянського періоду,
- 0,77 м – зустрічається у більш масивних або історичних будівлях, з високими теплозахисними властивостями за рахунок акумуляційної здатності.

Крім того, такий діапазон товщин регламентується сучасними нормативними документами, зокрема [31], в якому вказані типові параметри конструктивних рішень зовнішніх стін із цегли та блоків, що широко застосовуються в практиці проєктування.

Такий підхід дозволяє оцінити діапазон енергетичної поведінки стін з різною теплоємністю та масивністю, а також з'ясувати, наскільки теплова інерційність конструкцій може впливати на енергоспоживання будівлі в умовах добових і сезонних температурних коливань.

З метою кількісної оцінки впливу масивності зовнішніх стін було проведено серію розрахунків енергоспоживання для варіантів з різною товщиною несучого шару цегляної кладки (0,25 м, 0,51 м, 0,77 м), для приміщень з північною та південною орієнтацією. Результати річного споживання теплової енергії на опалення наведено на рисунку 3.9.

Для цієї серії розрахунків використовувалась неутеплена модель будівлі (без заходів термомодернізації). Товщина внутрішніх стін у всіх варіантах була фіксованою і становила 0,255 м, що відповідає типовим несучим або заповнюючим конструкціям. Також не застосовувалося регулювання системи опалення – температура внутрішнього повітря в приміщенні підтримувалась на постійному рівні 20 °C протягом усього періоду моделювання. Це дозволяє чітко оцінити вплив саме масивності зовнішніх стін виключивши вплив утеплення, графіків пониження температури або поведінкових факторів споживачів.

Такий підхід забезпечив чисту оцінку теплової інерційності огорожень як єдиного змінного параметра.

Для південної орієнтації, яка характеризується вищим рівнем сонячних надходжень при збільшенні товщини стіни з 0,25 м до 0,51 м споживання знижується на 25,3%, з 1208,7 до 902,6 кВт·год при сталій температурі опалення. Подальше збільшення масивності до 0,77 м демонструє зменшення енергоспоживання ще на 15,5% (до 762,8 кВт·год), що становить загальне зниження на 36,9% порівняно з базовим варіантом.

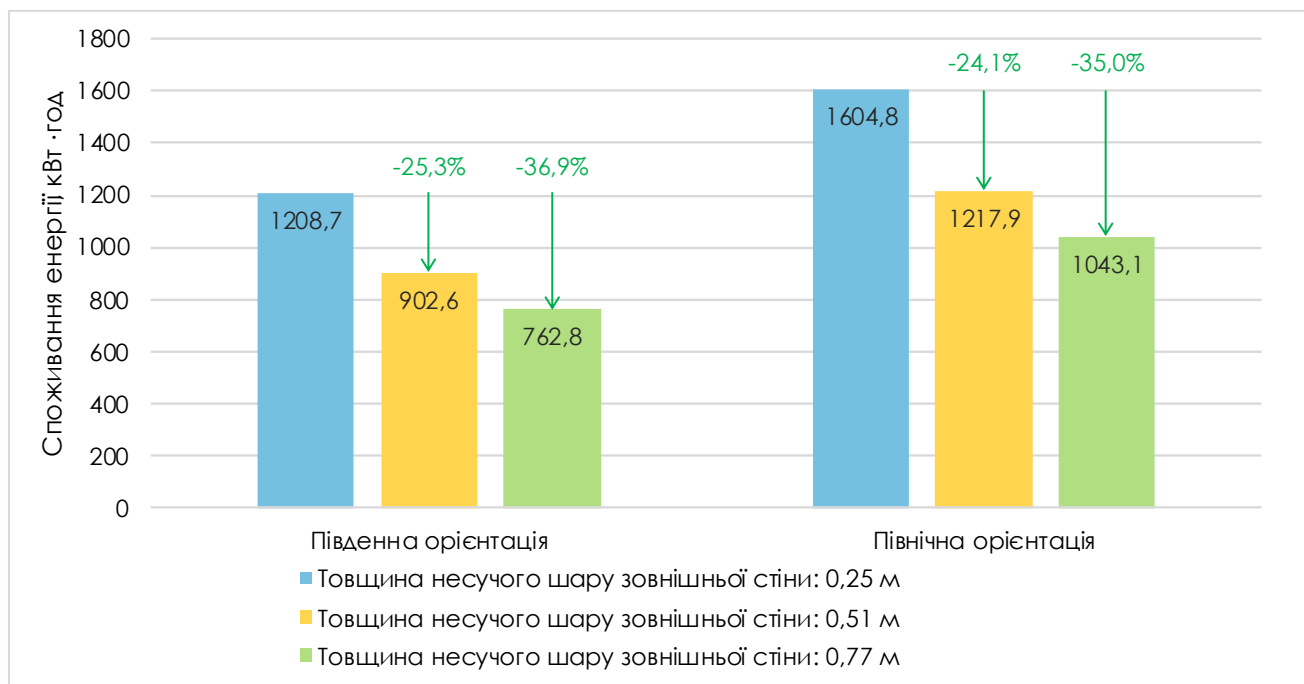


Рисунок 3.9 – Споживання енергії на опалення при різній масивності зовнішніх стін

Для північної орієнтації, де сонячна інсоляція мінімальна ефект від збільшення масивності дещо менший, але все ще суттєвий – зниження на 24,1% при переході з 0,25 м до 0,51 м і ще на 14,3% при товщині 0,77 м (35,0% від 0,25 м).

Порівняння між орієнтаціями показує, що при однаковій товщині зовнішніх стін південна орієнтація забезпечує нижче річне енергоспоживання, в середньому на 24-27% менше, ніж аналогічна північна зона. Це зумовлено впливом сонячних теплонадходжень.

Отже, орієнтація будівлі та масивність стін мають комбінований вплив на енергетичну ефективність, і їх необхідно розглядати як взаємопов'язані фактори при проектуванні та реконструкції житлових будівель.

Для глибшого аналізу впливу масивності стін на теплову поведінку будівлі розглянуто погодинне навантаження на систему опалення протягом зимового місяця (лютий). На рисунку 3.10 наведено графіки зміни теплового навантаження для трьох варіантів товщини зовнішніх стін (0,25 м, 0,51 м, 0,77 м) з південною (а) та північною (б) орієнтацією. На графіку чітко видно, як сонячна радіація викликає

короткочасне зменшення навантаження на опалення вдень, а вночі зникнення цього джерела тепла спричиняє стрибок споживання.

Ці графіки ілюструють, як зміна теплоємності огорожень впливає не лише на загальне енергоспоживання, а й на характер та амплітуду навантаження на систему опалення у різні моменти часу.

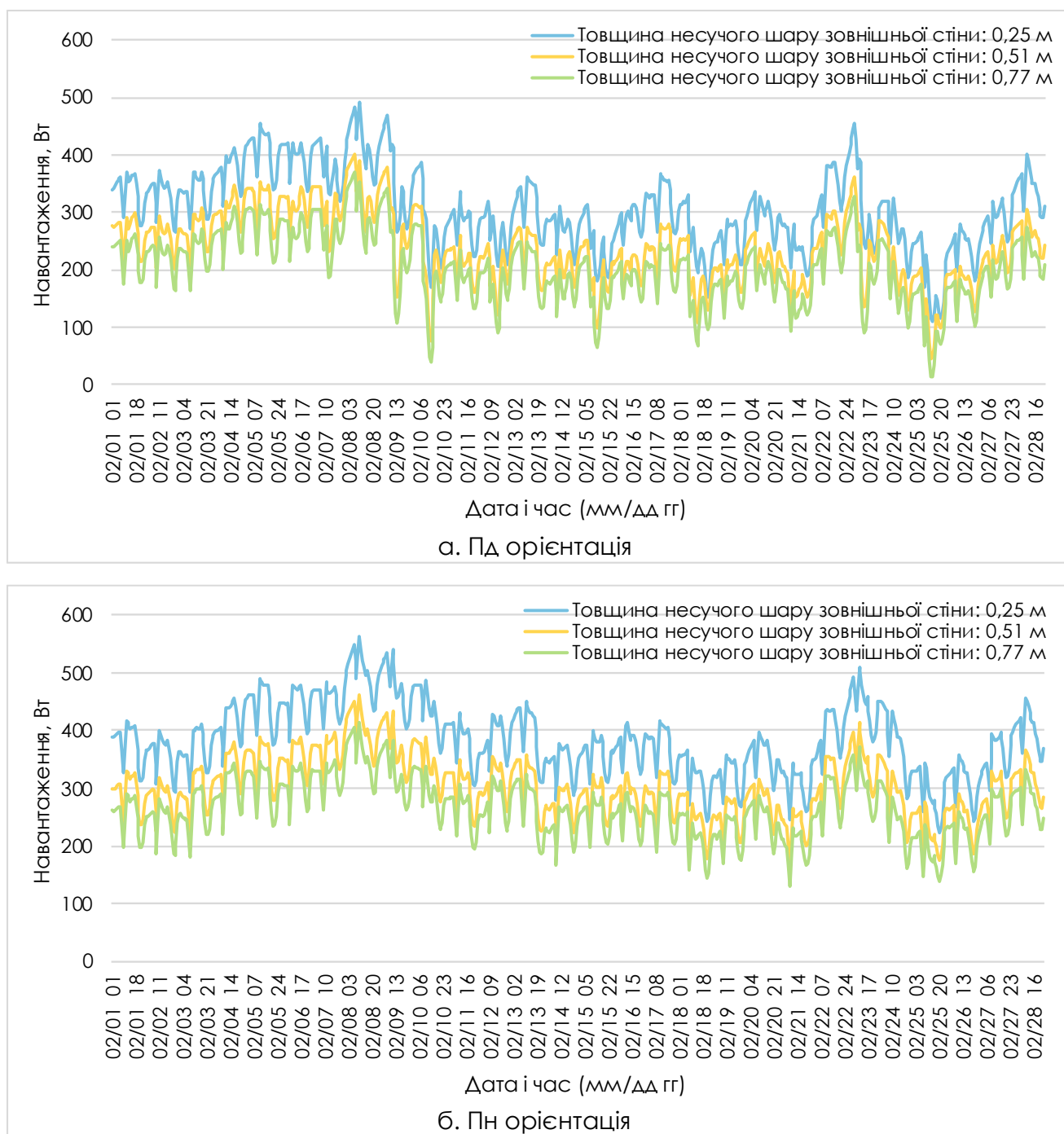


Рисунок 3.10 – Навантаження на систему опалення: а. Південна орієнтація зовнішніх стін; б. Північна орієнтація зовнішніх стін

Для кращого розуміння динаміки змін теплового навантаження було проаналізовано середні добові коливання за лютий для кожного з варіантів масивності зовнішніх стін та орієнтацій (рисунок 3.11).

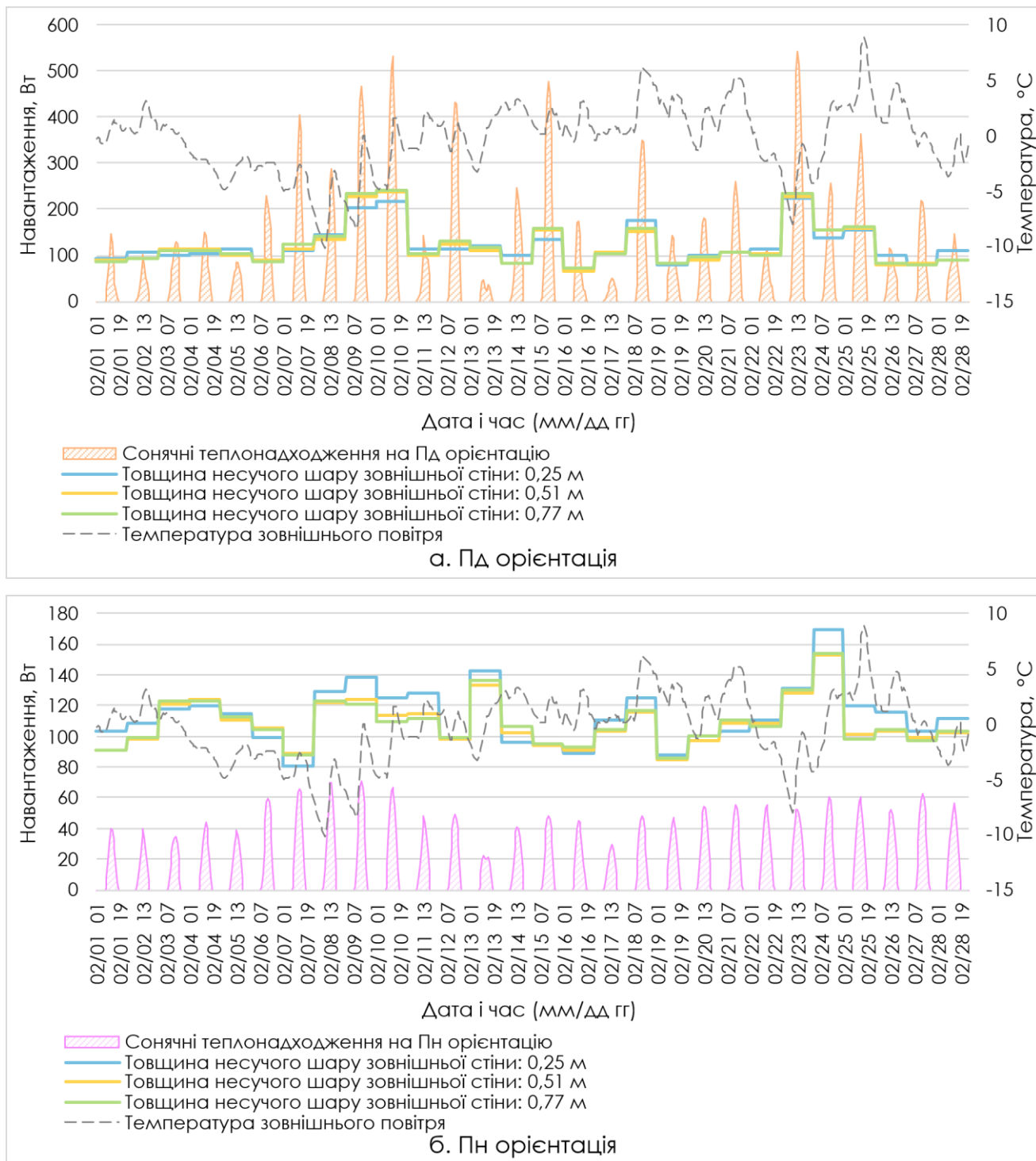


Рисунок 3.11 – Середні добові коливання навантаження на систему опалення: а. Південна орієнтація зовнішніх стін; б. Північна орієнтація зовнішніх стін

Отримані результати дозволяють кількісно оцінити динаміку змін енергоспоживання залежно від товщини зовнішніх стін і орієнтації приміщення. У середньому добові коливання в північних приміщеннях є на 9,7% нижчими, ніж у південних (таблиця 3.1). Це пояснюється відсутністю сонячної радіації, яка вносить значний внесок у добові флуктуації теплового балансу. З іншого боку, зовнішня температура впливає на обидві орієнтації. Її добові коливання (пунктирна лінія) зумовлюють синхронне зростання/зниження навантаження, але більш масивні стіни здатні амортизувати ці зміни, особливо вночі.

Таблиця 3.1 – Середні добові коливання навантаження на систему опалення для лютого місяця

Орієнтація	Товщина стін, м	Середнє добове коливання, Вт	Середнє значення по орієнтаціям, Вт
Південна	0,25	122,4	122,1
	0,51	121,0	
	0,77	122,8	
Північна	0,25	113,4	110,2
	0,51	108,4	
	0,77	108,9	

Цікаво, що в обох орієнтаціях найменші коливання зафіксовано для варіанту з товщиною стіни 0,51 м, тобто конструкції з двох цеглин. Такий результат можна пояснити тим, що ця товщина забезпечує оптимальне поєднання теплоємності та чутливості до змін умов, тоді як:

- Тонкі стіни (0,25 м) швидко реагують на зміну температури, створюючи різкі піки навантаження;
- Масивні стіни (0,77 м) можуть мати більшу інерцію, але через запізнення в реакції не завжди ефективно згладжують коливання, особливо при короткочасних змінах.

Вплив масивності внутрішніх стін на енергоспоживання

Попри те, що внутрішні стіни не контактують із зовнішнім середовищем, вони можуть суттєво впливати на внутрішній тепловий баланс будівлі, особливо у випадках нерівномірного опалення, а також за рахунок своєї акумулюючої здатності. Вони приймають, передають і зберігають тепло, формуючи поведінку приміщень у перехідних режимах.

У даному дослідженні розглянуто вплив трьох варіантів товщини внутрішніх стін:

- 0,125 м (0,5 цегли);
- 0,255 м (1 цегла);
- 0,385 м (1,5 цегли).

На рисунку 3.12 наведено результати динамічного моделювання річного споживання теплової енергії залежно від товщини внутрішніх стін для південної та північної орієнтацій приміщення.

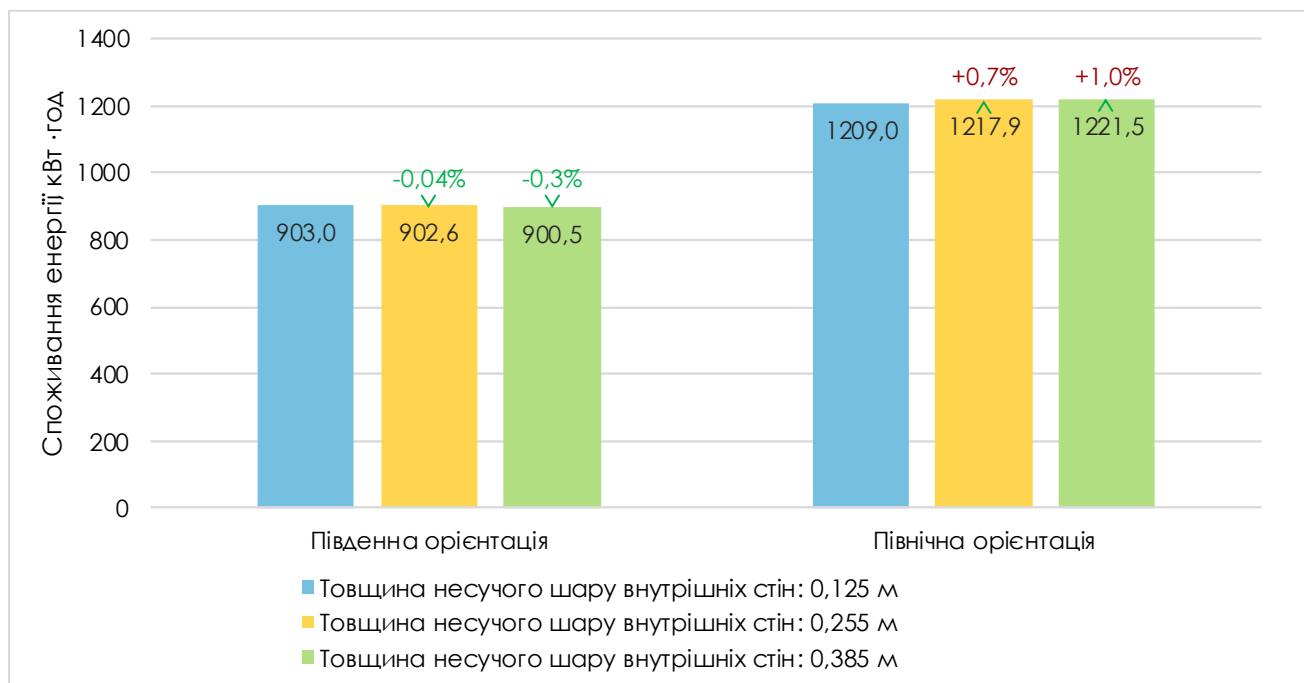


Рисунок 3.12 – Споживання енергії на опалення при різній масивності внутрішніх стін до термомодернізації

Для південної орієнтації спостерігається незначне, але стабільне зменшення споживання енергії зі збільшенням масивності внутрішніх стін – максимальна різниця становить 0,3% зменшення енергоспоживання системою опалення для товщини внутрішніх стін 0,385 м. Попри відносно незначний масштаб змін, цей ефект є результатом ефективнішої акумуляції сонячного тепла в масивніших конструкціях.

У денний час, коли пряма інсоляція активно надходить через світлопрозорі огороження, внутрішні стіни поглинають частину надлишкової енергії, знижуючи пікові навантаження. Надалі ця енергія віддається вночі або у періоди похмурої погоди, зменшуючи потребу в роботі системи опалення.

Для північної орієнтації спостерігається зворотна тенденція. Зі збільшенням товщини внутрішніх стін енергоспоживання зростає на 1,0% при товщині внутрішніх стін 0,385 м.

У цьому випадку відсутність інсоляції робить внутрішні теплові потоки більш значущими. Масивніші стіни акумулюють тепло, але можуть затримувати його перехід у приміщення, створюючи теплову інерцію, що вимагає додаткового нагріву для досягнення комфортної температури.

Для дослідження впливу масивності внутрішніх огорожувальних конструкцій на погодинне теплове навантаження був проведений поглиблений аналіз теплового навантаження для характерних періодів опалювального сезону:

- типового холодного зимового тижня (рисунок 3.13 а, б), що характеризується низькими температурами і помірними сонячними теплонадходженнями;
- перехідного осіннього тижня (рисунок 3.13 в, г), що вирізняється помірною зовнішньою температурою і високими сонячними теплонадходженнями.

Упродовж зимового періоду виявлено, що зі збільшенням масивності внутрішніх стін зростає погодинне теплове навантаження на систему опалення. Ця тенденція є стабільною для обох орієнтацій – як південної, так і північної. Зростання пояснюється тим, що масивніші конструкції поглинають більшу

кількість тепла, яке не встигає передаватися до повітряного середовища приміщення в межах одного розрахункового періоду. У результаті система опалення змушена додатково компенсувати енергію, що акумулюється в огороженнях.

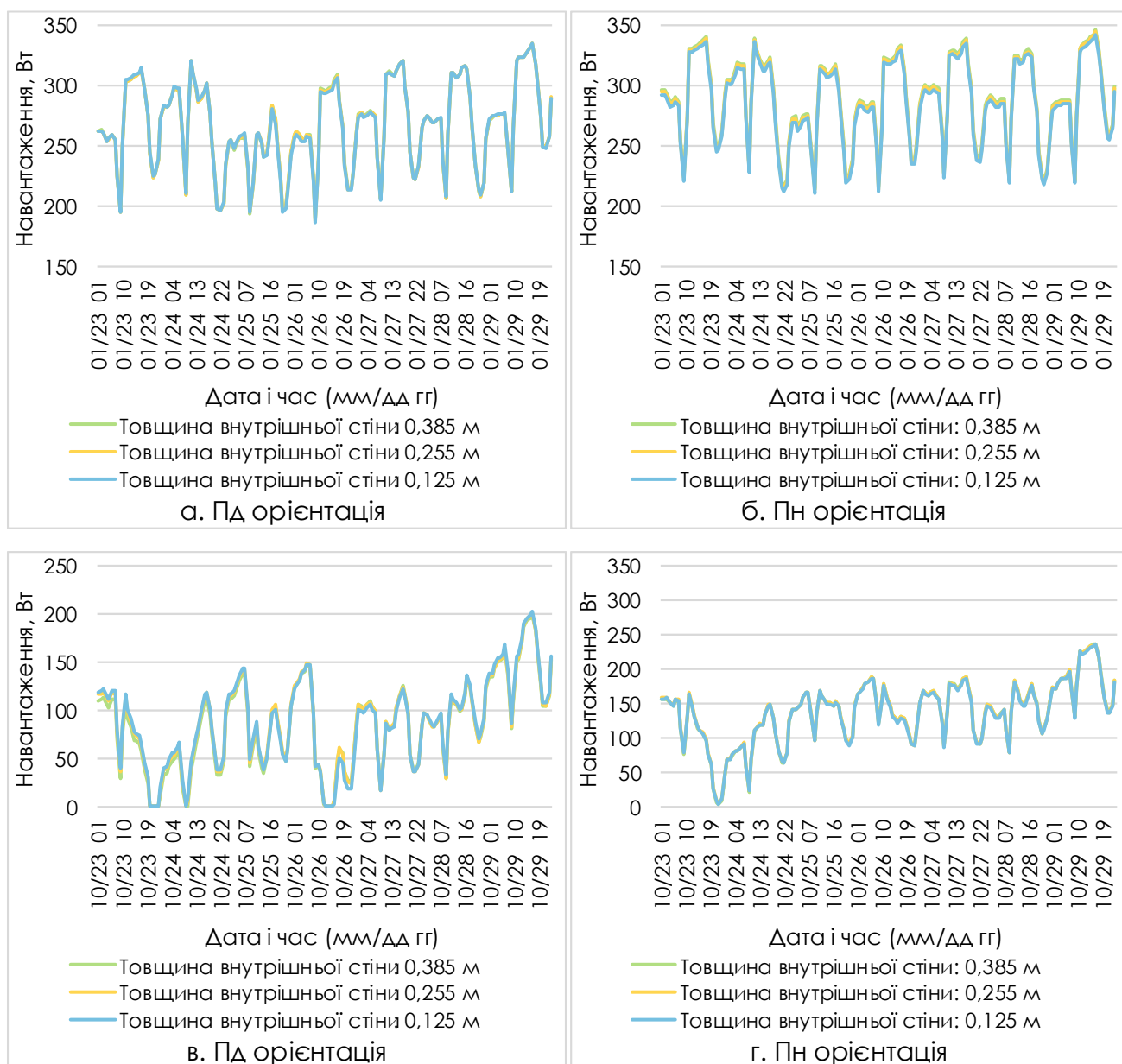


Рисунок 3.13 – Навантаження на систему опалення: а. Південна орієнтація зовнішніх стін, холодний зимовий тиждень; б. Північна орієнтація зовнішніх стін, холодний зимовий тиждень; в. Південна орієнтація зовнішніх стін, перехідний осінній тиждень; г. Північна орієнтація зовнішніх стін, перехідний осінній тиждень

На відміну від цього, у перехідний осінній період ситуація частково змінюється. За умов вищої зовнішньої температури та наявності сонячного випромінювання, акумулюючі властивості масивних внутрішніх стін можуть проявлятися позитивно. Вдень, у періоди надлишку тепла, частина енергії накопичується в конструкціях, а ввечері та вночі ця енергія поступово передається у внутрішнє середовище, зменшуючи інтенсивність роботи системи опалення.

У південній орієнтації цей ефект є більш вираженим завдяки додатковим сонячним теплонадходженням. Натомість для північної орієнтації, де інсоляція практично відсутня, вплив масивності внутрішніх стін на зменшення навантаження залишається незначним навіть у перехідний період.

Вплив теплозахисних властивостей огорожень будівлі на її енергоспоживання

Для аналізу ефективності термомодернізації будівлі проведено порівняння динамічного енергоспоживання до та після впровадження енергозберігаючих заходів. Моделювання виконувалося для приміщень із південною та північною орієнтацією. У рамках сценарію термомодернізації було реалізовано наступні зміни:

- Утеплення зовнішніх стін (0,510 м) за рахунок додавання шару мінеральної вати товщиною 0,1 м, що суттєво зменшило теплопровідність огороження та підвищило опір теплопередачі зовнішньої оболонки з $R_{\text{неут.}} = 0,67 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ до $R_{\text{ут.}} = 3,31 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$.
- Заміна вікон на енергоефективні двокамерні склопакети з двома низькоемісійними покриттями, що підвищило опір теплопередачі з $R_{\text{нееф.}} = 0,48 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ до $R_{\text{еф.}} = 0,73 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$

Конструкція вікон має наступну конфігурацію:

4i-12air-4-12air-4i, де:

4i – скло з внутрішнім low-e покриттям, яке відбиває довгохвильове інфрачервоне випромінювання назад у приміщення;

12air – повітряні камери, які знижують теплопередачу за рахунок зменшення конвекції;

4 – центральне скло, що додатково підвищує тепло- і звукоізоляційні характеристики.

Розрахунковий опір теплопередачі після утеплення відповідає вимогам ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» зменшеному до рівня 75% від R_{qmin} , що дозволяється при реконструкціях і капітальному ремонті існуючих будівель [24].

На рисунку 3.14 наведено результати моделювання річного споживання теплової енергії для обох орієнтацій:

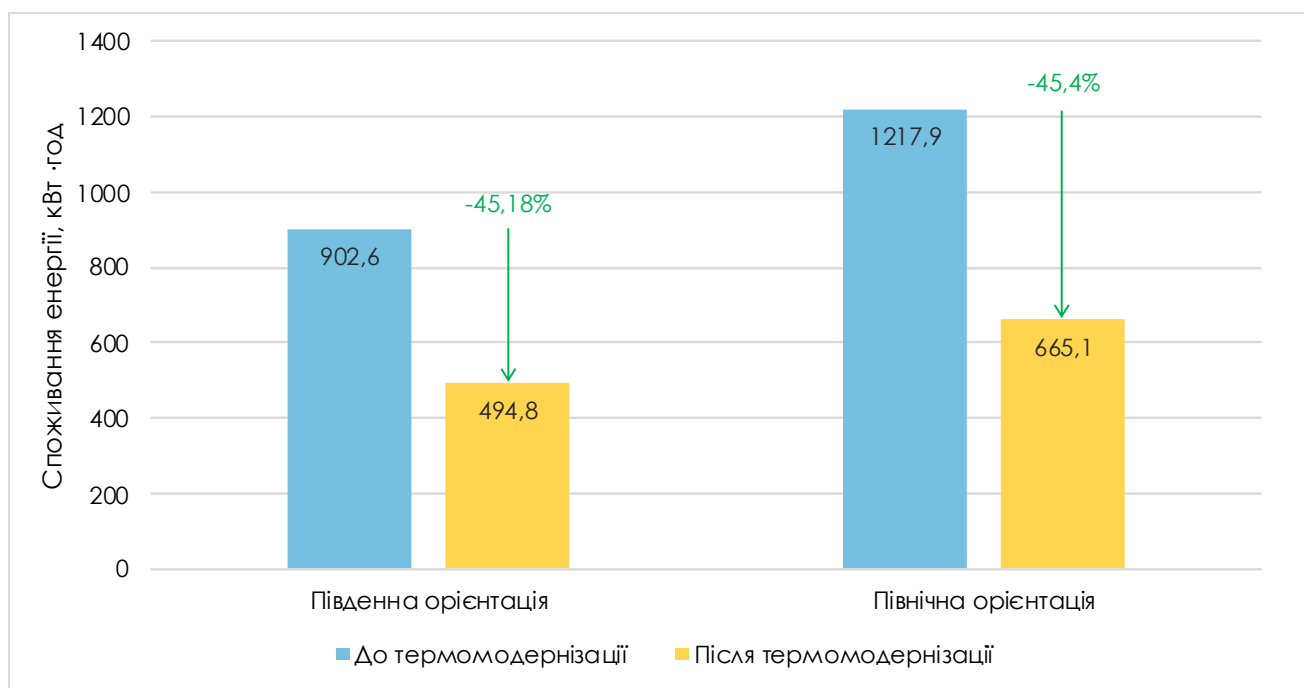


Рисунок 3.14 – Споживання енергії на опалення при різній орієнтації будівлі при термомодернізації

Південна орієнтація:

- До термомодернізації: 902,6 кВт·год
- Після термомодернізації: 494,8 кВт·год
- Скорочення енергоспоживання – 45,18%

Північна орієнтація:

- До термомодернізації: 1217,9 кВт·год
- Після термомодернізації: 665,1 кВт·год
- Скорочення енергоспоживання – 45,4%

Отримані результати свідчать про високу ефективність комплексного підходу до термомодернізації, який охоплює як огорожувальні конструкції, так і світлопрозорі елементи. Відсоткове зменшення тепловтрат є майже однаковим для обох орієнтацій, що вказує на стабільну ефективність застосованих заходів у різних кліматичних умовах.

Також варто зауважити, що завдяки покращенню теплозахисних властивостей огорожень знижується не лише середнє споживання енергії, але й потенційно добові коливання навантаження, що позитивно впливає на ефективність регулювання системи опалення.

Порівняння результатів стаціонарного та динамічного розрахунку енергопотреб

У традиційній практиці проєктування систем опалення найбільш поширеним підходом до оцінки теплових втрат та енергопотреб є стаціонарне моделювання, засноване на фіксованих температурних параметрах. Однак такий підхід не враховує змін кліматичних умов, внутрішніх тепловиділень та теплової інерційності конструкцій, що може призводити до перевищення розрахункових значень порівняно з реальними умовами експлуатації.

Зі свого боку, динамічне моделювання дає змогу охопити погодинні зміни зовнішнього середовища та внутрішніх процесів, формуючи більш точну картину реальної енергопотреб будівлі.

На рисунку 3.15 представлено порівняння річної енергопотреб, розрахованої за стаціонарною та динамічною моделлю, для двох варіантів конструктивного стану огорожень: до та після термомодернізації.

До термомодернізації:

Стаціонарна модель передбачає енергопотребу на рівні 1658,6 кВт·год, тоді як динамічна модель дає значення 1522,9 кВт·год. Розходження становить 8,2%, що демонструє тенденцію стаціонарної методики до завищення теплових навантажень за рахунок використання граничних (максимальних) умов.

Після термомодернізації:

Енергопотреба знижується до 1070,8 кВт·год у стаціонарній моделі і до 1007,2 кВт·год у динамічній. Різниця між підходами становить 5,9%, що дещо менше, ніж до модернізації, й свідчить про підвищення стабільності теплового режиму будівлі завдяки кращим теплозахисним характеристикам огорожень.

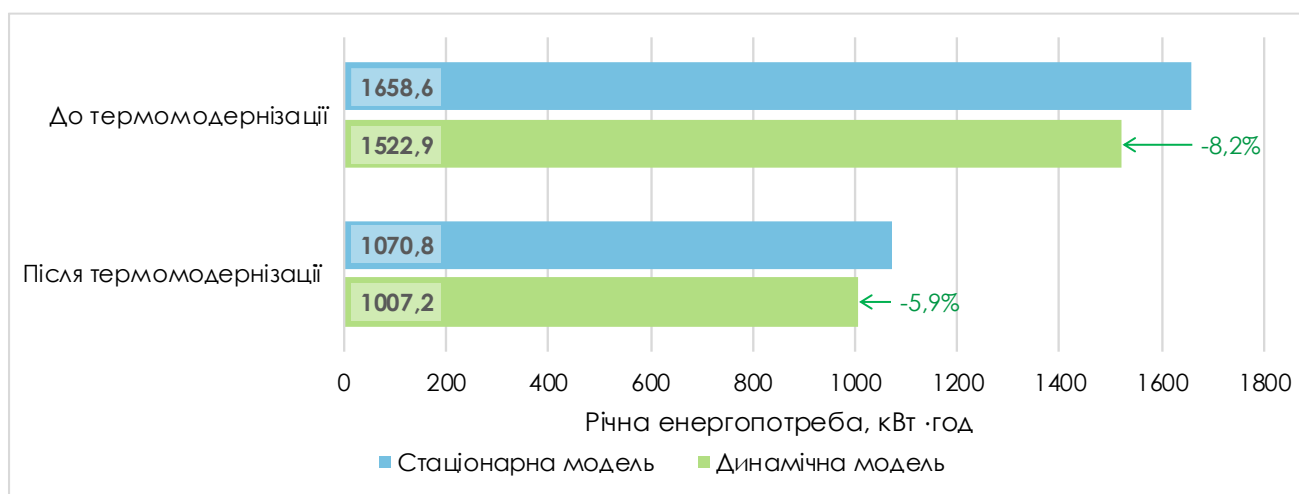


Рисунок 3.15 – Річна енергопотреба на опалення для стаціонарної і динамічної моделі

Порівняльний аналіз результатів стаціонарної та динамічної моделі розрахунку енергопотреби показує, що стаціонарна модель надає консервативну оцінку енергопотреби, що призводить до перевищення розрахованих значень на 6–8%, залежно від характеристик огорожувальних конструкцій.

Динамічний підхід дозволяє точніше відтворити вплив змін кліматичних умов, внутрішніх теплонадходжень та інерційності будівельних матеріалів, що особливо важливо для енергоефективних будівель.

Після термомодернізації різниця між результатами моделей дещо зменшується, що свідчить про стабілізацію теплового режиму та меншу чутливість до температурних коливань.

Ключовою проблемою стаціонарного підходу є теплові перетопи – ситуації, коли теплова потужність системи перевищує фактичну потребу, особливо в перехідні періоди. Це призводить не лише до надмірного споживання енергії, але й до порушення температурного комфорту для користувачів.

Таким чином, динамічне моделювання забезпечує більш об'єктивну та збалансовану оцінку, знижуючи ризики як недогріву, так і перегріву, що є критично важливим для раціонального проектування опалювальних систем.

Висновки до розділу 3

У розділі проведено комплексне дослідження теплової поведінки житлової будівлі з урахуванням зміни теплофізичних властивостей огорожувальних конструкцій та режимів експлуатації. Основну увагу зосереджено на порівнянні стаціонарної та динамічної моделей розрахунку енергетичних характеристик, а також на аналізі впливу геометричних та матеріальних параметрів огорожень на річне споживання та потребу теплової енергії.

За результатами дослідження встановлено наступне:

- Динамічне моделювання забезпечує більш точну оцінку енергопотреб, дозволяє враховувати вплив сонячної радіації, інфільтрації, добових коливань температури, а також теплової інерційності матеріалів, чого не може забезпечити стаціонарна методика.
- Стаціонарний підхід систематично переоцінює енергопотребу (до 8%), що може призводити до неоптимального розрахунку потужності опалювального обладнання та виникнення перетопів у реальних умовах експлуатації.
- Масивність зовнішніх стін суттєво впливає на енергоспоживання: збільшення теплоємності дозволяє зменшити річну потребу в теплі до 36,9% за рахунок згладжування добових піків.
- Оптимальним з точки зору стабільності теплового режиму виявився варіант з товщиною зовнішніх стін 0,51 м, який забезпечує баланс між акумуляцією тепла та швидкістю теплової відповіді.

- Вплив внутрішніх стін є менш вираженим, однак у південній орієнтації масивні стіни сприяють акумулюванню надлишкової сонячної енергії, тоді як у північній можуть призводити до затримки нагріву повітря приміщення.
- Термомодернізація огорожень (утеплення та встановлення енергоефективних вікон) дозволяє скоротити енергоспоживання майже на 45%, при цьому зменшується чутливість будівлі до змін зовнішніх умов, а різниця між стаціонарною та динамічною моделями також зменшується.

Таким чином, динамічний підхід демонструє вищу достовірність та адаптивність до реальних експлуатаційних умов, особливо при аналізі будівель з підвищеними вимогами до енергоефективності. Отримані результати є підґрунтям для подальших досліджень змінних режимів роботи системи опалення, що буде розглянуто у наступному розділі.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЛІ ПРИ СТАЛИХ ТА ЗМІННИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ТА АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕННЯХ ОПАЛЕННЯ

Підвищення вимог до енергоефективності житлового фонду, зростання вартості енергоносіїв, нестабільність енергетичних ринків та загрози, пов'язані з військовими діями, роблять питання адаптивності будівель до змінних режимів роботи систем опалення особливо актуальним. Окрім класичного сценарію експлуатації з постійним температурним режимом, у практиці все частіше зустрічаються ситуації, коли теплозабезпечення функціонує з пониженням температурних параметрів, частковим або повним відключенням у певних зонах чи в цілому будинку.

У сучасних умовах експлуатації житлових будівель стабільна робота систем опалення дедалі частіше доповнюється або замінюється адаптивними, змінними та нестандартними сценаріями теплозабезпечення. Причинами таких змін є не лише енергетичні міркування, але й більш широкий комплекс факторів:

- економічні – зростання вартості енергоносіїв та необхідність їх оптимального використання;
- технологічні – поява інтелектуальних систем управління мікрокліматом, здатних гнучко змінювати режим роботи;
- соціальні – зміна графіків перебування людей у приміщеннях та зростаючі очікування щодо комфорту;
- форс-мажорні обставини – наприклад, військові дії, руйнування інфраструктури, тимчасові відключення теплоносія, перебої в електропостачанні чи обмеження доступу до централізованих систем опалення.

За таких умов особливої актуальності набуває оцінка теплоенергетичних параметрів будівлі в умовах знижених теплових навантажень, періодичних зупинок системи опалення або зміни внутрішніх температурних режимів, які не є типовими для класичного розрахунку. У фокусі дослідження опиняються перехідні режими,

асиметричне нагрівання, локальні відключення, а також ефекти теплової інерції, що можливо врахувати лише в умовах динамічного аналізу.

Регулювання опалення за графіками пониження температури, наприклад у нічний період або під час відсутності мешканців, давно вважається ефективним засобом зниження річного енергоспоживання без втрати комфортних умов. Водночас, навіть незначна зміна температури в окремих приміщеннях або на окремих етапах опалювального періоду може мати суттєвий вплив на внутрішній тепловий баланс будівлі в цілому.

Також в умовах можливих аварійних або контрольованих відключень опалення, що не є винятковими в сучасному контексті (особливо для українських міст у період активних бойових дій), важливо оцінювати не лише загальне енергоспоживання, а й теплотривкість огорожувальних конструкцій, динаміку охолодження повітря у приміщеннях та міжзональні теплові взаємодії. Така оцінка дозволяє сформулювати практичні рекомендації щодо модернізації систем опалення, визначення пріоритетів у термомодернізації та оцінки ризиків для життєзабезпечення мешканців.

У цьому розділі розглядаються два ключові аспекти змінних режимів:

- вплив пониження температури внутрішнього повітря за заздалегідь визначеним графіком,
- теплоенергетичні параметри будівлі в умовах відключення системи опалення (як повного, так і часткового).

Дослідження проводиться з використанням динамічного моделювання, що дозволяє відстежити часову зміну теплового балансу, розподіл навантаження між приміщеннями та стійкість теплового середовища до зовнішніх і внутрішніх змін.

4.1 Оцінка енергетичних характеристик будівлі з урахуванням застосування графіків пониження температури

Регулювання температурного режиму опалення за допомогою графіків зниження внутрішньої температури є одним із найбільш поширених заходів

енергозбереження в житлових і громадських будівлях. Така стратегія полягає у тимчасовому пониженні температури повітря в приміщеннях у періоди, коли потреба в обігріві є менш критичною – зокрема, в нічний час або під час відсутності мешканців.

Сучасні системи управління ОВК передбачають можливість автоматичного регулювання теплового навантаження відповідно до запрограмованих сценаріїв або фактичної присутності користувачів. Це дозволяє не лише зменшити споживання теплової енергії, а й згладити пікові навантаження, поліпшивши роботу систем за рахунок врахування динамічних та інерційних моментів та знизити зношування обладнання.

У житловому секторі практика застосування графіків зниження температури стає дедалі поширенішою завдяки широкому впровадженню індивідуальних теплових пунктів, погодного регулювання та термостатів в на приладах опалення. Особливої актуальності такі заходи набувають у перехідні сезони, коли різниця між нічною та денною температурою є суттєвою.

Згідно з [31], рекомендоване значення пониження температури для житлових приміщень становить до 3 °C від базового температурного рівня (тобто, наприклад, з 20 °C до 17 °C). Такий рівень зниження вважається енергетично доцільним і комфортно-допустимим для короткочасних періодів зменшеного теплового навантаження.

У цьому підрозділі проаналізовано вплив впровадження графіків пониження температури на річну енергетичну ефективність будівлі. Здійснено порівняння результатів для різних сценаріїв регулювання з використанням як стаціонарного, так і динамічного моделювання, з акцентом на неоднорідні температурні умови в різних частинах будівлі.

4.1.1 Особливості стаціонарної моделі та її порівняння з динамічною

Стаціонарна модель, описана у підрозділі 3.1.1, базується на припущенні про сталий тепловий баланс, що дозволяє оперативно визначити проєктне навантаження за фіксованих температурних умов. Такий підхід широко

застосовується у практиці енергетичного моделювання завдяки своїй простоті. Проте у випадках, коли температурні режими в приміщеннях є змінними, наприклад, при реалізації стратегій регулювання опалення ця модель виявляє низку суттєвих обмежень. На рисунках 4.1 та 4.2 продемонстровано зміну річної енергопотребы досліджуваної зони за стаціонарною методикою в умовах пониження температури у різних частинах будівлі.

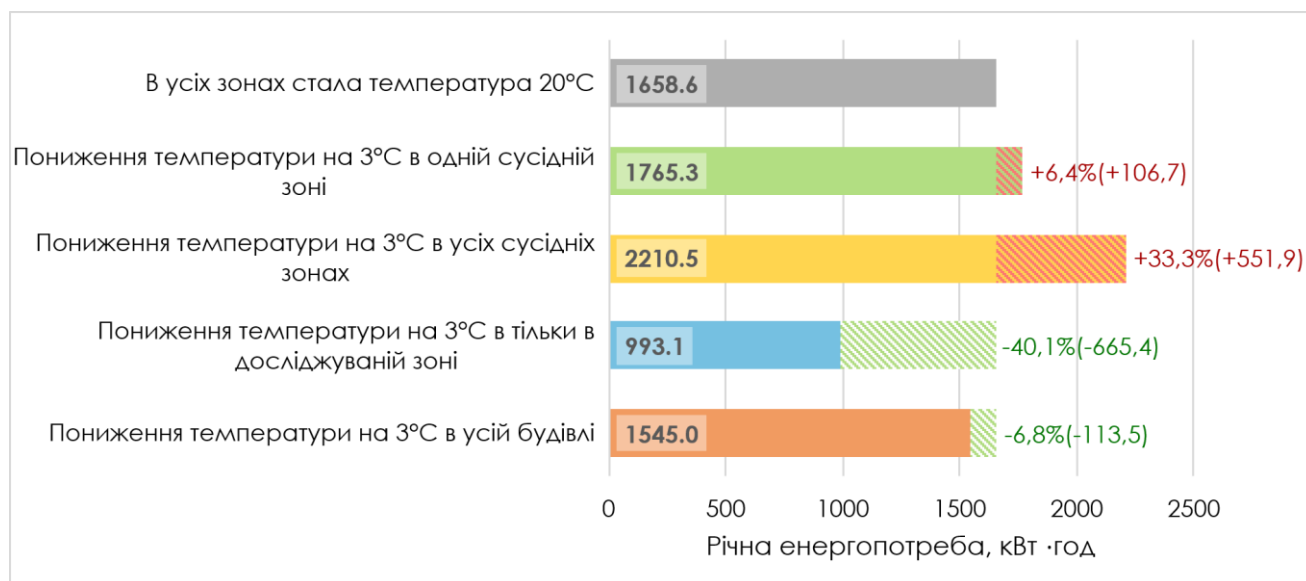


Рисунок 4.1 – Річна енергопотреба на опалення для стаціонарної моделі до термомодернізації

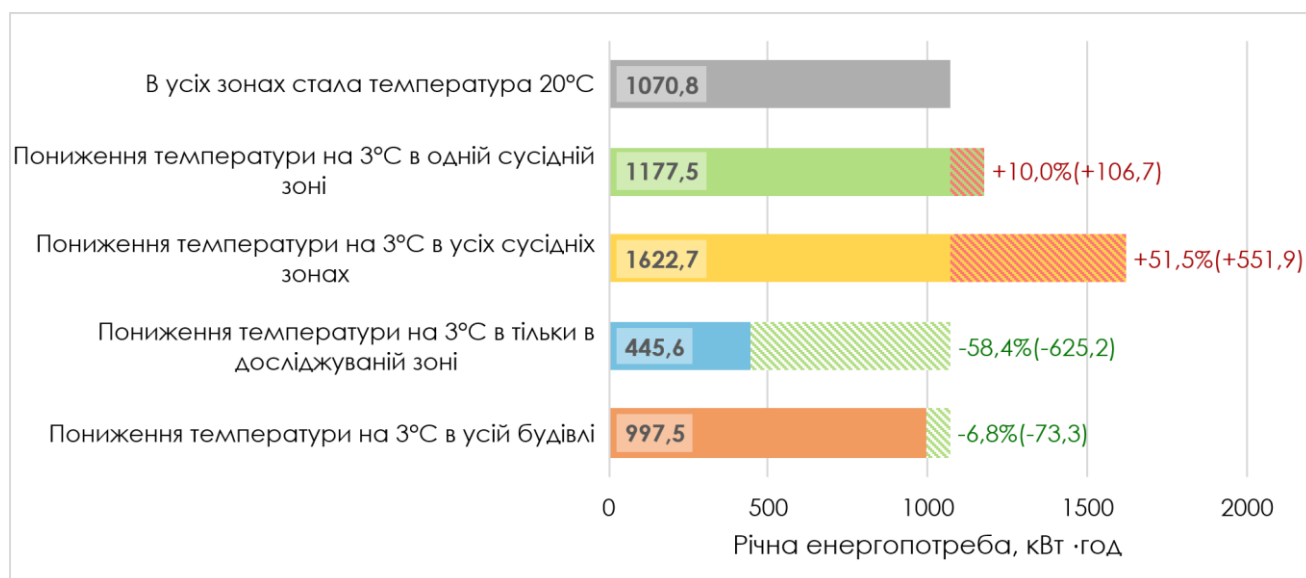


Рисунок 4.2 – Річна енергопотреба на опалення для стаціонарної моделі після термомодернізації

Варто підкреслити два важливих аспекти:

- Стаціонарна модель надмірно чутлива до змін температури в суміжних приміщеннях. Внаслідок спрощеного врахування теплопередачі через внутрішні огороження, навіть незначне зниження температури у сусідніх приміщеннях призводить до істотного зростання тепловтрат через ці конструкції. Наприклад, у сценарії з пониженням температури на 3 °C в усіх суміжних зонах, енергопотреба на опалення зростає більш ніж на 50% у порівнянні з базовим варіантом (рисунок 4.2). Така реакція є малоймовірною у реальних умовах, але відображає структурну обмеженість методики.
- Стаціонарна модель не враховує інерційність будівельних конструкцій, тому ефекти регулювання температури розглядаються як миттєві. Це означає, що енергетичний зиск від короткострокового пониження температури (наприклад, у нічний час або під час відсутності мешканців) виявляється завищеним, оскільки не враховується накопичення тепла в конструкціях і затримка в динаміці теплових потоків.

Для порівняння, результати динамічного моделювання (рисунок 4.3, 4.4) демонструють більш стриману реакцію системи на ті самі сценарії регулювання. Хоча загальні тенденції збігаються, їхня амплітуда значно нижча. Наприклад, у сценарії з пониженням температури в досліджуваній зоні після термомодернізації енергопотреба на опалення знижується на 18,8% у динамічній моделі проти 58,4% у стаціонарній.

Особливо цікавим є сценарій, коли пониження температури впроваджується лише у досліджуваній зоні. У статичному підході це негайно знижує теплове навантаження, але в динамічному моделюванні ефект є розтягнутим у часі: через теплову інерцію приміщення не так швидко охолоджується, а накопичене тепло продовжує покривати втрати. Цей ефект значно знижує потенційну економію від короткострокового пониження.

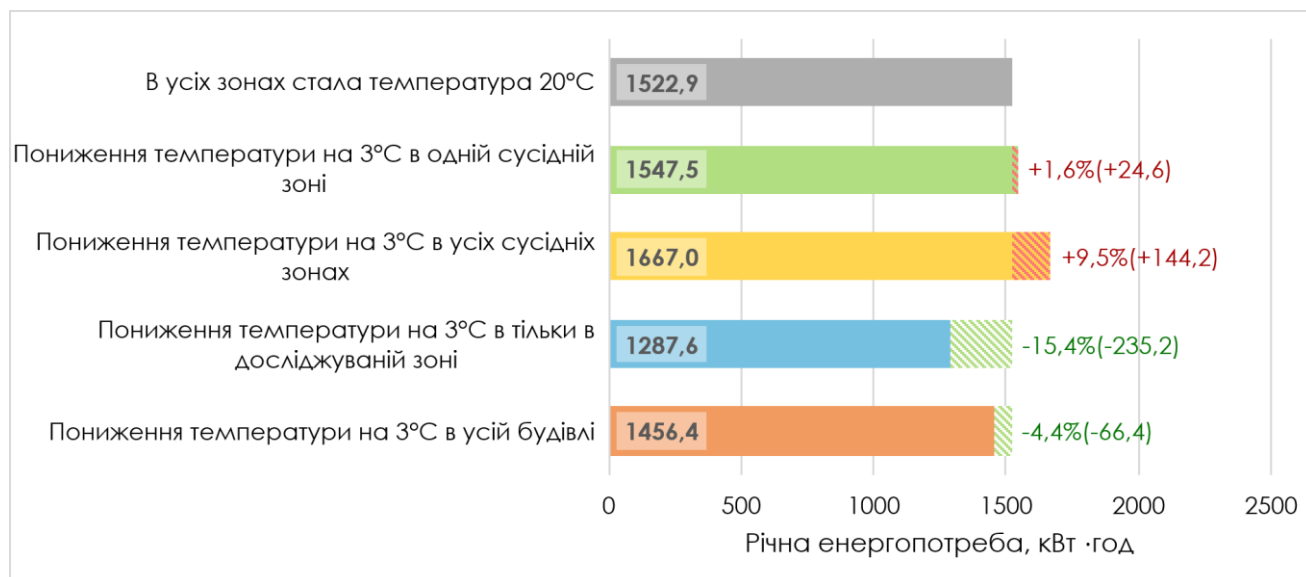


Рисунок 4.3 – Річна енергопотреба на опалення для динамічної моделі до термомодернізації

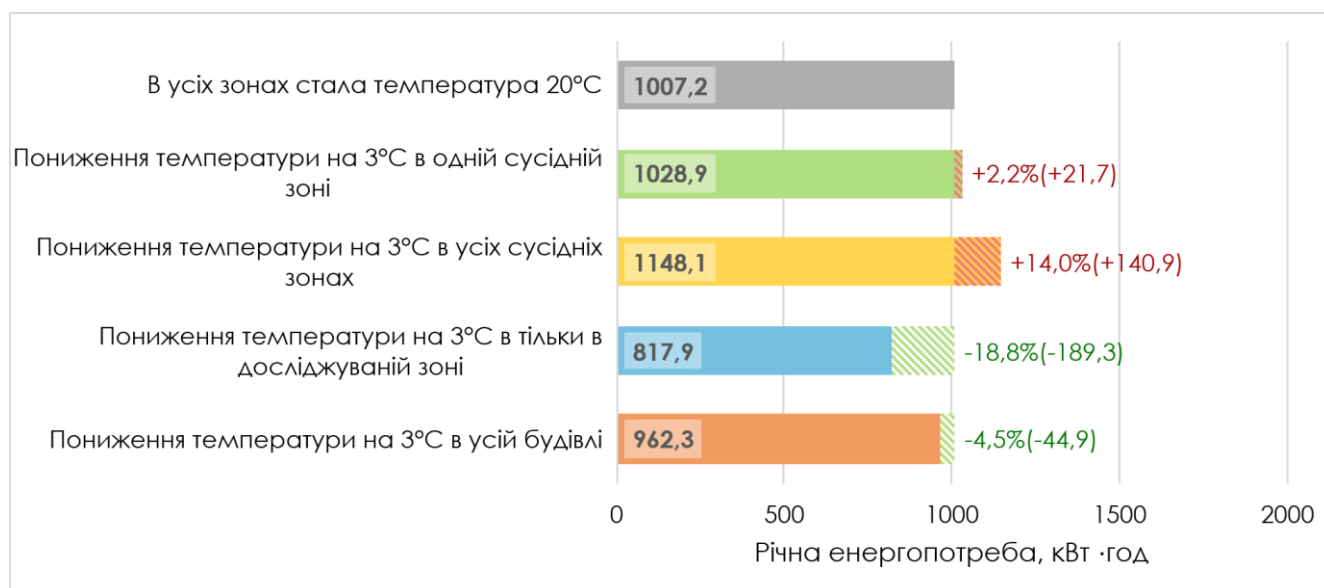


Рисунок 4.4 – Річна енергопотреба на опалення для динамічної моделі після термомодернізації

Цікавим і показовим є також інше спостереження. Якщо порівняти різницю між енергопотребою на опалення до і після термомодернізації для сценаріїв пониження температури в одній і усіх сусідніх зонах, то виявляється, що абсолютне збільшення енергопотреби у стаціонарній моделі однакове – 106,7 кВт·год і 551,9 кВт·год відповідно (рисунок 4.1 і 4.2).

З погляду фізики це виглядає нелогічно: утеплена будівля має значно менші втрати тепла, а отже, і потенціал для міжзонального перетоку повинен бути меншим. Проте стаціонарна модель не оновлює розрахунок теплопередачі між зонами у відповідності до змінених теплових параметрів стін, а застосовує фіксовані коефіцієнти, без урахування реальних умов функціонування будівлі. У динамічній моделі (рисунк 4.3 та 4.4) такої аномалії не спостерігається: зростання енергопотребі при пониженні в одній суміжній зоні зменшується після термомодернізації на 11,8% або з 24,6 кВт·год до 21,7 кВт·год в абсолютному вираженні. У сценарії з пониженням в усіх суміжних зонах – на 2,3% або з 144,2 кВт·год до 140,9 кВт·год абсолютному вираженні.

У динамічному моделюванні теплові потоки враховуються з урахуванням теплової інерційності огорожень та реального перебігу теплопередачі в часі. Коли зовнішні огороження (стіни, вікна) проходять термомодернізацію, вони значно зменшують загальні тепловтрати приміщення назовні, і внаслідок цього тепловий дисбаланс між приміщеннями також зменшується. Інакше кажучи: до модернізації частина тепла з внутрішнього приміщення активно втрачалася через зовнішні стіни. Якщо ж суміжні зони мали нижчу температуру, це стимулювало додатковий потік тепла через спільні внутрішні стіни. Після термомодернізації більша частина тепла затримується всередині приміщення, і тепловий потік у напрямку до охолодженого сусіда стає меншим.

Крім того, утеплені стіни мають вищу теплоємність і більшу затримку теплового потоку, що згладжує температурні коливання між приміщеннями та додатково зменшує міжзональні теплопередачі. Таким чином, вплив пониження температури у сусідніх приміщеннях у динамічній моделі стає менш відчутним після термомодернізації, тоді як у стаціонарному підході цей ефект залишається лінійним і не залежить від попередніх теплових накопичень.

Це ще раз підкреслює слабку адаптивність стаціонарного підходу до змін у тепловій оболонці будівлі та його обмежену придатність для моделювання сценаріїв з температурними варіаціями.

4.1.2 Оцінка впливу денного пониження температури на енергоспоживання будівлі

У межах динамічного аналізу було змодельовано сценарій зниження температури в досліджуваному приміщенні на 3 °C у денний період доби. Такий режим регулювання є типовим для ситуацій, коли протягом дня приміщення частково або повністю не використовується, наприклад, мешканці перебувають на роботі чи навчанні.

Пониження температури було реалізовано з 08:00 до 18:00, тобто в інтервалі, який відповідає найбільш ймовірній відсутності користувачів у житлових приміщеннях. Базова температура підтримувалася на рівні 20 °C, а у межах періоду зниження вона зменшувалася до 17 °C.

Цей режим ґрунтується на загальновизнаних принципах енергоефективної експлуатації ОВК-систем, що передбачають тимчасове зниження температури в приміщеннях з обмеженим перебуванням людей. Такий підхід дозволяє скоротити питомі витрати енергії за умови, що температурний режим буде своєчасно відновлено до моменту повернення користувачів, забезпечуючи комфортні умови перебування.

Таким чином, аналіз дає змогу не лише оцінити річну енергопотребу, а й вивчити динаміку навантаження протягом доби, щоб виявити потенційні ризики перетопів або недогріву, а також визначити вплив сонячного та внутрішнього теплонадходження в період зниження споживання.

Оцінка впливу денного пониження температури внутрішнього повітря на річне енергоспоживання

Для оцінки ефективності застосування графіків пониження температури у денний період було змодельовано варіанти будівлі з різною товщиною зовнішніх стін: 0,25 м, 0,51 м, 0,77 м та 0,51 м після термомодернізації. На рисунках 4.5 та 4.6 наведено результати річного споживання енергії для опалення при постійній

температурі 20 °С і при застосуванні пониження до 17 °С у період з 8:00 до 18:00 для південної та північної орієнтацій відповідно.

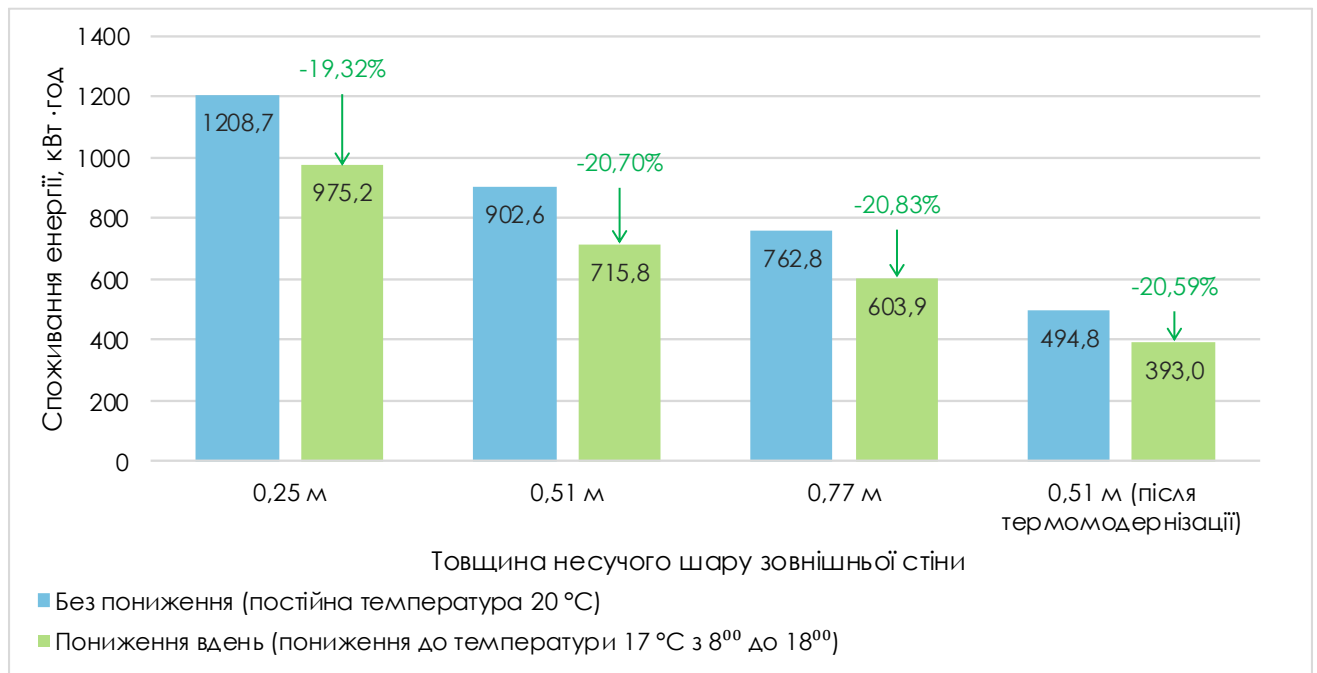


Рисунок 4.5 – Споживання енергії на опалення для різних варіантів зовнішніх огорожувальних конструкцій з пониженням температури внутрішнього повітря вдень для Пд орієнтації

Для південної орієнтації видно, що застосування пониження температури вдень дозволяє досягти суттєвої економії у всіх випадках. Відсоток економії коливається від 19,32% до 20,83%.

Спостерігається слабка тенденція: при більшій масивності зовнішніх стін відсоток економії енергії трохи зростає. Це пояснюється підвищенням термічного опору конструкції зовнішньої стіни, що дозволяє краще утримувати тепло в умовах змінної температури внутрішнього повітря.

Однак після термомодернізації економія дещо зменшується у відносному вираженні. Це пов'язано із зменшенням сонячних теплонадходжень через встановлення енергоефективних вікон із низьким коефіцієнтом пропускання сонячної радіації, що зменшує ефект накопичення додаткового тепла вдень.

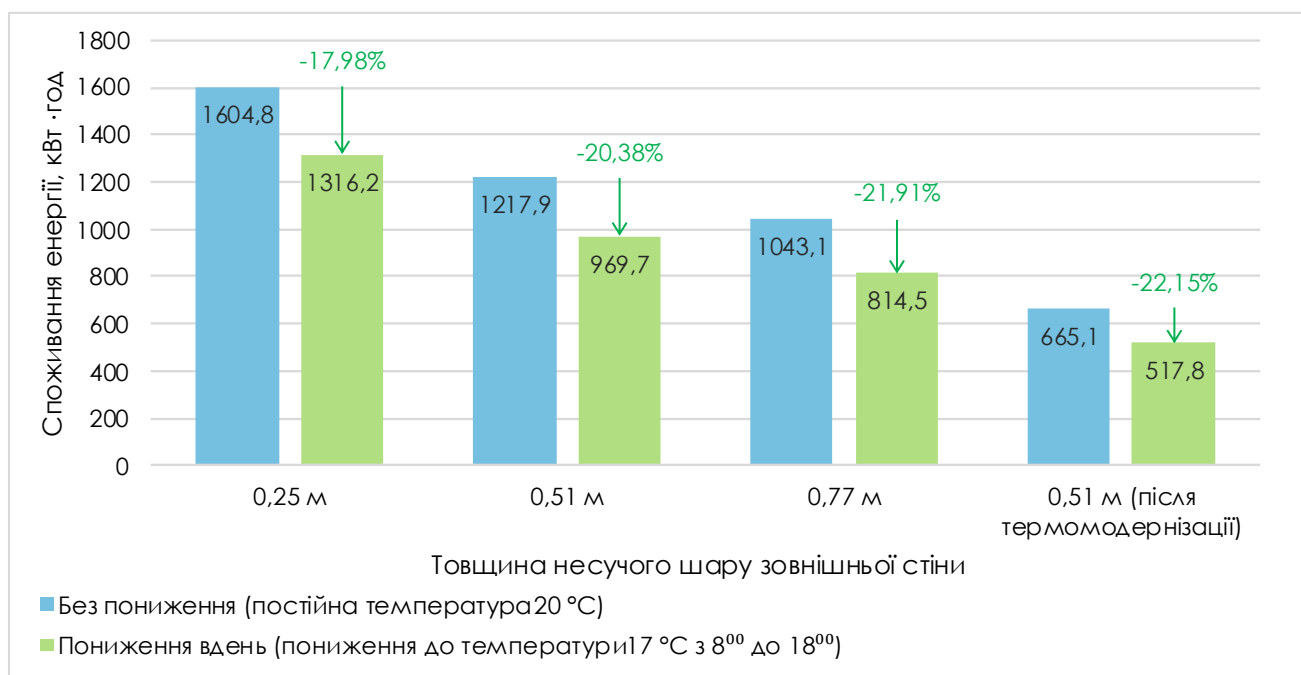


Рисунок 4.6 – Споживання енергії на опалення для різних варіантів зовнішніх огорожувальних конструкцій з пониженням температури внутрішнього повітря вдень для Пн орієнтації

Для північної орієнтації відсоток економії варіюється в діапазоні від 17,98% до 22,15%, але в середньому теж становить близько 20%. Так само, як і для південної орієнтації, можна підтвердити, що більша масивність зовнішніх стін, через вищий термічний опір огорожувальних конструкцій, призводить до збільшення відсоткової економії енергії, хоч й незначної. Це пояснюється меншими тепловтратами під час фазових коливань внутрішньої температури.

Однак, на північній орієнтації різниця між варіантами різної масивності є набагато помітнішою, ніж на південній стороні. Причина полягає у відсутності значних сонячних надходжень на північному фасаді: будівля практично повністю залежить від теплових характеристик огорожувальних конструкцій. Відповідно, у разі відсутності підживлення сонячною енергією, різниця у здатності акумулювати й утримувати тепло між стінами з меншою та більшою масивністю проявляється сильніше.

Після термомодернізації ефект енергозбереження стає найбільшим серед усіх варіантів (22,15%). Це пояснюється тим, що:

- Через низькі сонячні теплонадходження для північної орієнтації роль системи опалення у забезпеченні загального теплового балансу суттєво зростає;
- Термо модернізовані конструкції ефективніше зменшують інтенсивність теплового потоку назовні, мінімізуючи тепловтрати при пониженні температури.

Після оцінки впливу масивності зовнішніх стін на ефективність денного пониження температури, окрему увагу приділено впливу масивності внутрішніх стін. Зміна термічної інерції внутрішніх огорожень може істотно впливати на акумуляцію тепла в будівлі, а отже, і на результати енергоспоживання при змінних режимах роботи системи опалення.

Для порівняння споживання енергії було створено ряд моделей, що враховують постійний температурний режим на рівні 20 °C та режим із денним зниженням температури на 3 °C. Розглядалися варіанти будівель із різною товщиною внутрішніх стін: 0,125 м, 0,255 м та 0,385 м, як до, так і після термо модернізації. Аналіз проведено окремо для будівель із південною та північною орієнтацією.

Як було показано розділі 3.2 при сталому режимі опалення вплив масивності внутрішніх стін на річне споживання енергії на опалення є менш значним, ніж зовнішніх огорожень. Це пояснюється тим, що за умов постійної температури внутрішні огороження не змінюють суттєво характер теплових процесів, тобто накопичене тепло не має чітких періодів віддачі, і тепловий баланс залишається відносно стабільним. Однак із впровадженням змінних режимів температури повітря в будівлі, зокрема пониження її вдень, характер взаємодії між конструктивними елементами змінюється, і термічна інерційність внутрішніх стін починає відігравати помітнішу роль.

На рисунках 4.7 та 4.8 наведено результати дослідження впливу товщини внутрішніх стін на ефективність стратегії пониження температури внутрішнього повітря вдень для південної та північної орієнтацій відповідно. Застосовувалося

добове пониження температури внутрішнього повітря з 20 °C до 17 °C у період з 8:00 до 18:00.

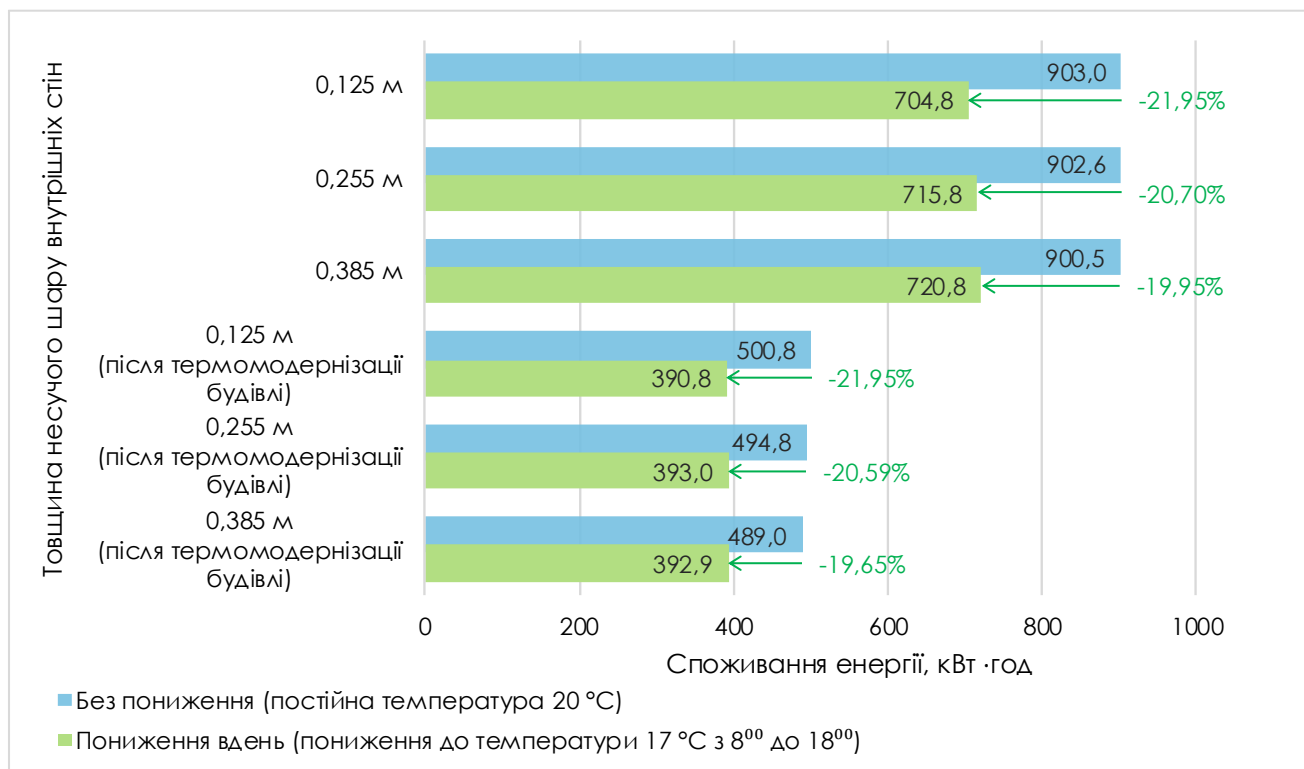


Рисунок 4.7 – Споживання енергії на опалення для різних варіантів внутрішніх та зовнішніх огорожувальних конструкцій з пониженням температури внутрішнього повітря вдень для Пд орієнтації

Аналіз результатів підтверджує, що у всіх варіантах пониження температури призводить до істотного зменшення споживання енергії на опалення – в середньому на 20-22%. Проте зі збільшенням масивності внутрішніх стін ефективність такої стратегії поступово знижується. Для південної орієнтації, де спостерігається значний вплив сонячних теплонадходжень, найбільша економія енергії досягається у варіанті з більш легкими внутрішніми стінами товщиною 0,125 м (21,95%). Збільшення масивності до 0,385 м призводить до зниження ефекту до 19,95% економії. Тобто, більш інерційні внутрішні стіни зменшують амплітуду добових коливань температури повітря, що водночас зменшує і ефект енергозбереження від тимчасового пониження температури.

Після термомодернізації зовнішніх огорожень (утеплення стін, заміна вікон) закономірності залишаються подібними, як до термомодернізації, однак абсолютні значення енергоспоживання суттєво нижчі. Крім того, частково посилюється роль внутрішніх стін як акумулюючих мас, оскільки завдяки покращеній оболонці більше тепла зберігається всередині приміщення.

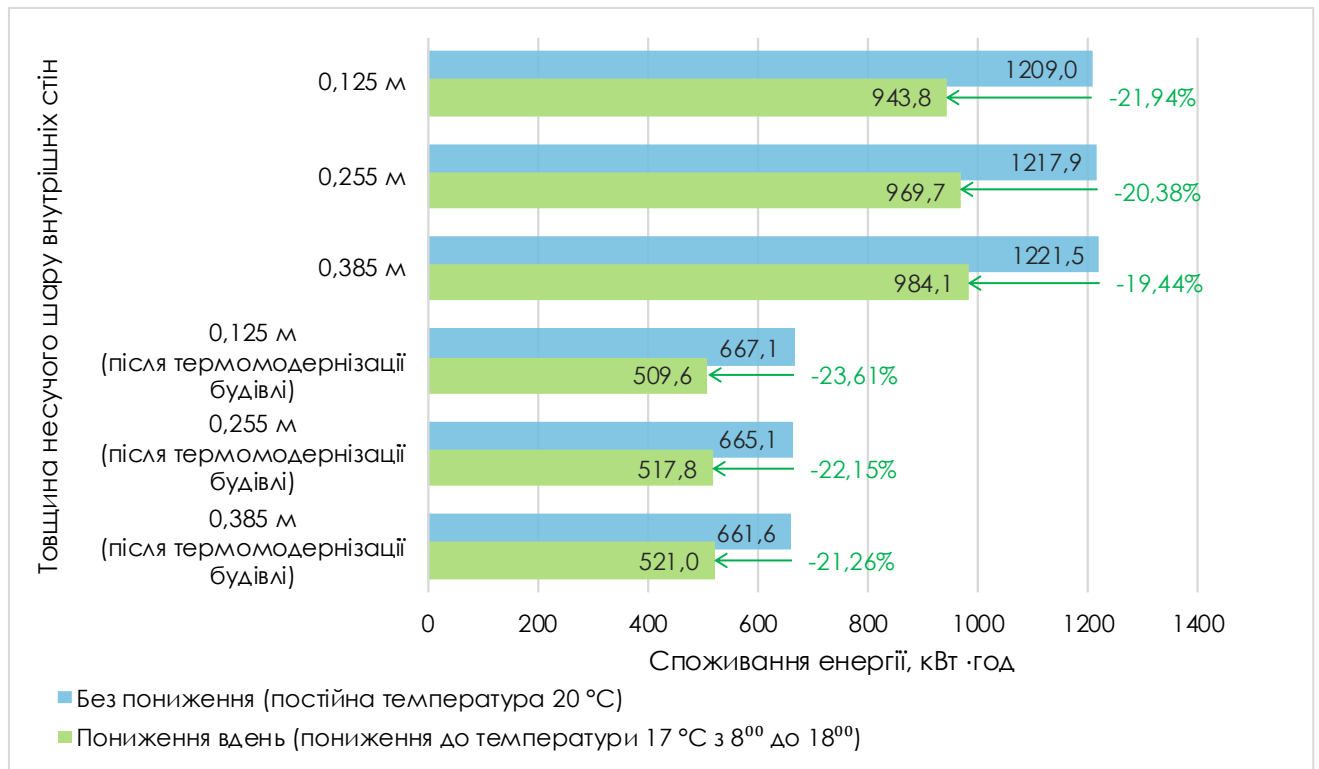


Рисунок 4.8 – Споживання енергії на опалення для різних варіантів внутрішніх та зовнішніх огорожувальних конструкцій з пониженням температури внутрішнього повітря вдень для Пн орієнтації

Для північної орієнтації (рисунок 4.8), де надходження сонячного тепла обмежені, вплив масивності внутрішніх стін є дещо більш помітним, особливо у варіантах без термомодернізації – зменшення ефекту від пониження температури зменшується з 21,94% до 19,44% для будівель з товщиною внутрішніх стін 0,125 м і 0,385 м відповідно. Утім, загальна тенденція аналогічна: чим більша маса внутрішніх стін, тим менш помітною є енергетична вигода від переривчастого режиму опалення. Це підтверджує, що інерційні властивості конструкцій, які за

сталих умов мають мінімальний ефект, стають більш вагомими у випадках змінного теплового навантаження.

Таким чином, впровадження денного пониження температури виявляється особливо ефективним у будівлях із більш легкою внутрішньою конструкцією, тоді як у більш масивних будівлях ефект пом'якшується через триваліший час реакції на зміну теплових умов. Це є важливим фактором при розробці енергетичних стратегій для різних типів будівель у практиці проєктування та модернізації.

Для більш глибокого аналізу сезонної динаміки ефективності стратегії денного пониження температури виконано деталізацію енергоспоживання на опалення в помісячному розрізі. Це дозволяє оцінити, як змінюється вплив стратегії залежно від температури зовнішнього повітря та сонячного випромінювання. Особливу увагу було приділено сценаріям для північної орієнтації з типовою комбінацією товщини зовнішньої стіни 0,51 м та внутрішніх стін 0,255 м до термомодернізації (рисунок 4.9) і після (рисунок 4.10).

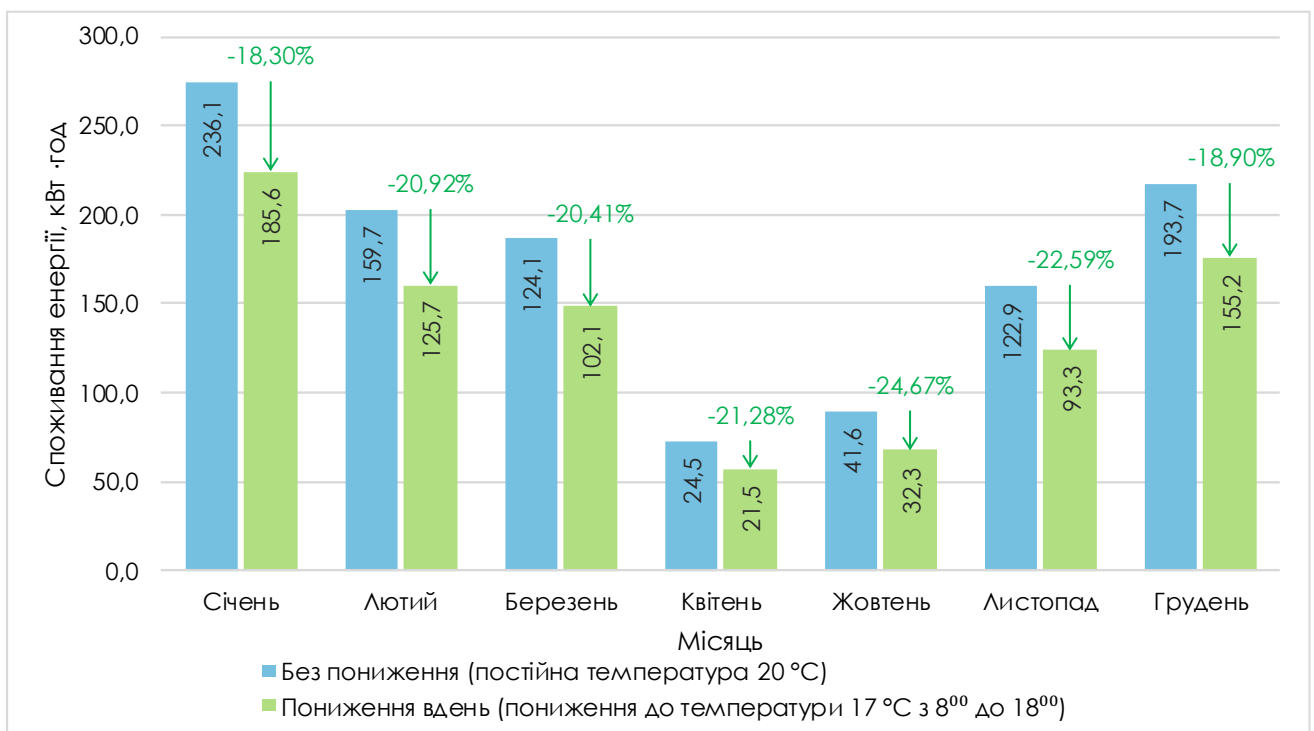


Рисунок 4.9 – Споживання енергії на опалення з пониженням температури внутрішнього повітря вдень для Пн орієнтації до термомодернізації (несуча конструкція зовнішньої стіни: 0,51 м, внутрішні стіни: 0,255 м)

У всіх місяцях опалювального періоду спостерігається суттєве зменшення енергоспоживання внаслідок впровадження денного зниження температури. Ефект економії є досить стабільним у базовому сценарії до термомодернізації, змінюючись у межах від -18% до -25%.

- У січні та грудні економія становить близько 19%;
- У лютому, березні, квітні 21%;
- У жовтні та листопаді спостерігаються максимальні значення економії: 24,7% та 22,6% відповідно, що пов'язано зі зростаючою роллю денних теплонадходжень та меншою тривалістю нічного періоду.

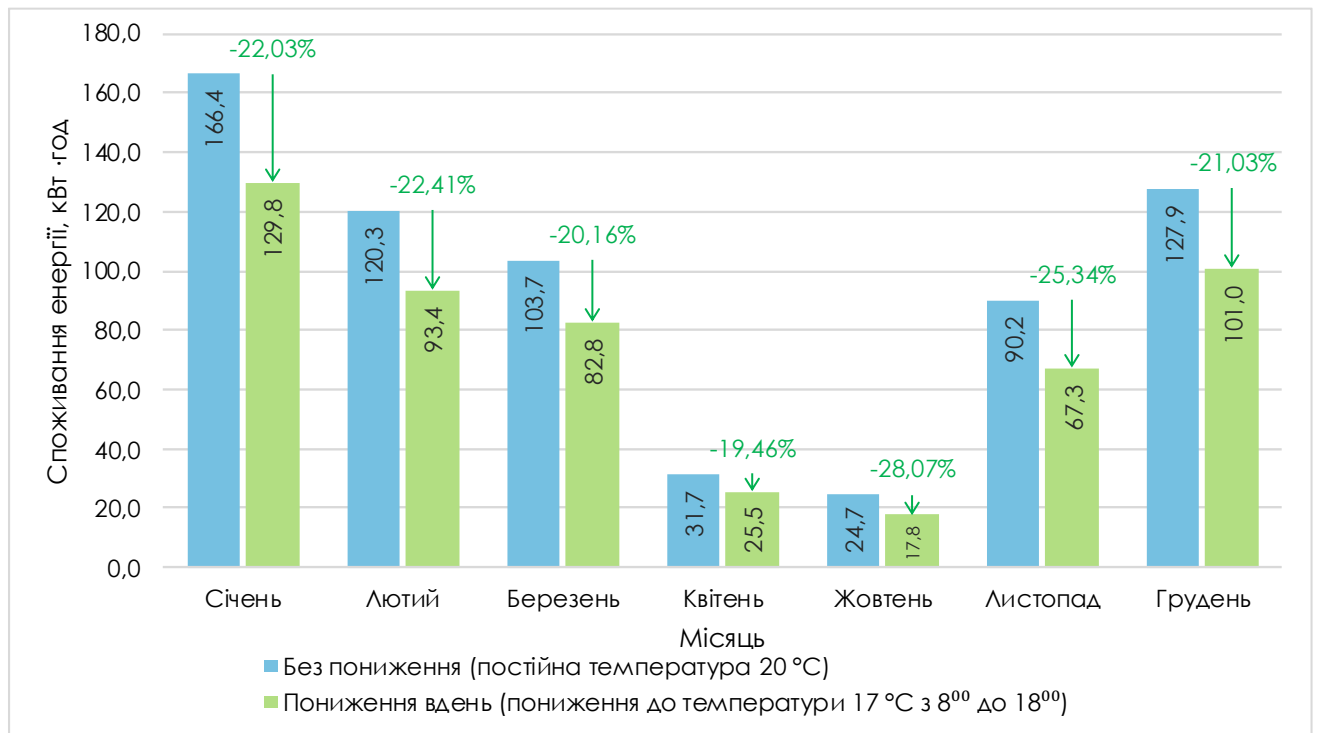


Рисунок 4.10 – Споживання енергії на опалення з пониженням температури внутрішнього повітря вдень для Пн орієнтації після термомодернізації (несуча конструкція зовнішньої стіни: 0,51 м, внутрішні стіни: 0,255 м)

Після термомодернізації (рисунок 4.10) картина в цілому зберігається, однак економія дещо зростає у перехідні місяці, наприклад:

- Жовтень: 28,1%;
- Листопад: 25,3%.

Такий ефект пов'язаний із поліпшенням теплоізоляційних характеристик конструкцій, що дозволяє довше зберігати тепло в години пониження.

У той самий час, в умовах термомодернізації втрачається частина сонячних теплонадходжень (особливо в південних приміщеннях), однак для північної орієнтації цей ефект майже відсутній, тому загальний відсоток економії зберігається або навіть покращується.

Отримані результати демонструють високу ефективність пониження температури вдень для північної орієнтації протягом усього опалювального періоду. Найвищий потенціал економії спостерігається у міжсезоння, коли будівля прогрівається вдень за рахунок зниженого теплового навантаження і меншої температурної різниці.

Динаміка теплового навантаження при денному пониженні температури

Хоч загальне енергоспоживання є ключовим показником енергоефективності, однак для оцінки динамічної поведінки будівлі та роботи інженерних систем важливо також враховувати навантаження на систему опалення у погодинному розрізі. Саме величина теплового навантаження впродовж доби визначає реальну потребу в потужності джерела тепла, гнучкість управління кліматом, а також рівень комфорту користувачів.

Пониження температури вдень є одним із найбільш поширених способів регулювання систем опалення, зокрема у житлових і адміністративних будівлях. У розділі 4.1.2 було показано, що таке регулювання суттєво знижує річне енергоспоживання. Однак воно також впливає на характер змін навантаження протягом доби, що є критично важливим у реальних умовах експлуатації, де теплові потоки змінюються внаслідок як зовнішніх, так і внутрішніх факторів (сонячна радіація, інфільтрація, теплоаккумуляція конструкцій тощо).

Рисунок 4.11 демонструє динаміку навантаження на систему опалення для двох орієнтацій (південна та північна) впродовж двох холодних зимових тижнів. У розрахунках змінюється товщина зовнішніх стін, що дозволяє простежити, яким

чином масивність огорожувальних конструкцій впливає на амплітуду добових коливань та тривалість перехідних процесів після ввімкнення чи вимкнення обігріву.

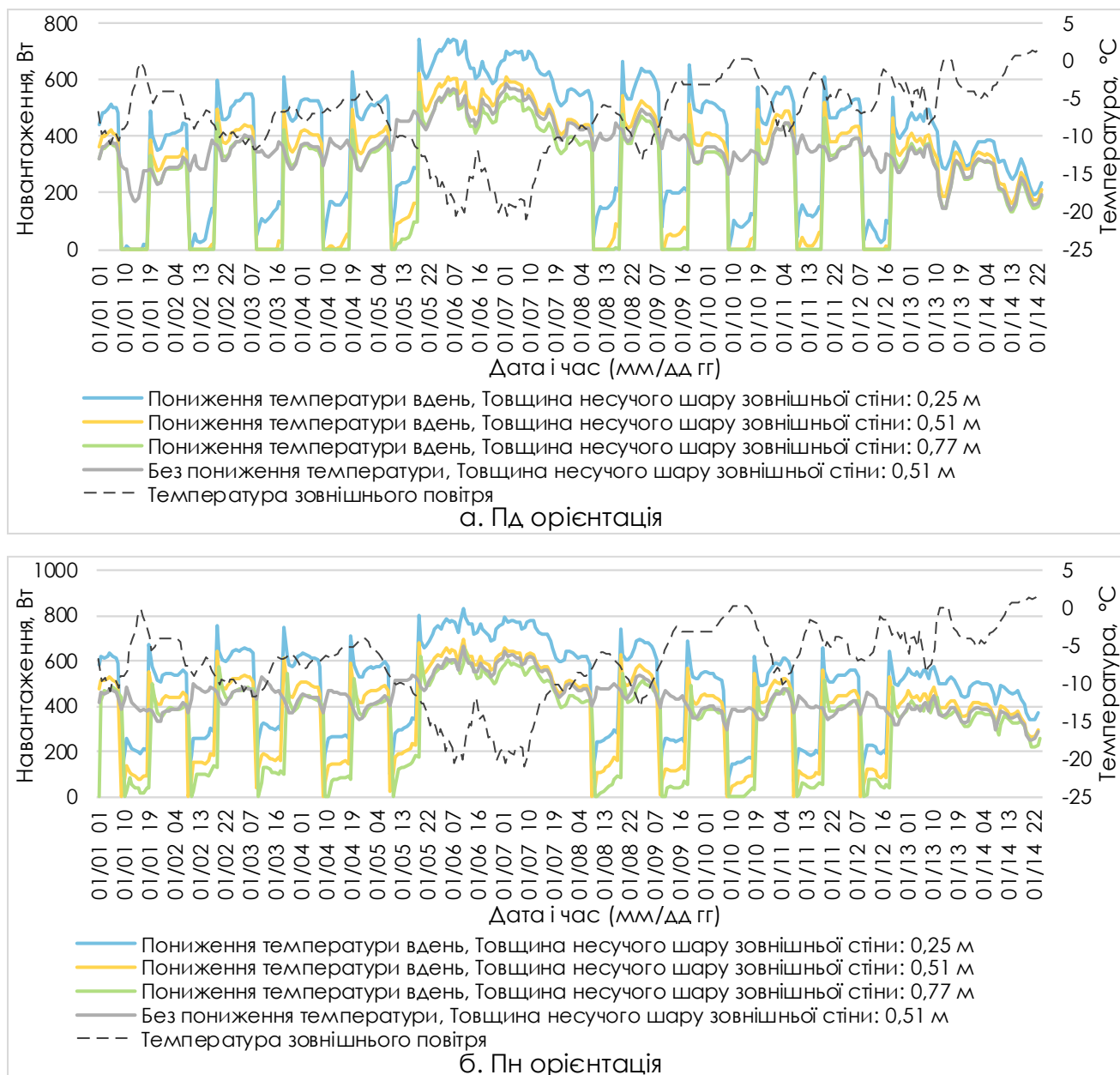


Рисунок 4.11 – Навантаження на систему опалення з пониженням температури внутрішнього повітря вдень: а. Південна орієнтація зовнішніх стін; б. Північна орієнтація зовнішніх стін. (до термомодернізації, внутрішні стіни: 0,255 м)

На рисунку 4.11 зображено навантаження на систему опалення впродовж двох тижнів січня для випадків із пониженням температури вдень (від 08:00 до 18:00) та без нього. На прикладі південної (рисунок 4.11а) та північної

(рисунок 4.11б) орієнтацій аналізуються результати для трьох варіантів зовнішніх стін: 0,25 м, 0,51 м та 0,77 м (без термомодернізації), а також базовий сценарій із постійною температурою 20 °С.

У денні години, коли відбувається пониження температури внутрішнього повітря, навантаження на систему опалення суттєво знижується. Найнижчі значення спостерігаються для найбільш масивних стін (0,77 м), що пояснюється вищою теплоємністю конструкцій, здатних акумулювати тепло та віддавати його в періоди відключень, зменшуючи потребу в активному обігріві.

У вечірній період після 18:00, коли температура у приміщенні знову підвищується до 20 °С, спостерігається різкий пік навантаження. Найбільш виражений пік спостерігається в легких конструкціях (0,25 м), оскільки теплова інерційність огорожувальних конструкцій є низькою, і вся потреба в теплі миттєво перекладається на систему опалення. Навпаки, у випадку з масивними стінами (0,77 м) інерційність сприяє пом'якшенню пікових навантажень, що позитивно впливає на стабільність роботи системи.

Цей ефект особливо яскраво проявляється у випадку південної орієнтації (рисунок 4.11а), де додатково діє вплив сонячних теплонадходжень. Протягом ясних днів денне навантаження фактично знижується до мінімуму завдяки комбінації зниженої температури та сонячного опромінення, що поглинається масивними стінами. Увечері, завдяки теплоаккумуляції, приріст навантаження також приглушується.

У північній орієнтації (рисунок 4.11б), де сонячні надходження суттєво менші, ефект пом'якшення піків залишається, але менш виражений. Різниця між варіантами товщини стін залишається значущою, що свідчить про ключову роль теплоаккумуляції саме в компенсації теплових коливань, незалежно від джерела енергії.

Таким чином, пониження температури вдень дозволяє ефективно зменшити середнє добове навантаження, однак призводить до формування високих піків у вечірні години, які вимагають ретельного врахування при проєктуванні теплогенераторів (збільшення запасу потужності). Масивні конструкції, у свою

чергу, демонструють перевагу в зниженні пікових значень, що є особливо важливим для забезпечення надійності системи опалення в умовах динамічного навантаження.

Для глибшого розуміння змін у структурі теплового балансу під впливом денної стратегії зниження температури виконано порівняльну візуалізацію розподілу теплових потоків представлено на прикладі одного місяця (січня). Такий підхід дозволяє наочно оцінити внесок окремих джерел тепла та напрямків втрат, а також відстежити вплив термомодернізації та температурного режиму на загальну енергетичну поведінку будівлі.

Усі варіанти відображають характерну зміну добових навантажень від опалення, інсоляції, побутових приладів, людей, а також втрати через огородження та інфільтрацію. Зі збільшенням масивності зовнішніх стін і після термомодернізації помітно зменшується амплітуда теплових коливань, що свідчить про ефективніше накопичення та утримання тепла. Водночас денне зниження температури дозволяє зменшити пікові навантаження на систему опалення, знижуючи її частку в тепловому балансі.

Візуальне порівняння теплового балансу у чотирьох моделях (рисунок 4.12) дозволяє простежити, як змінюється структура теплових потоків залежно від режиму експлуатації та теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій.

У сценарії *a* (без пониження температури, товщина зовнішніх стін 0,25 м) спостерігається домінування теплових надходжень від системи опалення, що компенсує значні втрати через зовнішні стіни, вікна та інфільтрацію. Через низьку теплоємність огорожень температурний баланс є нестабільним, з вираженими піками споживання тепла у нічні години, коли температура зовнішнього повітря мінімальна.

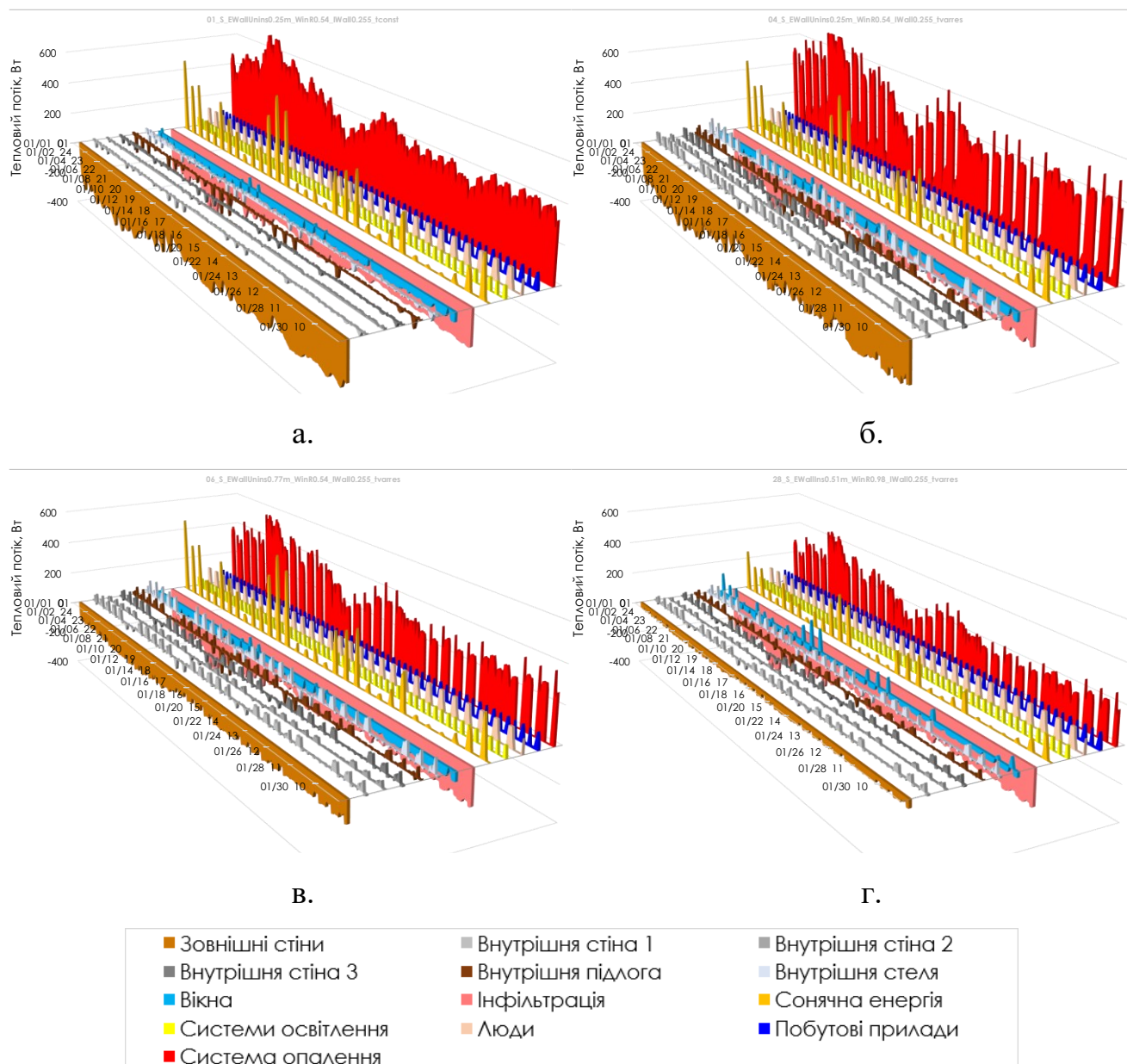


Рисунок 4.12 – Тепловий баланс репрезентативної кімнати в місячному розрізі:

- Без пониження внутрішньої температури повітря, товщина несучого шару конструкції зовнішньої стіни: 0,25 м, до термомодернізації
- Пониження внутрішньої температури повітря вдень, товщина несучого шару конструкції зовнішньої стіни: 0,25 м, до термомодернізації
- Пониження внутрішньої температури повітря вдень, товщина несучого шару конструкції зовнішньої стіни: 0,77 м, до термомодернізації
- Пониження внутрішньої температури повітря вдень, товщина несучого шару конструкції зовнішньої стіни: 0,51 м, після термомодернізації

У сценарії б (денне зниження температури, ті ж конструктивні характеристики) можна помітити зменшення теплового навантаження на систему опалення в денні години. Це досягається за рахунок зниження цільової температури внутрішнього повітря в контрольованих приміщеннях, що зменшує тепловий градієнт і, відповідно, втрати. Водночас у нічні години відновлюється робота системи опалення, що частково компенсується накопиченим теплом від денного нагріву під впливом сонячних теплонадходжень поглинутих внутрішніми поверхнями.

У сценарії в (денне зниження, товщина зовнішніх стін збільшена до 0,77 м) структура теплового балансу змінюється суттєвіше. Зростає частка накопичуваного тепла в масивних огороженнях, що проявляється у згладжуванні добових коливань. Інтенсивність опалення в нічні години знижується завдяки віддачі акумульованого тепла. Це свідчить про позитивний ефект збільшення теплової інерційності будівлі.

У сценарії г (денне зниження, термомодернізовані огороження 0,51 м) демонструє найбільш збалансований тепловий режим. Теплові втрати через зовнішні стіни зменшено за рахунок підвищеного опору теплопередачі, а теплова інерція системи забезпечує більш плавний добовий профіль. Навантаження на систему опалення рівномірно розподілене, а її частка у загальному балансі зменшена завдяки підвищеній ефективності утримання внутрішнього тепла.

Загалом, результати візуального аналізу підтверджують ефективність поєднання денної стратегії зниження температури та заходів термомодернізації. Їх спільна реалізація дозволяє не лише зменшити обсяги споживаної енергії, але й покращити теплоенергетичні параметри будівлі, забезпечуючи комфорт за менших витрат.

4.1.3 Оцінка впливу нічного пониження температури внутрішнього повітря на енергоспоживання будівлі

Однією з поширених стратегій енергоефективного регулювання кліматичних умов у будівлях є нічне пониження температури. Цей підхід передбачає

автоматичне зниження температури внутрішнього повітря в приміщеннях у нічний період, коли комфортні умови не є критичними через відсутність активного користування простором – більшість мешканців відпочивають, а фізична активність і теплове навантаження є зниженими. Водночас, людський організм менш чутливий до зниження температури під час сну, тому пониження на 2-3 °C практично не впливає на комфорт, але дозволяє досягти суттєвого зменшення енерговитрат.

Нічне пониження передбачає зменшення заданої температури з 20 °C до 17 °C у період з 22:00 до 08:00. Крім того, такий інтервал є характерним для комерційних приміщень, де нічне пониження виконує роль енергозберігаючого базового режиму.

Особливу увагу доцільно приділити також гібридному характеру використання простору. Наприклад, квартира може бути суміжною з комерційним приміщенням, або навіть бути переобладнаною у нежитловий фонд (студію, офіс, салон, майстерню), в яких нічне пониження є стандартною експлуатаційною практикою. Відповідно, дослідження ефективності таких режимів є актуальним не лише для житлових будівель, а й у випадках змішаного або адаптивного використання простору.

Нічний період доби також характеризується найнижчими температурами зовнішнього повітря, що зумовлює найбільші втрати тепла крізь огорожувальні конструкції. Водночас зниження внутрішньої температури навіть на кілька градусів дозволяє суттєво скоротити перепад температур між зовнішнім та внутрішнім повітрям і, як наслідок, тепловтрати. Оскільки більшість користувачів будівлі у цей період перебувають у стані відпочинку, зниження температури майже не впливає на тепловий комфорт, особливо за наявності побутових текстильних елементів (ковдр, килимів, тощо) та відповідного одягу для сну.

У даному підрозділі проводиться оцінка ефективності нічного пониження температури на прикладі низки моделей з різними параметрами масивності огорожувальних конструкцій, термомодернізаційного стану та орієнтації приміщення. Це дозволяє врахувати теплоінерційність огорожень та обґрунтувати

доцільність використання нічного пониження в різних умовах експлуатації будівель.

Отже, логіка впровадження нічного пониження базується на трьох ключових принципах:

1. *Фізіологічні та поведінкові особливості споживачів:* численні дослідження доводять, що для сну оптимальною є температура повітря на 1-3 °C нижча, ніж для активного перебування в приміщенні. Це створює простір для зниження температури без шкоди для комфорту.
2. *Зниження теплових втрат у період найнижчих зовнішніх температур:* хоча зменшення внутрішньої температури вночі здається контрінтуїтивним, воно може суттєво знизити загальні тепловтрати через огорожувальні конструкції.
3. *Зменшення навантаження на систему опалення у найкритичніші періоди:* нічні години часто є найхолоднішими в добі, тож зменшення потреби в теплі саме в цей час може мати вагомий системний ефект для енергоспоживання та надійності постачання.

Таким чином, оцінка режиму нічного пониження температури дає змогу глибше зрозуміти поведінку будівельної теплової інерції, а також оптимізувати режим роботи системи опалення, особливо у випадках обмежених енергоресурсів, нестабільного теплопостачання або підвищених вимог до економії.

Для дослідження ефективності нічного пониження температури було змодельовано ряд варіантів із різною масивністю зовнішніх стін, як до, так і після термомодернізації, для південної і північної орієнтацій. Кожен із варіантів порівнюється з варіантом зі сталою температурою повітря в приміщеннях 20 °C, а також із результатами денного пониження (розглянутими раніше) для формування повної картини впливу часу реалізації пониженого режиму. Особливу увагу приділено глибокому порівнянню динаміки економії енергії та її залежності від геометричних параметрів огорожувальних конструкцій.

Для південної орієнтації (рисунок 4.13) нічне пониження температури забезпечує додаткову економію енергії порівняно з денним для всіх типів стін.

Найвища економія спостерігається для варіанту з масивною зовнішньою стіною 0,77 м – 23,3%, що на 2,5% перевищує денне пониження (20,8%). Загалом, при збільшенні масивності стін енергоощадний ефект посилюється. Це пов'язано з вищою тепловою інерцією, яка дозволяє будівлі довше утримувати накопичене тепло протягом ночі.

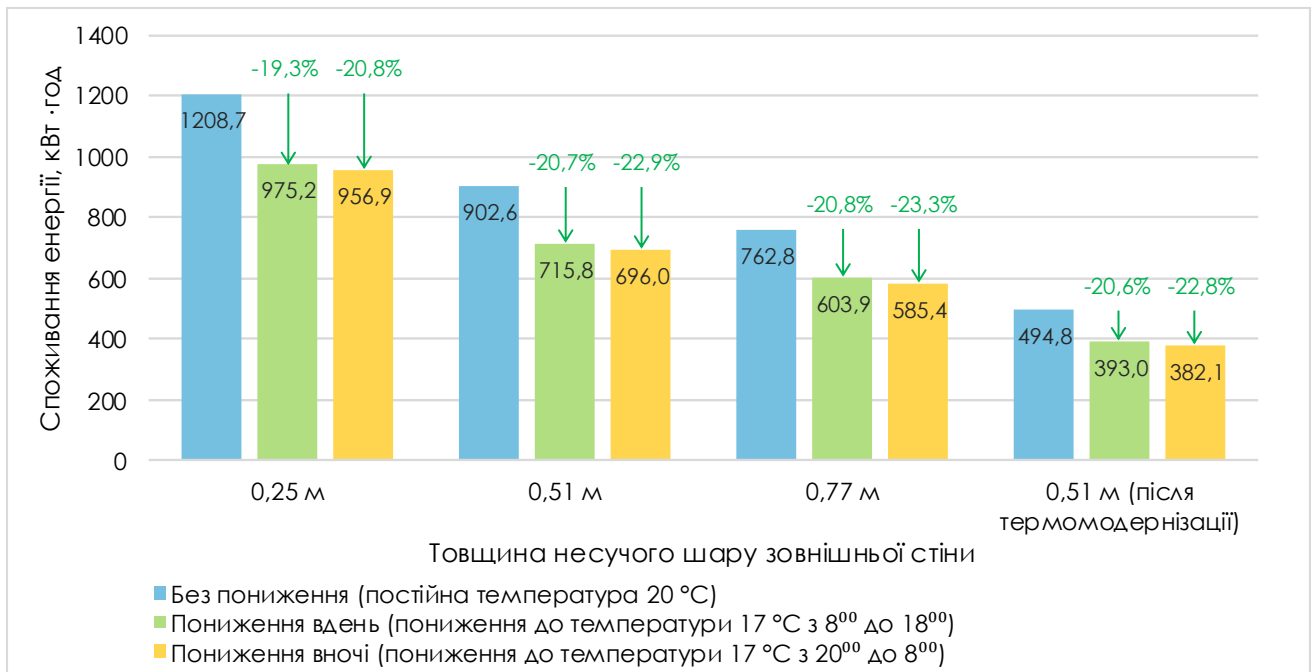


Рисунок 4.13 – Споживання енергії на опалення для різних варіантів зовнішніх огорожувальних конструкцій з пониженням температури внутрішнього повітря вночі для Пд орієнтації

Після термомодернізації для стіни масивністю 0,51 м ефект нічного пониження зберігається на високому рівні – 22,8%, що на 2,2% перевищує економію від денного пониження. Водночас відсоткове зменшення споживання в результаті нічного пониження є нижчим, ніж для неутеплених конструкцій, де показники сягають до 23,3%. Це пояснюється тим, що після термомодернізації зменшується загальний рівень тепловтрат через огорожувальні конструкції, відповідно знижується абсолютна кількість енергії, яку можна заощадити за рахунок зниження температури в окремі періоди доби. Крім того, більш ефективна теплова ізоляція уповільнює зміну температури повітря в приміщенні, згладжуючи

ефект від короткотривалих температурних коливань, і, відповідно, зменшуючи вплив змінних режимів на загальне енергоспоживання.

На відміну від південної орієнтації, де сонячні теплонадходження суттєво впливають на енергетичний баланс протягом дня, північна орієнтація (рис 4.14) практично позбавлена інсоляції. Це зумовлює відсутність додаткового пасивного нагріву в денний період, що, своєю чергою, вирівнює ефективність денного і нічного пониження температури.

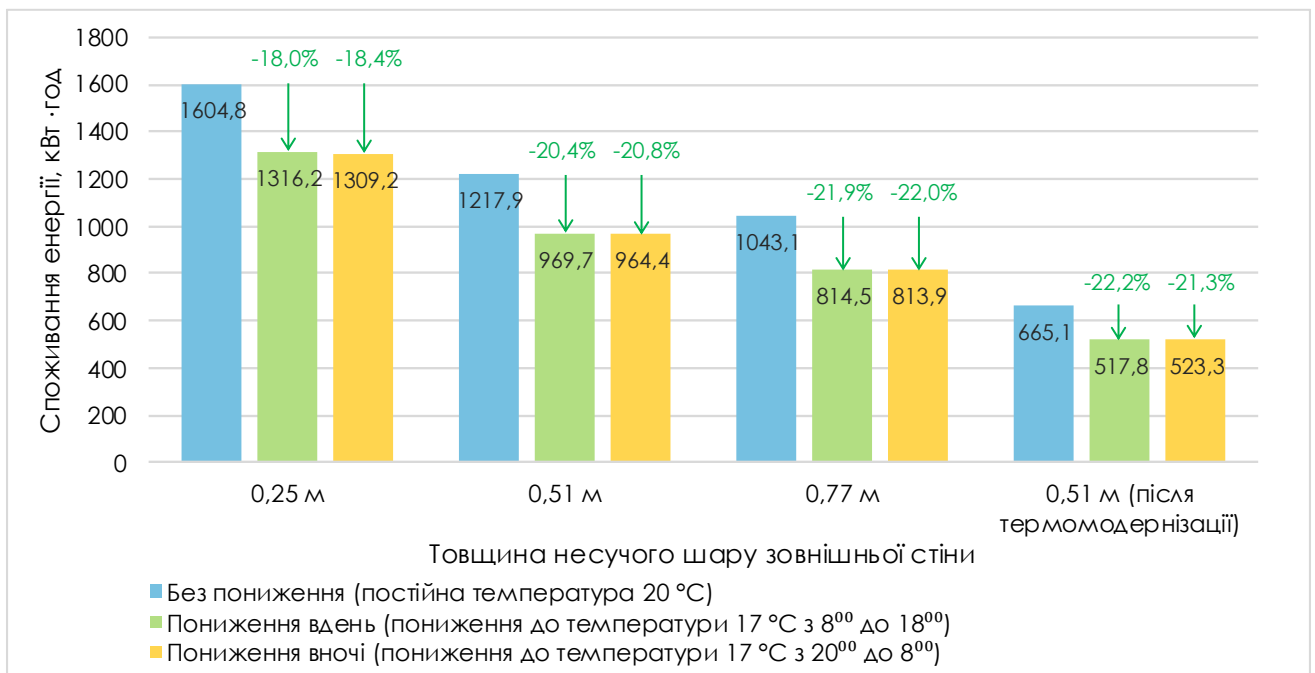


Рисунок 4.14 – Споживання енергії на опалення для різних варіантів зовнішніх огорожувальних конструкцій з пониженням температури внутрішнього повітря вночі для Пн орієнтації

Як видно з Рисунка 4.14, при всіх варіантах масивності зовнішніх стін відсоткова економія при нічному пониженні становить від 18,4% до 22,0%, тоді як денне пониження забезпечує майже ідентичні або трохи нижчі показники – від 18,0% до 22,2%. Різниця між ефективністю для денного та нічного пониження для північної орієнтації є менш вираженою, ніж у випадку для південної орієнтації. Це пояснюється тим, що сонячні теплонадходження вдень (які знижують потребу в опаленні для Пд орієнтації) мають менший вплив на північну орієнтацію, зменшуючи відмінність енергетичного балансу між денним та нічним періодами.

Така стабільність економії незалежно від часу пониження свідчить про переважання тепловтрат через огорожувальні конструкції, які залишаються майже сталими протягом доби.

Крім загального вирівнювання ефективності денного і нічного пониження температури для будівель з північною орієнтацією, на рисунок 4.13 також помітно, що після термомодернізації відсоткова економія при нічному пониженні стає нижчою, ніж при денному (21,3% проти 22,2%). Основна причина полягає в істотному зменшенні тепловтрат через огорожувальні конструкції внаслідок покращення термічного опору, зокрема після утеплення зовнішніх стін і заміни вікон. У результаті, зовнішнє середовище впливає на внутрішній тепловий режим значно менше, а отже, різниця між температурою приміщення і зовнішнім повітрям, яка є рушієм тепловтрат, перестає бути настільки критичною. Через це зниження внутрішньої температури на 3 °C вже не створює такого виразного градієнта, що дозволяв би реалізувати більший потенціал енергозбереження.

Таким чином, термомодернізація, з одного боку, зменшує базові втрати, але з іншого обмежує можливості для регулювання, тобто потенціал додаткової економії від тимчасового зниження температури стає більш скромним. Це ще раз підтверджує важливість комплексного підходу до підвищення енергоефективності: ізоляційні заходи повинні супроводжуватись адаптивним управлінням режимами опалення, оптимізованим під змінні теплотехнічні характеристики будівлі.

Нічне пониження температури в приміщеннях розглядається як одна з ключових стратегій управління системами опалення з метою зниження енергоспоживання та навантаження на інженерні мережі. Попри те, що протягом ночі приміщення зазвичай не використовуються так інтенсивно, як удень, зниження температури навіть на 2-3 °C дозволяє суттєво зменшити тепловтрати через огорожувальні конструкції, зокрема в умовах низької зовнішньої температури. Однак така стратегія має і свої особливості: зниження температури повітря на тривалий час призводить до охолодження масивних елементів будівлі, що викликає суттєве підвищення теплового навантаження в момент повернення до комфортної температури.

На рисунку 4.15 проаналізовано вплив денного та нічного пониження температури на навантаження на систему опалення впродовж двотижневого зимового періоду для об'єктів з південною (рисунок 4.15а) та північною (рисунок 4.15б) орієнтаціями зовнішніх стін. Варіанти з різними стратегіями зниження температури порівнюються з базовим варіантом без регулювання. Результати наведено для однакових конструктивних характеристик огорожувальних конструкцій (товщина зовнішньої стіни 0,51 м, внутрішньої – 0,255 м).



Рисунок 4.15 – Навантаження на систему опалення з пониженням температури внутрішнього повітря вночі: а. Південна орієнтація зовнішніх стін; б. Північна орієнтація зовнішніх стін. (внутрішні стіни: 0,255 м)

Для приміщення з південною орієнтацією (рисунок 4.15а) характерною особливістю є чітко виражене підвищення теплового навантаження вранці, після завершення періоду нічного пониження температури. Пікове значення навантаження, що виникає в момент відновлення до комфортного рівня, перевищує як варіант денного зниження, так і базову модель із сталою температурою. Денне пониження, навпаки, демонструє більш згладжений профіль, оскільки відновлення температури відбувається протягом денних годин, коли в південних приміщеннях присутнє сонячне тепло, що дозволяє знизити навантаження на систему. У порівнянні з обома сценаріями, модель без пониження температури забезпечує стабільніший рівень теплового потоку, однак він є вищим протягом усього періоду.

У випадку північної орієнтації (рисунок 4.15б) вплив нічного пониження на пікові навантаження ще помітніший. Через відсутність сонячного припливу, тепловтрати під час нічного зниження втрачена тепла енергія компенсуються виключно за рахунок опалення. Це призводить до зростання навантаження зранку. Денне пониження також спричиняє додаткові піки, однак вони мають нижчу інтенсивність і більш м'який характер. У середньому обидва сценарії пониження температури призводять до зменшення навантаження, проте ціною зростання добових коливань і різкого навантаження у фазі відновлення.

Таким чином, найбільш інтенсивні пікові навантаження спостерігаються саме при нічному пониженні температури, особливо в приміщеннях з північною орієнтацією. Це створює додаткові вимоги до потужності системи опалення і підкреслює необхідність обережного впровадження стратегій пониження температури, з урахуванням орієнтації, теплоакумуючої здатності будівлі та можливостей системи. У цьому контексті доцільним є впровадження плавного регулювання температурного режиму («плавних пусків»), які дозволяють уникнути різкого зростання навантаження в момент відновлення температури після пониження. Такі підходи можуть значно знизити пікове навантаження на обладнання, зменшити коливання температури у приміщенні та підвищити загальну ефективність роботи системи опалення.

Для оцінки впливу орієнтації будівлі на ефективність денної стратегії зниження температури було проаналізовано тепловий баланс у місячному розрізі для моделей з південною та північною орієнтацією (рисунок 4.16). Усі сценарії передбачають однакові конструктивні характеристики: товщина зовнішніх стін 0,51 м, внутрішніх – 0,255 м, умови до термомодернізації, денне зниження температури на 3 °С.

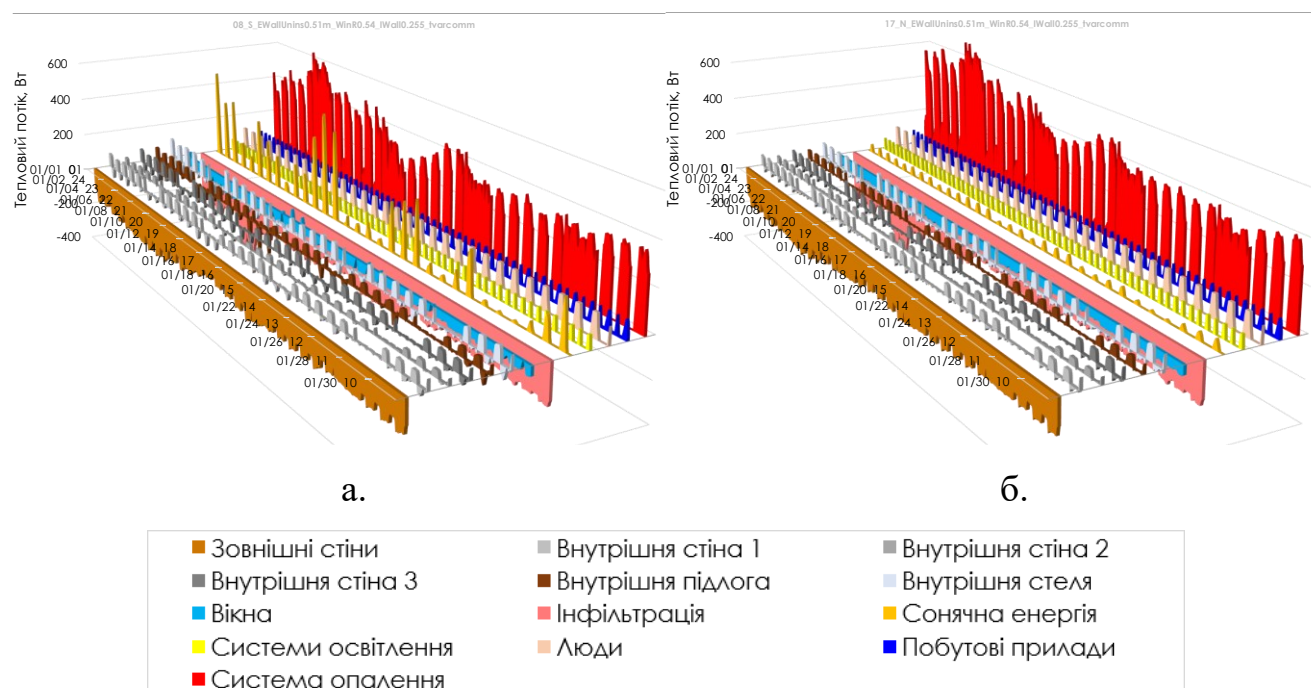


Рисунок 4.16 – Тепловий баланс репрезентативної кімнати в місячному розрізі:

- Пониження внутрішньої температури повітря вдень, Пд орієнтація, товщина несучого шару конструкції зовнішньої стіни: 0,51 м, до термомодернізації
- Пониження внутрішньої температури повітря вдень, Пн орієнтація, товщина несучого шару конструкції зовнішньої стіни: 0,51 м, до термомодернізації

На рисунку 4.16а (південна орієнтація) спостерігається значний внесок сонячного випромінювання в тепловий баланс, з чітко вираженими денними піками. Це дозволяє зменшити навантаження на систему опалення в денний час та активізує механізм акумуляції тепла. Помітно також посилений тепловий потік через внутрішні огорожувальні конструкції, що свідчить про ефективну віддачу накопиченої енергії в періоди зниженого теплопостачання. Такі конструкції не

лише згладжують добові коливання, а й беруть участь у перенесенні надлишкового тепла в часі.

На рисунку 4.166 (північна орієнтація) внесок сонячної енергії практично відсутній, тому система опалення забезпечує основну частину теплових надходжень. Водночас, навіть за умов відсутності інсоляції, помітним є згладжування добових коливань завдяки роботі внутрішніх огороджувальних конструкцій. Це вказує на їхню здатність стабілізувати мікроклімат приміщень шляхом теплової інерції, хоч і без зовнішніх джерел підживлення.

Таким чином, внутрішні конструкції відіграють важливу роль не лише як провідники тепла між приміщеннями, але й як активний елемент зберігання та перерозподілу енергії, особливо ефективний у поєднанні з динамічними стратегіями регулювання температури.

4.2 Аналіз впливу відключень опалення на теплові потоки через огороджувальні конструкції

У сучасних умовах питання перерв у постачанні теплової енергії набуває особливої актуальності. Перерви в постачанні теплової енергії можуть виникати через аварійні ситуації з метою збереження енергії або через зовнішні фактори, такі як нестабільність енергетичної системи під час війни в Україні. Масовані ракетні удари по енергетичній інфраструктурі призводять до планових і аварійних відключень, що вимагає ретельного аналізу умов будівель в умовах відсутності теплопостачання. Крім того, важливим є розуміння впливу конструктивних особливостей будівель та можливості їх адаптації до подібних умов.

Незалежно від причини, тимчасове припинення роботи системи опалення створює коливання параметрів для мікроклімату та енергоефективності як окремих приміщень, так і будівлі загалом.

У цьому контексті дуже важливо оцінити пасивну термічну стійкість будівлі, тобто здатність огороджувальних конструкцій утримувати тепло та сповільнювати процес охолодження внутрішнього середовища. Для прийняття обґрунтованих рішень щодо проєктування, модернізації або адаптації будівель до нестабільних

режимів експлуатації, необхідна кількісна оцінка теплових втрат у динаміці після припинення роботи системи опалення.

У межах цього розділу розглядаються сценарії повного або часткового відключення опалення у зонах, що дозволяє дослідити, як змінюється температура, а також відключення в суміжній зоні, коли опалення відсутнє лише в сусідньому приміщенні, і досліджується, як це позначається на навантаженні та споживанні теплової енергії в активній зоні, що межує з нею.

Аналіз базується на моделюванні утепленої будівлі з масивними огорожувальними конструкціями, що є типовою конфігурацією для об'єктів, які пройшли часткову термомодернізацію. Базова модель має наступні параметри:

Зовнішні стіни: цегляна кладка товщиною 510 мм (2 цегли) з теплоізоляційним шаром мінеральної вати 0,1 м; загальний тепловий опір $R = 3,31 \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$.

Вікна: енергоефективні двокамерні склопакети з коефіцієнтом теплопередачі $U = 0,73 \text{ Вт / м}^2 \text{ К}$.

Внутрішні стіни: цегляні перегородки товщиною 255 мм (1 цегла).

Температурний режим: в нормальних умовах температура внутрішнього повітря постійна $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сценарій відключення опалення моделюється на 15 січня – день, що знаходиться в середині опалювального сезону, коли температура зовнішнього повітря є стабільно низькою. Вибір цієї дати обґрунтовано тим, що саме в цей період відбувається максимальне теплове навантаження на будівлю, а отже й на енергетичну систему, що підвищує ймовірність відключень. Крім того, це дозволяє оцінити найгірший сценарій з точки зору тепловтрат та ефективності теплоаккумуляційних властивостей конструкцій.

Для аналізу було змодельовано п'ять сценаріїв експлуатації будівлі із варіаціями у роботі системи опалення та наявності внутрішніх тепловиділень (люди, освітлення, побутові прилади). Оцінка проведена окремо для південної та північної орієнтацій досліджуваного приміщення:

1. Базовий режим: усі приміщення функціонують у нормальному режимі роботи (опалення, присутність мешканців та електропристроїв);
2. Відключення опалення у досліджуваній зоні;
3. Відключення опалення у суміжній зоні, при цьому досліджувана зона функціонує нормально;
4. Відключення опалення у всій будівлі, але мешканці залишаються, зберігаються внутрішні тепловиділення;
5. Повне відключення: жодне приміщення не опалюється, присутність людей і джерел тепла відсутня.

Зведені параметри кожного сценарію наведено у таблиці 4.1, де позначено активність змінних джерел тепла: С.О. – система опалення; Л. – люди; О. – освітлення; П. – побутові прилади.

Таблиця 4.1 – Умови сценаріїв аналізу в умовах відключень

№	Досліджувана зона				Суміжна зона				Решта квартир у будівлі			
	С.О.	Л.	О.	П.	С.О.	Л.	О.	П.	С.О.	Л.	О.	П.
1.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.	–	–	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3.	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	✓	✓	✓	✓
4.	–	✓	–	–	–	✓	–	–	–	✓	–	–
5.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Усі моделювання виконані з використанням EnergyPlus [63] – програмного середовища, яке забезпечує динамічне врахування змін температури, теплових потоків та внутрішніх навантажень у часовому розрізі. Це дозволяє з високою точністю оцінити, як поводить себе будівля у випадках раптових змін теплопостачання та як ефективно працюють пасивні механізми теплозбереження.

4.2.1 Динаміка температури внутрішнього повітря під час повного або часткового відключення опалення

Зниження або повне припинення роботи системи опалення критичний сценарій, який вимагає глибокого аналізу з точки зору безпеки та енергетичної стабільності будівлі. В умовах надзвичайних ситуацій, таких як перебої в енергопостачанні, аварії на тепломережах чи дефіцит палива, приміщення можуть залишатися без централізованого теплопостачання впродовж тривалого часу. В таких випадках визначальне значення має здатність будівлі зберігати тепло, тобто пасивна теплова інерційність конструкцій і вплив зовнішніх чинників (інсоляція, інфільтрація, тощо).

У цьому підрозділі проаналізовано температурний режим у приміщенні після відключення опалення протягом опалювального періоду. Дослідження охоплює два окремих часових інтервали: січень-лютий (пік холодного сезону) та листопад-грудень (початок опалювального сезону). Це дозволяє оцінити поведінку приміщення в умовах як найнижчих температур, так і в перехідний період, коли температура зовнішнього повітря коливається поблизу нуля.

Моделювання виконано окремо для південної та північної орієнтації, з урахуванням впливу інсоляції. Аналізується динаміка зниження внутрішньої температури після раптового припинення подачі тепла, а також відмінності між сценаріями повного та часткового відключення.

Аналіз результатів дозволяє зробити висновки щодо теплової інерційності огорожувальних конструкцій, ролі внутрішніх тепловиділень і сонячного теплопостачання у підтриманні прийнятних умов для перебування людей навіть у разі аварійного відключення системи опалення.

Сценарій часткового відключення опалення

Для оцінки теплової інерційності будівлі та температурних умов в разі часткового припинення теплопостачання, було змодельовано сценарій повного відключення опалення в досліджуваній зоні з 15 січня – періоду з найнижчими

температурами зовнішнього повітря (рисунк 4.17). При цьому решта приміщень у будівлі залишались у нормальному режимі роботи, що дозволяє оцінити вплив теплопередачі через огорожувальні конструкції.

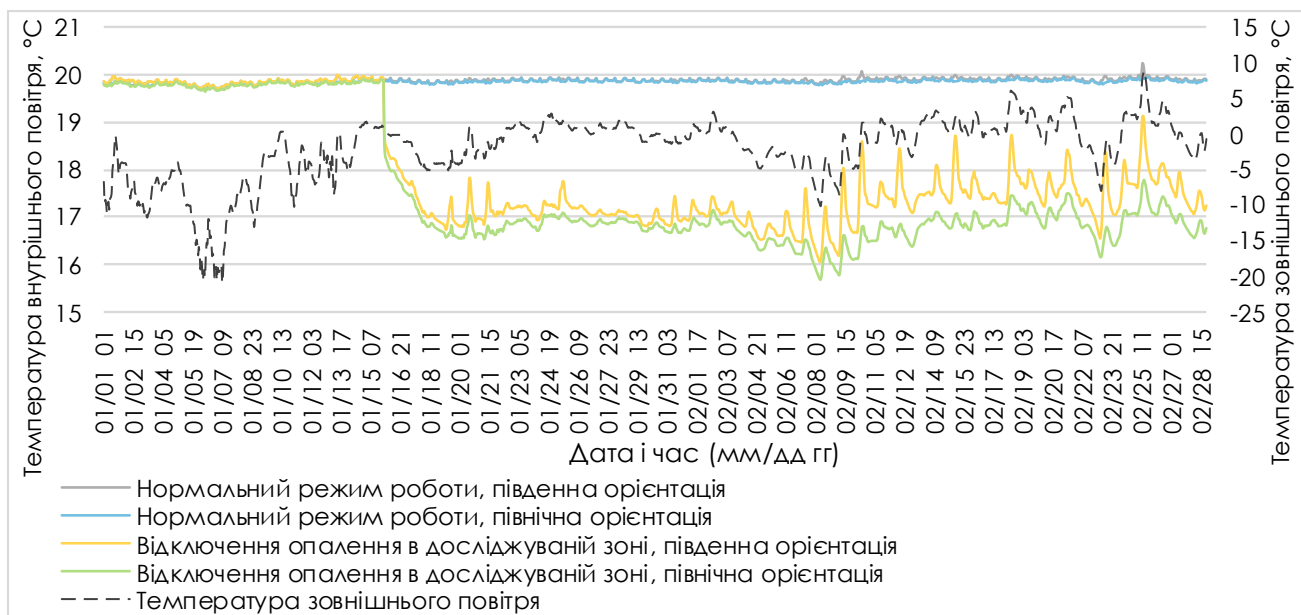


Рисунок 4.17 – Температурні умови в приміщенні при відключенні опалення в досліджуваній зоні для періоду січень-лютий

Аналіз графіка свідчить, що у нормальному режимі роботи температура в обох орієнтаціях залишається стабільною, близько 20 °C, незалежно від змін зовнішнього повітря. Після відключення опалення, температура в досліджуваній зоні поступово знижується. Приміщення з південною орієнтацією демонструє менше охолодження у порівнянні з північним варіантом, що пояснюється додатковими сонячними теплонадходженнями. Проте, навіть у південному випадку температура внутрішнього повітря знижується до 17-18 °C протягом кількох діб після відключення.

У разі північної орієнтації падіння температури є більш вираженим і стабільним. У середньому, температура в північному приміщенні залишається на 0,5 °C нижчою, ніж у південному, а в періоди підвищеної сонячної активності ця різниця може сягати до 2 °C, що чітко відображає вплив інсоляції на тепловий режим приміщення.

Помітно також, що у обох випадках зниження температури відбувається не стрибкоподібно, а з затримкою в часі, що свідчить про значну теплову інерційність конструкцій і їх здатність забезпечити певний рівень термічного комфорту навіть у відсутності активного опалення.

Таким чином, за результатами моделювання можна зробити висновок, що при частковому відключенні опалення в утеплених будівлях з масивними конструкціями температура повітря в приміщенні залишається на допустимому рівні протягом щонайменше кількох діб. Це дозволяє виграти час для вжиття аварійних заходів або відновлення роботи системи опалення без критичного впливу на комфорт та безпеку користувачів.

На рисунку 4.18 представлено зміну температури повітря у приміщенні за умови відсутності теплопостачання в період листопад–грудень. Цей етап дослідження дозволяє оцінити здатність будівлі підтримувати прийнятні температурні умови при поступовому охолодженні, характерному для міжсезоння.

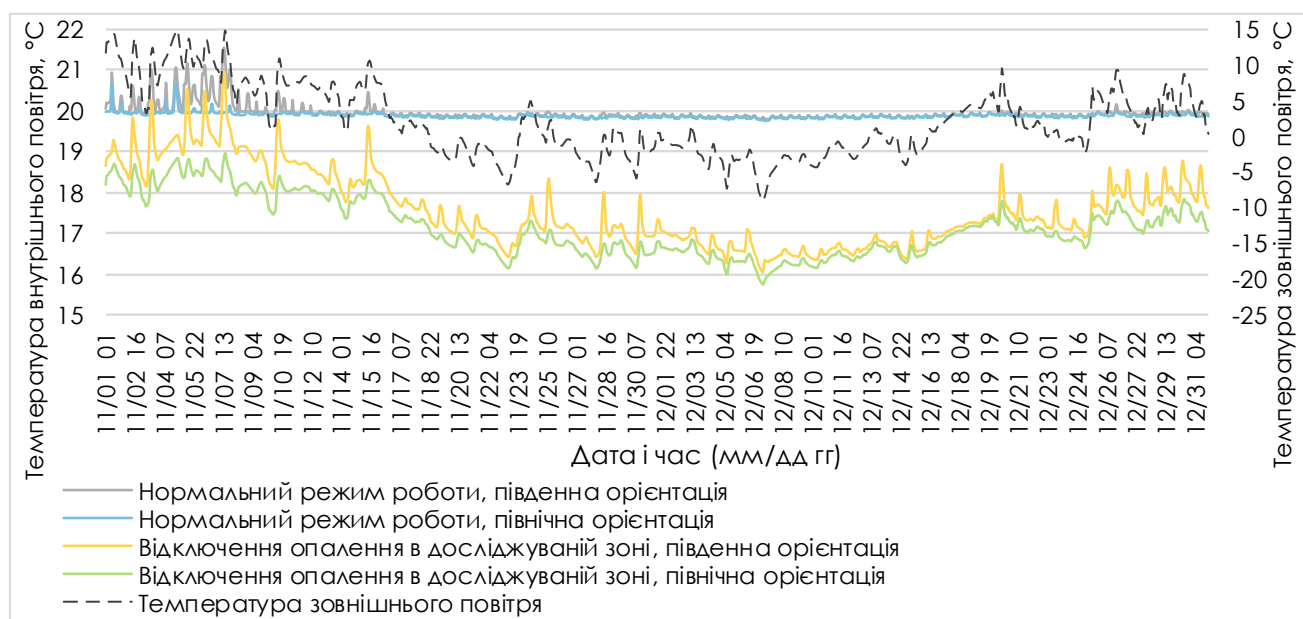


Рисунок 4.18 – Температурні умови в приміщенні при відключенні опалення в досліджуваній зоні для періоду листопад-грудень

У початковий період (перші дні листопада) температура в приміщенні навіть без опалення зберігається на рівні 19-20 °C для південної орієнтації і 18-19 °C для північної, що пояснюється невисокими зовнішніми втратами. У міру зниження

температури зовнішнього повітря відбувається поступове охолодження внутрішнього простору, однак темпи зниження не є критичними, і навіть до кінця періоду температура в приміщенні не опускається нижче 16 °C.

У південній орієнтації видно добову динаміку температури, зокрема підвищення до 18-19 °C у сонячні дні, що свідчить про активне використання пасивних надходжень сонячної енергії. Натомість у північному приміщенні таких пікових коливань не спостерігається, і температура стабільно залишається нижчою на 0,5-2,0 °C. Це ще раз підкреслює важливість орієнтації у контексті енергонезалежності та ефективності пасивного опалення.

Сценарій повного відключення опалення

Рисунок 4.19 демонструє зміну температурних умов у приміщенні в разі повного відключення опалення в будівлі на прикладі січня–лютого. На відміну від часткових сценаріїв, у цьому випадку теплопостачання припиняється не лише в досліджуваній зоні, а й у всіх інших приміщеннях будівлі, що створює максимально несприятливий сценарій з точки зору теплових втрат. Такий режим дає змогу оцінити реальну теплову інерційність будівлі та її здатність зберігати тепло в умовах надзвичайних ситуацій.

Як видно з графіка, після відключення системи опалення (15 січня), температура в усіх варіантах починає стрімко знижуватись. За умови присутності внутрішніх джерел тепла (люди, побутові прилади), динаміка охолодження сповільнюється. Через 4 дні температура знижується приблизно до 15 °C, а через два тижні до 8-10 °C, в залежності від орієнтації. У варіантах без внутрішніх теплонадходжень температура падає швидше та глибше, досягаючи рівня нижче 9 °C наприкінці лютого.

Температурний профіль південної орієнтації, як і раніше, виглядає краще, зокрема в денний час, коли фіксується підняття температури до 1,5–2 °C вище за північну орієнтацію завдяки надходженню сонячного тепла.

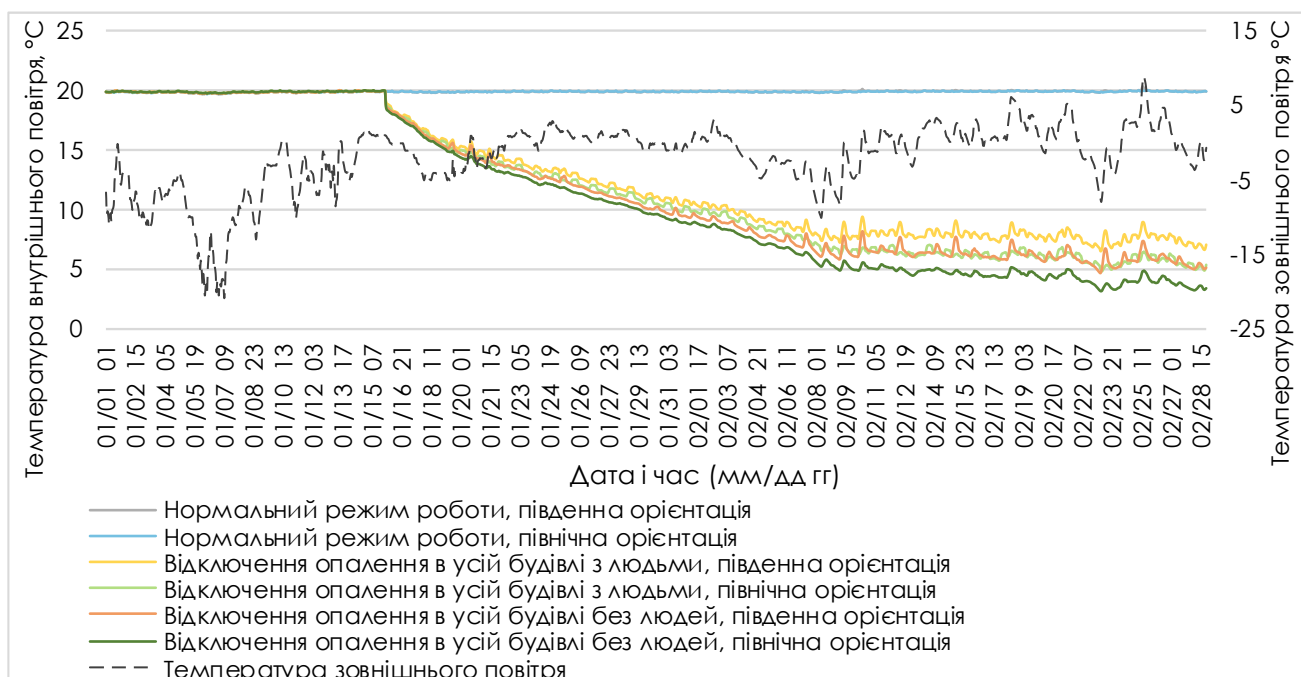


Рисунок 4.19 – Температурні умови в приміщенні при повному відключенні опалення для періоду січень-лютий

Особливо важливим є те, що в усіх сценаріях температура залишається вище точки замерзання, що підтверджує базову стійкість конструкції утепленої будівлі до втрати тепла навіть у кризовому режимі. Водночас, у разі тривалого відключення без відновлення джерел тепла, ризики зниження температури до критичних значень зберігаються.

Таким чином, навіть за найгіршого сценарію помітною залишається роль пасивних джерел (сонце, акумуляція тепла конструкціями) та внутрішніх тепловиділень, що слід враховувати при розробці стратегій енергетичної автономності.

На рисунку 4.20 показано зміну внутрішньої температури в приміщенні за умов повного відключення опалення в будівлі протягом листопада та грудня. Цей період характеризується поступовим зниженням зовнішньої температури, що дозволяє оцінити теплову інерційність будівлі в умовах ранньої стадії опалювального сезону, коли опалення не працює, але втрати тепла зростають.

На відміну від графіка для січня-лютого, температура в досліджуваному приміщенні знижується більш плавно – переважно у зв'язку з вищими значеннями

зовнішньої температури на початку періоду. Відсутність опалення не спричиняє миттєвого теплового провалу, але поступове зниження триває протягом усього листопада. В грудні температура вже стабілізується на рівні 4-6 °С при наявності внутрішніх теплонадходжень, або 2-4 °С за їхньої відсутності.

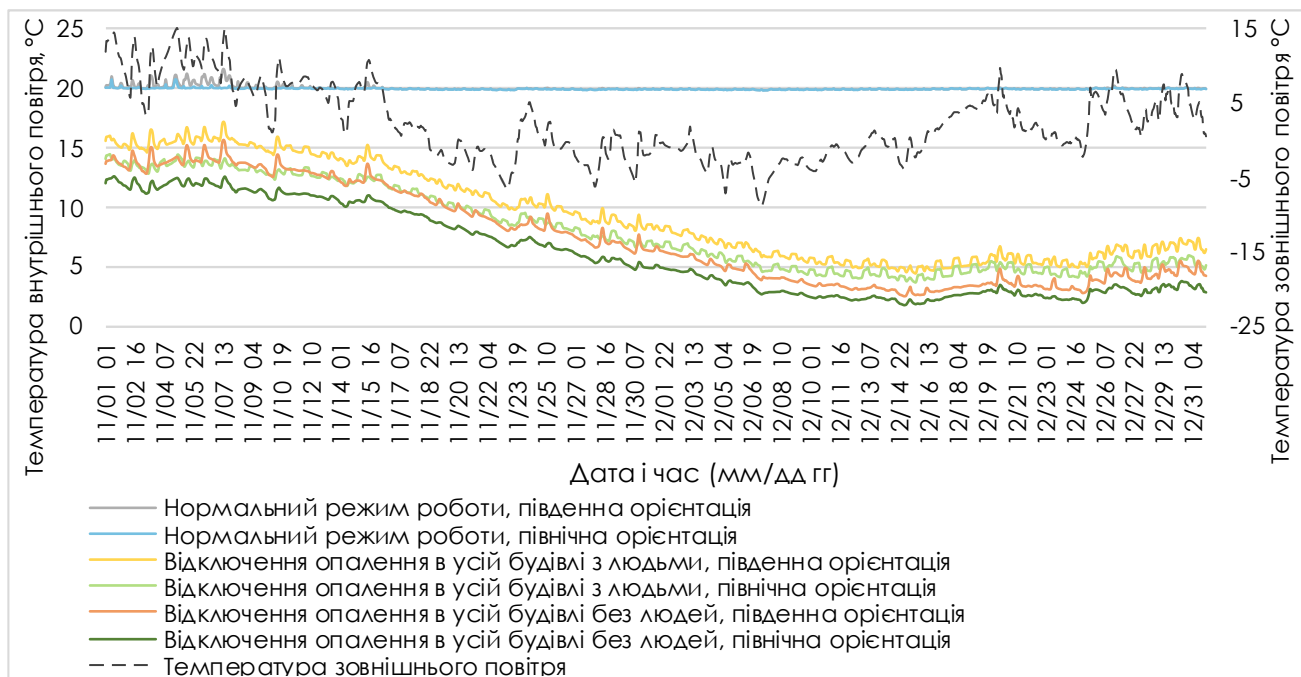


Рисунок 4.20 – Температурні умови в приміщенні при повному відключенні опалення для періоду листопад-грудень

Сценарії з південною орієнтацією демонструють вищу середню температуру (на 0,5-1 °С), особливо в денні години, що свідчить про внесок сонячного тепла навіть у період короткого світлового дня. Цей ефект добре помітний у вигляді періодичних піків на графіку, відсутніх у варіантах північної орієнтації.

4.2.2 Вплив відключення опалення в суміжних зонах на навантаження та споживання теплової енергії репрезентативними приміщеннями

У реальних умовах експлуатації багатоквартирних будівель опалення окремих приміщень або квартир може бути частково або повністю відключене з ініціативи мешканців, через аварії, або з метою енергозбереження. Такі зміни у тепловому балансі окремих зон можуть безпосередньо впливати на суміжні

приміщення, які залишаються опалюваними. Зниження температури в одній із квартир викликає перерозподіл теплових потоків через внутрішні огорожувальні конструкції, що призводить до додаткового навантаження на систему опалення у сусідніх зонах.

У цьому підрозділі проаналізовано вплив відключення суміжних приміщень на роботу системи опалення в досліджуваних зонах. Зокрема, розглядається:

- зміна поточного навантаження на систему опалення;
- сезонне збільшення теплового споживання;
- різниця між південною та північною орієнтацією приміщення.

Метою аналізу є оцінка масштабу додаткового енергоспоживання, яке виникає через додаткову втрату тепла через внутрішні огорожувальні конструкції до суміжних зон, та надати орієнтовну оцінку потенційних ризиків при довготривалому локальному відключенні.

Аналіз навантаження на систему опалення

У рамках дослідження впливу локального відключення опалення важливо проаналізувати не лише зміну температури в зоні, де припинено подачу тепла, але й реакцію суміжних приміщень, які продовжують опалюватися. Передача тепла через внутрішні огорожувальні конструкції стає додатковим джерелом втрат енергії, а отже і фактором зростання навантаження на систему опалення. Для демонстрації цього ефекту на рисунках 4.21 та 4.22 подано зміну теплового навантаження в досліджуваній зоні для сценарію, коли в суміжному приміщенні відключене опалення. Дані подано окремо для південної та північної орієнтацій приміщень.

На рисунку 4.21 представлено зміну теплового навантаження на зону південної орієнтації в умовах відключення опалення в суміжному приміщенні. Починаючи з 15 січня, коли моделюється втрата тепlopостачання в сусідній зоні, спостерігається чітке зростання навантаження на систему опалення досліджуваної кімнати. У порівнянні з базовим режимом, середнє навантаження в умовах

порушеного теплового балансу зростає приблизно на 18,2%, що свідчить про суттєве додаткове теплове підживлення суміжної охолодженої зони через внутрішні конструкції. Добові коливання залишаються майже на тому ж рівні, однак загальний рівень навантаження стабільно підвищується, формуючи сталу теплову передачу до холодної ділянки.

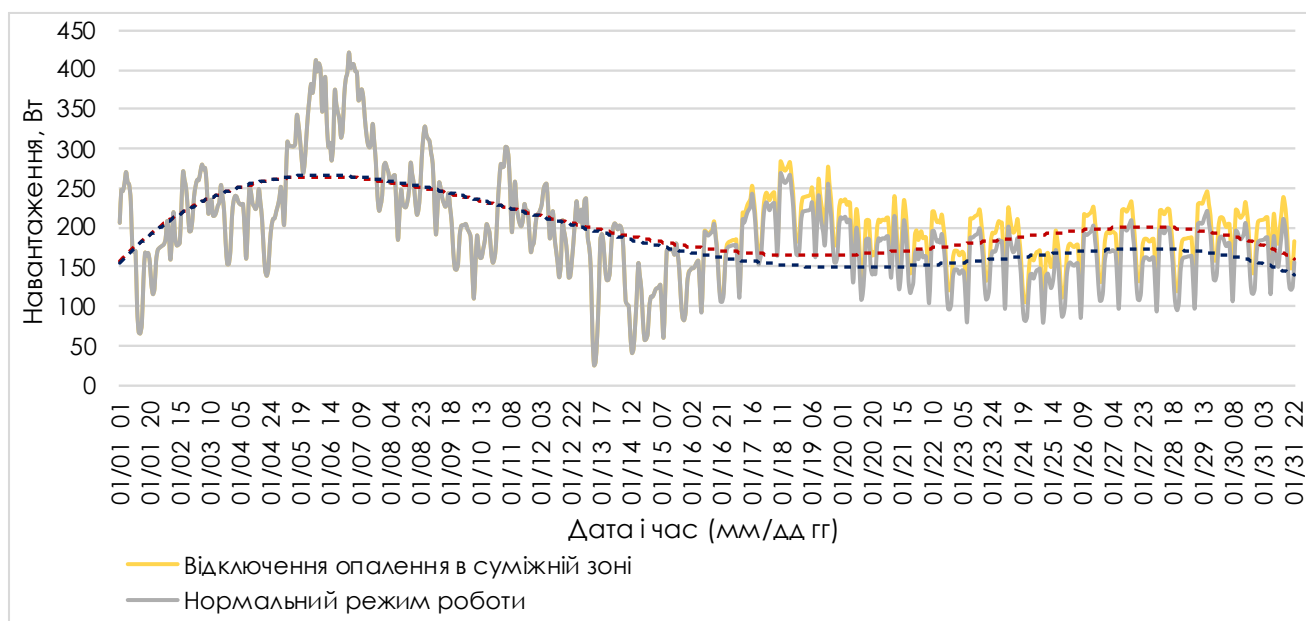


Рисунок 4.21 – Зміна навантаження на систему опалення при відключенні опалення в суміжній зоні для південної орієнтації

На рисунку 4.22 представлений аналогічний сценарій для зони північної орієнтації. Спостерігається схожа динаміка: після 15 січня навантаження на систему опалення стабільно перевищує базовий рівень, а середній приріст навантаження становить близько 16,2%. Це дещо нижче, ніж у випадку південної орієнтації, проте підтверджує той самий ефект теплові втрати до суміжного неопалюваного простору компенсуються з боку суміжної опалюваної зони.

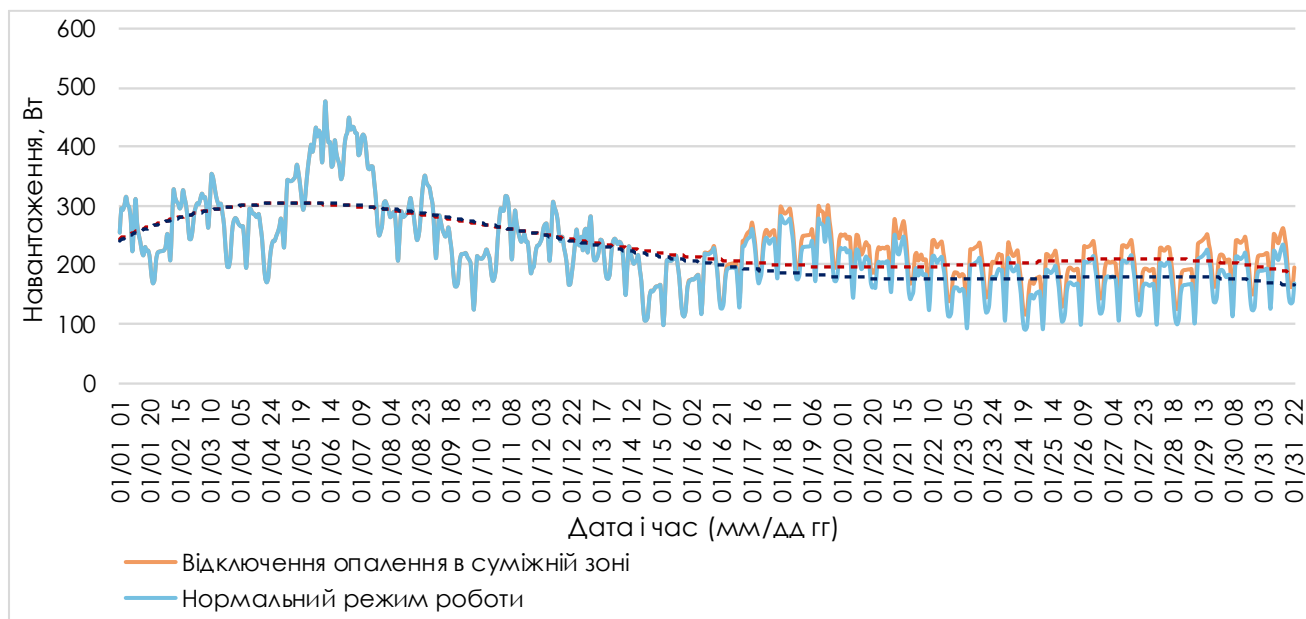


Рисунок 4.22 – Зміна навантаження на систему опалення при відключенні опалення в сусідньому приміщенні для північної орієнтації

Таким чином, отримані результати демонструють, що навіть локальне відключення опалення в межах однієї зони призводить до помітного перерозподілу теплових потоків у будівлі. У разі південної орієнтації середнє навантаження на систему опалення зростає на 18,2%, для північної – на 16,2%, що підтверджує високу чутливість суміжних приміщень до внутрішньої теплової взаємодії. Якщо проектом або експлуатаційними режимами не передбачено компенсаційних механізмів, такі додаткові втрати тепла можуть стати причиною перевантаження локальних систем, нерівномірного прогріву та зниження загальної енергоефективності.

З позиції енергетичного балансу це означає, що одна вимкнена зона може підвищити енергоспоживання не лише локально, а й у масштабі всієї будівлі. Це створює ризики неконтрольованого зростання теплових втрат і унеможливорює прогнозовану роботу регулюючих пристроїв. У контексті сучасних викликів (енергетичної нестабільності, аварій та високих тарифів) недооцінка таких сценаріїв може мати як технічні, так і економічні наслідки.

Аналіз споживання енергії системою опалення

З огляду на попередні результати, можна зробити висновок, що в разі локальних відключень опалення додаткові навантаження на систему зумовлені не лише миттєвими змінами теплових потоків, а й накопичувальним ефектом додаткового енергоспоживання протягом усього періоду. Саме тому корисним буде кількісна оцінка змін у споживанні енергії системою опалення внаслідок передачі тепла через внутрішні стіни до суміжних охолоджених зон.

Для більш повного розуміння наслідків локальних відключень опалення у багатозонних приміщеннях було проаналізовано безпосередній вплив на річне та місячне споживання енергії в суміжних опалюваних зонах. На рисунках 4.23 та 4.24 наведено результати порівняння споживання енергії системою опалення у випадку відключення опалення в суміжній зоні для південної та північної орієнтацій відповідно.

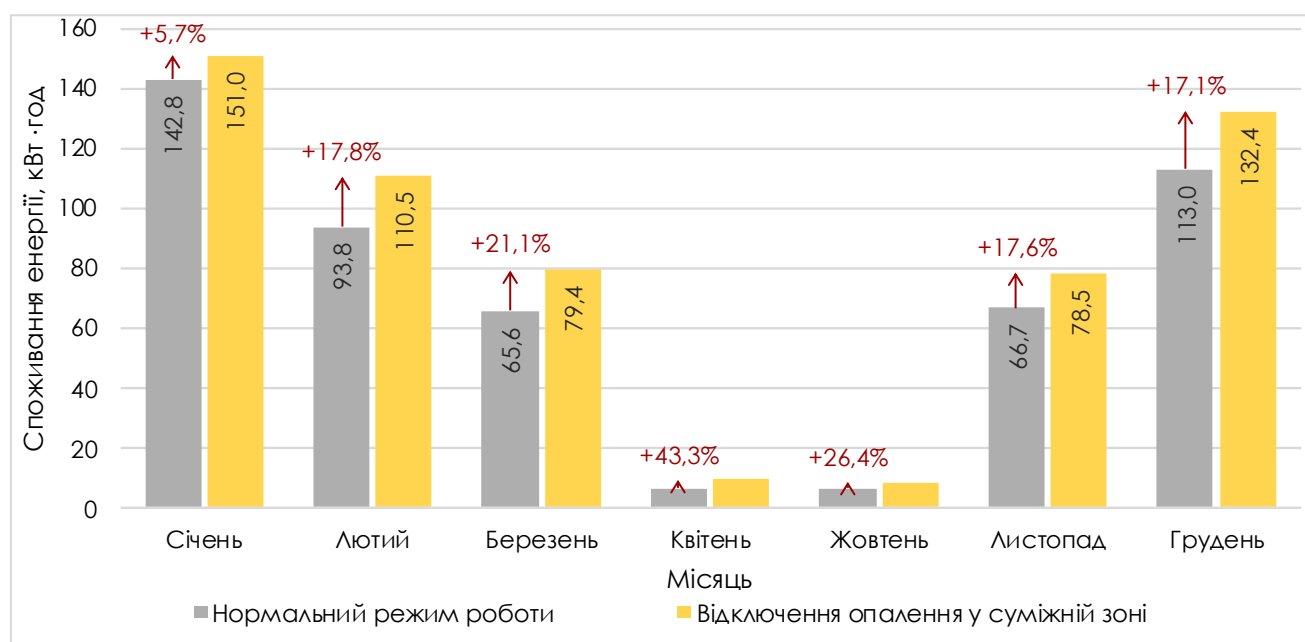


Рисунок 4.23 – Зростання споживання енергії системою опалення при відключенні опалення у суміжній зоні для південної орієнтації

Найбільше додаткове навантаження спостерігається у міжсезоння – у квітні (зростання на 43,3%) та жовтні (зростання на 26,4%). У цей період система опалення працює на мінімальних рівнях, тож навіть незначна додаткова втрата

тепла через внутрішні конструкції суттєво змінює енергетичний баланс. У холодні місяці вплив відчутний, але менш контрастний: зростання у грудні становить 17,1%, у лютому – 17,8%, а найменше в січні (5,7%). Така динаміка свідчить про те, що основна частина теплових втрат у пік зими припадає на зовнішнє середовище, а не на суміжні зони, тому ефект від внутрішньої теплопередачі стає відносно менш помітним.

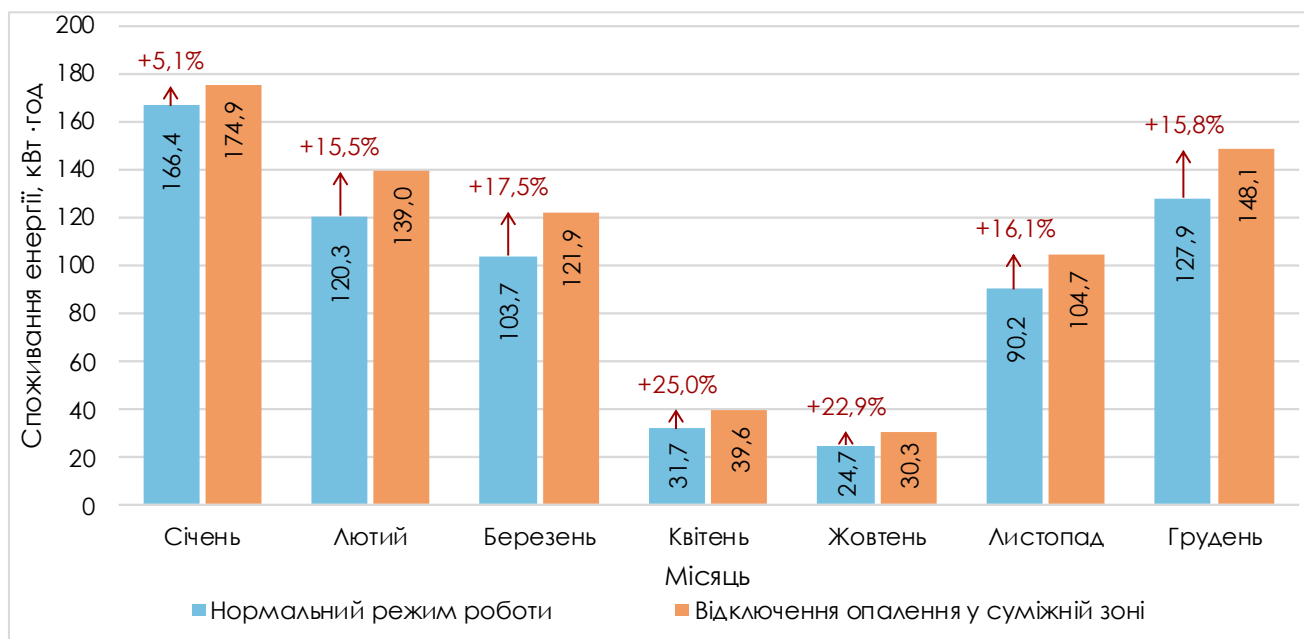


Рисунок 4.24 – Зростання споживання енергії системою опалення при відключенні опалення у суміжній зоні для північної орієнтації

Для північної орієнтації загальна тенденція аналогічна, проте спостерігається дещо менше відсоткове збільшення споживання енергії. Середнє зростання для північної орієнтації становить 14,2%, що дещо менше за південну (15,0%). Найбільші відхилення знову фіксуються в міжсезоння: зростання на 25,0% у квітні та на 22,9% у жовтні. У зимові місяці зростання становить 5,1-15,8%, що відповідає загальній динаміці. Це пов'язано з відсутністю сонячного теплового надходження, яке в південній зоні частково компенсує втрати і підвищує контраст між сценаріями.

Загалом, аналіз підтверджує, що вплив локального відключення опалення у суміжних зонах проявляється не лише в короткочасному навантаженні, але і в

накопичуваному зростанні енергоспоживання протягом опалювального періоду. У критичних умовах це може мати значення для планування резервів потужності та режимів керування системами опалення.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було проведено всебічну оцінку енергетичних характеристик житлової будівлі при впровадженні регулювання температурного режиму та в умовах аварійних сценаріїв відключення опалення. Основна увага приділялася порівнянню результатів, отриманих за допомогою стаціонарної та динамічної моделей, а також аналізу внутрішніх теплових процесів у приміщеннях при змінних режимах експлуатації.

Встановлено, що динамічна модель значно точніше відображає реальну поведінку будівлі, зокрема з урахуванням інерційності матеріалів, добових коливань температури, теплової взаємодії із суміжними приміщеннями та сонячного випромінювання. У порівнянні зі стаціонарним підходом, який базується на фіксованих граничних умовах, динамічна модель дозволяє гнучко враховувати вплив різноманітних сценаріїв регулювання та нестандартних ситуацій.

Одним із ключових напрямів дослідження була оцінка ефективності температурного регулювання. Було показано, що:

- Пониження температури в денний період дозволяє зменшити річне споживання теплової енергії на 18-22% залежно від орієнтації фасаду, масивності стін і стану теплоізоляції. Найвищий ефект спостерігається при високому термічному опорі огорожувальних конструкції, тобто в термомодернізованих будівлях.
- Нічне пониження температури демонструє дещо вищу ефективність, і сприяє зменшенню енергоспоживання на рівні 19-23%. Найвищий ефект зафіксовано у будівлях з високою масивністю, де зниження температури вночі компенсується акумуляційними процесами.

Також встановлено, що термомодернізація, хоча і суттєво знижує загальне теплове навантаження, водночас зменшує потенціал для економії за рахунок регулювання, оскільки вплив понижених температур втрачає вагу через високий термічний опір огорожувальних конструкцій.

Окремий блок досліджень було присвячено аналізу поведінки будівлі в умовах повного або часткового відключення опалення. Під час імітації таких сценаріїв виявлено:

- При відключенні опалення лише у суміжному приміщенні відбувається зростання теплового потоку через внутрішні стіни, що призводить до додаткового навантаження на систему опалення в досліджуваній зоні на 16-18%.

Таким чином, взаємодія між суміжними приміщеннями є критично важливою для формування теплового балансу, і її недооцінка, характерна для спрощених розрахункових моделей, може призводити до значних похибок у плануванні теплопостачання.

Узагальнено, результати досліджень доводять, що:

- Динамічне моделювання є необхідним інструментом для оцінки ефективності регулювання систем опалення, зокрема при впровадженні адаптивних стратегій у відповідь на нестандартні умови експлуатації.

- Масивність стін і орієнтація будівлі мають значущий вплив на результативність заходів із енергозбереження, однак цей вплив може бути протилежним залежно від сценарію (наприклад, у денному чи нічному циклі, при відключеннях або сталих режимах).

- Оптимальне енергетичне проектування та модернізація житлових будівель має базуватися не лише на зниженні тепловтрат, але й на підвищенні здатності до акумуляції тепла та гнучкого регулювання режимів роботи інженерних систем.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методик енергетичного аудиту, розробки нормативів щодо енергоефективності житлового фонду, а також формування рекомендацій щодо ефективних стратегій опалення у періоди криз та нестабільного теплозабезпечення.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена дослідженню розосереджених енергетичних балансів у об'єктах кінцевого споживання енергії, на прикладі багатоквартирних житлових будівель, із застосуванням сучасних інструментів динамічного енергетичного моделювання, зокрема з використанням програмних продуктів EnergyPlus та DesignBuilder. Метою роботи було поглиблене вивчення впливу теплофізичних характеристик будівельних конструкцій, кліматичних умов та режимів експлуатації на енергетичні баланси кондиціонованих зон багатоквартирних житлових будівель. Динамічний підхід дозволив враховувати змінність зовнішніх кліматичних умов, інерційність огорожувальних конструкцій та варіативність режимів експлуатації окремих зон будівлі, що забезпечило більш реалістичну та точну оцінку енергетичних потоків, порівняно зі стаціонарними методами, які не можуть повною мірою врахувати комплексну взаємодію всіх чинників. Увагу було зосереджено як на стандартних режимах експлуатації, так і на сценаріях часткового або повного відключення систем опалення, що є актуальним в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема військового стану.

Результати дослідження дозволили встановити обґрунтовані залежності між конструктивними параметрами будівлі, режимами опалення та енергетичним навантаженням, що дає змогу підвищити точність прогнозування споживання теплової енергії та оптимізувати стратегії енергозбереження при проектуванні та реконструкції житлових будівель. Наукова робота створює підґрунтя для підвищення енергоефективності житлового фонду України, зокрема в частині розподілення теплової енергії між зонами будівлі та управління режимами опалення в будівлі або в кондиціонованих зонах будівлі.

1. Розроблено детальну мультизональну динамічну модель багатоквартирної житлової будівлі, яка враховує погодинні зміни кліматичних умов, режими експлуатації приміщень, внутрішні та зовнішні теплові надходження, що дозволяє точніше моделювати реальні процеси теплопередачі в будівлях порівняно з традиційними стаціонарними підходами.

2. Комплексно досліджено вплив теплоінерційних характеристик будівельних конструкцій на динаміку споживання теплової енергії в житлових будинках, з урахуванням типових для України конструктивних особливостей та нормативних вимог, що дозволило виявити додаткові резерви економії теплової енергії шляхом врахування теплофізичних особливостей огорожувальних конструкцій. Встановлено, що врахування масивності зовнішніх стін дозволяє підвищити точність оцінювання економії енергії від заходів з енергозбереження до 4%. Додаткове врахування масивності внутрішніх стін збільшує цю точність ще на 3-4%. Застосування стаціонарних методів розрахунку може призводити до систематичної переоцінки або недооцінки ефективності таких заходів з енергозбереження.

3. Проведено порівняльний аналіз стаціонарних і динамічних методів оцінювання енергетичних характеристик будівель, на основі якого обґрунтовано переваги динамічного підходу, особливо для оцінки доцільності нетипових заходів з енергозбереження і в умовах часткових та періодичних відключень опалення, що актуально для сучасних реалій експлуатації житлових будинків в Україні. З'ясовано, що застосування стаціонарних методик в умовах однорідних температурних умов і сталого режиму опалення дає результати, завищені на 8-9% порівняно з динамічним моделюванням. При впровадженні переривчастих режимів опалення та неоднорідних температурних умов у суміжних зонах розбіжність між результатами стаціонарних та динамічних методів становить 25-30%.

4. Запропоновано та апробовано методи параметричного аналізу з застосуванням методів динамічного моделювання. Розроблений підхід дозволяє ефективно варіювати спектр параметрів, значно скорочуючи витрати людських ресурсів і часу на оцінювання заходів з енергозбереження.

5. Встановлено кількісні оцінки між енергоспоживанням будівлі, її орієнтацією, масивністю зовнішніх та внутрішніх огорожувальних конструкцій і сонячними теплонадходженнями, які дозволяють розширити і деталізувати підходи до розробки рекомендацій для проєктування та реконструкції житлових будівель з метою максимально ефективного використання сонячної енергії як пасивного

джерела тепла. Встановлено, що будівлі з більш масивними зовнішніми стінами на північній орієнтації споживають на 24-35% менше теплової енергії, порівняно з менш масивними конструкціями. На південній орієнтації додаткова економія становить ще 1-2%, завдяки ефекту теплової акумуляції стін та підвищеним сонячним теплонадходженням.

6. Виконано детальну оцінку впливу нерівномірних температурних умов у суміжних приміщеннях на внутрішні теплові потоки та загальне енергоспоживання приміщень, що є важливим при плануванні зонального регулювання системи опалення в умовах неповної зайнятості або аварійних сценаріїв. Встановлено, що відключення опалення лише у суміжному приміщенні спричиняє зростання теплового потоку через внутрішні огорожувальні конструкції, підвищуючи навантаження на систему опалення досліджуваної зони на 16-18% (18,2% для зон південної орієнтації та 16,2% для зон північної орієнтації). Це призводить до накопичувального збільшення річного енергоспоживання у досліджуваних приміщеннях на 14,2-15,0%. Отримані результати є важливими для практичного використання при впровадженні зонального обліку тепла, встановленні індивідуальних лічильників-розподільників та справедливому розподілі витрат на опалення між споживачами.

7. Виявлено переваги та недоліки застосування графіків періодичного пониження температури як заходу з енергозбереження. Результати динамічного моделювання підтвердили потенціал зменшення річного енергоспоживання на 18-24%, залежно від конфігурації приміщень, при умові забезпечення належного рівня теплового комфорту під час перебування людей. Водночас, виявлено потенційні недоліки такого підходу, зокрема виникнення додаткових пікових навантажень на систему опалення (зростання на 8–10 %) при відновленні до нормального режиму температур, що необхідно враховувати при плануванні і проектуванні систем теплопостачання та керування опаленням.

8. Проведено дослідження динаміки внутрішньої температури та енергоспоживання в умовах повного та часткового відключення систем опалення з урахуванням реальних теплоінерційних властивостей конструкцій будівлі, що

надзвичайно актуально для оцінки стійкості будівель до кризових ситуацій в умовах військового стану та нестабільного постачання енергії та подальшому використанні отриманих результатів дослідження перехідних режимів в будівлях для налаштування керування системами опалення.

9. Із застосуванням динамічних моделей запропоновано визначати енергоспоживання приміщень в умовах зміни експлуатаційних характеристик, що дозволяє підвищити достовірність та обґрунтованість розрахунків при проектуванні та реконструкції житлових будівель. Розроблені методи мають потенціал для інтеграції у національні стандарти оцінки енергоефективності, а також може бути використана для навчання систем автоматичного адаптивного регулювання, зокрема з використанням нейронних мереж і штучного інтелекту. Це створює перспективи для реалізації ефективних алгоритмів управління, що адаптуються до змінних умов експлуатації будівель та підвищують комфорт мешканців за мінімальних енерговитрат.

10. Результати дисертаційного дослідження підтверджено довідкою про впровадження, виданою ОСББ «Наш дім на Галана» та Кваліфікаційним центром "Центр підготовки енергоменеджерів навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту" КПІ ім. Ігоря Сікорського. Зазначені документи підтверджують придатність і ефективність запропонованих методів та моделей динамічного енергетичного моделювання для планування і реалізації комплексних заходів з підвищення енергоефективності багатоквартирних житлових будівель, а також свідчать про їх практичну цінність та потенціал до подальшого широкого застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сіденко В.Р., Веклич О.О. (Ред.). (2016). *Україна і політика протидії зміні клімату: Економічний аспект / Аналітична доповідь*. Київ: Заповіт.
2. Шатоха В.І. (2017). *Лідерство Європейського Союзу у запобіганні зміні клімату: Монографія. Дніпро: Акцент ПП*.
3. Stechemesser, A., Koch, N., Mark, E., Dilger, E., Klösel, P., Menicacci, L., Nachtigall, D., Pretis, F., Ritter, N., Schwarz, M., Vossen, H., & Wenzel, A. (2024). Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. *Science*, 385(6711), 884–892. <https://doi.org/10.1126/science.adl6547>
4. І.М. Сотник. (2019). *Енергоефективність та відновлювальна енергетика в Україні: Проблеми управління: Монографія*. ПФ Видавництво «Університетська книга». https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/78355/3/Sotnyk_2019.pdf
5. Ali, A., Audi, M., & Roussel, Y. (2021). Natural resources depletion, renewable energy consumption and environmental degradation: A comparative analysis of developed and developing world. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 251–260. <https://doi.org/10.32479/ijeep.111008>
6. Huo, J., & Peng, C. (2023). Depletion of natural resources and environmental quality: Prospects of energy use, energy imports, and economic growth hindrances. *Resources Policy*, 86, 104049. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104049>
7. Ольшевський І. Д. (2020). *Вплив відновлюваних джерел енергії на роботу об'єднаної енергетичної системи України* [Бакалаврська робота, Вінницький національний технічний університет]. <https://iq.vntu.edu.ua/repository/getfile.php/2052.pdf>
8. Barbar, M., Mallapragada, D. S., & Stoner, R. (2022). *Impact of demand growth on decarbonizing India's electricity sector and the role for energy storage* (Версія 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2203.12426>
9. Kratzenberg, M. G., Zürn, H. H., & Rüther, R. (2021). *A short review and discussion about the limiting factors, which can hold back wind and photovoltaic power*

plants from its presently exponential growth (Версія 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2112.10678>

10. В. В. Бевз. (2010). Енергоефективність підприємств харчової промисловості—Сучасний стан і стратегія розвитку. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 35, 15–17.

11. European Parliament. Directorate General for Internal Policies of the Union. (2020). *Energy-intensive industries: Challenges and opportunities in energy transition: in depth analysis*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2861/923519>

12. Структурні зміни та виклики в будівельній індустрії України: Аналіз та прогнози. (2024). [Аналітичний звіт]. Київська школа економіки. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02_09_24_Zvit_Strukturni_zmini_ta_vikliki_v_budivelnii--_industrii--.pdf

13. White, K., Habib, R., & Hardisty, D. J. (2019). How to SHIFT Consumer Behaviors to be More Sustainable: A Literature Review and Guiding Framework. *Journal of Marketing*, 83(3), 22–49. <https://doi.org/10.1177/0022242919825649>

14. Ebrahimzadeh-Afrouzi, M., & Ahmadchali, M. A. (2023). *Sustainability and coordination in a socially responsible supply chain using a combined incentive contract and a social marketing strategy* (Версія 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2301.06618>

15. Telgozhayeva, F., Arici, M., Kunelbayev, M., Tyulepberdinova, G., Spabekova, Z., Berdygulova, A., & Shaken, Y. (2023). A Mathematical Model of an Automated Control System for Heat Regulation in a Building. *WSEAS TRANSACTIONS ON SYSTEMS AND CONTROL*, 18, 231–242. <https://doi.org/10.37394/23203.2023.18.23>

16. Li, S., Zheng, X., Wang, X., Han, Z., Liu, H., & Stouffs, R. (2024). *Rethinking Building Energy Use from the Occupant Aspect*. Conference: Harmony in Architectural Science and Design: Sustaining the Future. The 57th International Conference of the Architectural Science Association 2024 (ASA 2024), Gold Coast, Australia.

17. Casian, C., Berger, C., Mahdavi, A., Pont, U., & Schuss, M. (2023). *Projected versus actual energy performance improvement due to thermal retrofit of buildings: A case study*. 020041. <https://doi.org/10.1063/5.0170903>
18. Buyak, N., & Sapunov, A. (2024). The level of thermal comfort in the transition and summer period for preschool educational institution. *Energy and automation*, 71(1), 167. [https://doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.167](https://doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.167)
19. Olaleye Okedara & Moradeyo Afolabi Odubiyi. (2024). The Role of Smart Buildings and Automated Energy Management Systems in Enhancing Building Energy Efficiency. *Energy Management Systems*. https://www.researchgate.net/publication/384107270_The_Role_of_Smart_Buildings_and_Automated_Energy_Management_Systems_in_Enhancing_Building_Energy_Efficiency
20. Kumar, P., Wright, B., & Petsou, A. (2024). Overheating in Historic Buildings in the UK: An Exploratory Study of Overheating Risks, Building Performance, and Thermal Comfort. *Heritage*, 7(9), 4829–4854. <https://doi.org/10.3390/heritage7090229>
21. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» (№ 2118-VIII, ухвалений 15 листопада 2024 року). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/2118-19?lang=uk#Text>
22. Vinnytsia National Technical University, Ratushnyak, G., Biks, Yu., & Lyalyuk, A. (2023). Organizational and technological influence factors which impact on the building envelopes energy efficiency. *Modern technology, materials and design in construction*, 33(2), 203–210. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-203-210>
23. Голубенко, О. О. (2024). *Оцінювання впливу поведінково-експлуатаційних факторів на рівень енергоефективності будівлі за допомогою динамічного моделювання* [Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»]. <https://ela.kpi.ua/items/fa4310f8-2ade-4652-be78-ee3a0ba0dad3>

24. ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель». (2021). Мінрегіон України. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996?doc_type=2

25. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування». (2013). Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України.

26. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання. (2020). Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості».

27. EN ISO 50001. Energy management systems—Requirements with guidance for use. (2018). Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

28. ДСТУ EN 15232-1:2017 Енергоефективність будівель. Частина 1. Вплив автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями. Модулі M10-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 (EN 15232-1:2017, IDT). (2017). ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості».

29. ДСТУ EN ISO 52016-1:2022 Енергоефективність будівель. Енергопотреби для опалення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплотою. Частина 1. Методики розрахунку (EN ISO 52016-1:2017, IDT; ISO 52016-1:2017, IDT). (2022). ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості».

30. ДСТУ CEN ISO/TR 52016-2:2022 Енергоефективність будівель. Енергопотреби для опалення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплотою. Частина 2. Пояснення та обґрунтування до стандартів ISO 52016-1 та ISO 52017-1 (CEN ISO/TR 52016-2:2017, IDT; ISO/TR 52016-2:2017, IDT). (2023). Технічний комітет стандартизації ТК 302 «Енергоефективність будівель і споруд».

31. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та

гарячого водопостачання. (2022). Технічний комітет стандартизації ТК 302 «Енергоефективність будівель і споруд».

32. ДСТУ Б А.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. (2015). ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК).

33. Олена Байда. (2023). Політики енергоефективності у країнах-членах ЄС. ГО «Інтерньюз-Україна». <https://internews.ua/storage/app/media/rang/2023%20event%20news/December/Report-Energy%20efficiency-in-EU-Countries.pdf>

34. *The European Green Deal*. (2019). European Comission. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

35. *Fit for 55*. (2021). European Comission. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/>

36. Directive 2012/27/EU of the european parliament and of the council. Official Journal of the European Union (2012). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012L0027>

37. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955. Official Journal of the European Union (2023). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L1791>

38. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union (2010). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>

39. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union (2010). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L0844>

40. Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council of 4 July 2017 setting a framework for energy labelling and repealing Directive 2010/30/EU. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32017R1369>

41. Commission Regulation (EU) 2019/2020 of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for light sources and separate control gears pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulations (EC) No 244/2009, (EC) No 245/2009 and (EU) No 1194/2012. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R2020>

42. *EN 16798-1:2019 Energy performance of buildings—Ventilation for buildings—Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.* (2019). The European Parliament And The Council.

43. *BS EN ISO 52000-1:2023-07-19 Energy performance of buildings—Overarching EPB assessment. Part 1: General framework and procedures.* (2023). Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

44. *EN 16798-3:2017 Energy performance of buildings—Ventilation for buildings—Part 3: For non-residential buildings—Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.* (2017). The European Parliament And The Council.

45. *EN 12831-1:2017 Energy performance of buildings—Method for calculation of the design heat load—Part 1: Space heating load.* (2017). The European Parliament And The Council.

46. *ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.* (2005). Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

47. Козик В. В., Марущак У. Д., & Марко О. Й. (2024). Оцінка енергоефективності в життєвому циклі об'єктів житлового будівництва. *Бізнес Інформ*, 5. <http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0001496946>

48. Осадча М. І. (2023). *Оцінювання енергетичної ефективності існуючих житлових будівель масової забудови при впровадженні енергозберігаючих заходів та їх вплив на клас енергетичної ефективності* [Магістерська дисертація, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»]. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a61102ec-cb23-496b-8fc9-879d7d894069/content>

49. Куян І.А.,. (2022). *Аналітична записка з питань порівняльного законодавства щодо відповідності положень Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» директивам Європейського Парламенту і Ради 2010/31/ЄС та 2012/27/ЄС*. <https://komsamovr.rada.gov.ua/uploads/documents/44071.pdf>

50. *Офіційний сайт програми сертифікації BREAM*. BREEAM. <https://breeam.com/>

51. *Офіційний сайт Passive House*. Passivhaus Institut. <https://passivehouse.com/>

52. *Офіційний сайт WUFI Passive*. WUFI® Passive. <https://wufi.de/en/software/wufi-passive/>

53. *Офіційний сайт USGBCI*. USGBCI. <https://www.usgbc.org/>

54. Шовкалюк, М.М., & Зіменко, С.В. (2018). Використання моделювання під час енергетичних аудитів будівель. *Молодий вчений*, 8(60), 344–352.

55. Bilous I. Y., Deshko V. I., & Sukhodub I. O. (2018). *Mathematical models for determination of specific energy need for heating used in Ukraine*. 2(1), 13–25.

56. I. Deshko, V., & Yu. Bilous, I. (2018). Mathematical Models for Determination of Specific Energy Need for Heating and Cooling of the Administrative Building. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 325–330. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19826>

57. Deshko V. I., Sukhodub I. O., & Yatsenko O. I. (2018). Building thermal state and technical systems dynamic modeling. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, 1, 36–46.

58. Deshko, V. I., Bilous, I. Y., & Maksymenko, O. E. (2019). Аналіз точкової індивідуальної термосанації огорожуючих конструкцій багатоквартирних

житлових будинків. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*, 0(4), 7–13. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175610>

59. Дешко, В.І., Білоус, І.Ю., & Крамаренко, С.О. (2020). Додаткові тепловтрати в місцях примикання віконної рами до огорожувальних конструкцій. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2, 36–43.

60. Deshko, V., Buyak, N., & Bilous, I. (2021). Thermomodernization of the school and change of the level of thermal comfort. *Energy and automation*, 3(55), 62–74. <https://doi.org/10.31548/energiya2021.03.062>

61. Bilous, I., Deshko, V., & Sukhodub, I. (2018). Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*, 20, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.021>

62. Офіційний сайт DesignBuilder. DesignBuilder Software Ltd. <https://designbuilder.co.uk/>

63. Офіційний сайт EnergyPlus. EnergyPlus. <https://energyplus.net/>

64. Дешко, В., Білоус, І., & Максименко, О. (2022). Вплив місцевого поквартирного регулювання систем опалення житлових будинків на енергоспоживання. *Technologies and Engineering*, 1, 20–31. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.1.2>

65. Kusuda, T. (1977). Fundamentals of Building Heat Transfer. *JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards*, 82(2), 97–106.

66. Kiavarz, H., Jadidi, M., & Esmaili, P. (2023). A graph-based explanatory model for room-based energy efficiency analysis based on BIM data. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1256921. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1256921>

67. Zhang, Y., Zhang, M., Gao, F., & Li, J. (2024). Experimental study on internal heat transfer among adjacent rooms for building energy efficiency with housing vacancy consideration. *Case Studies in Thermal Engineering*, 62, 105188. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105188>

68. Zhou, J., Yao, J., & Wang, R. (2023). Study of the Relationship Between Temperature Change and Energy Transfer in Thermodynamic Processes in Buildings.

Journal of Physics: Conference Series, 2660(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2660/1/012001>

69. Zhang, Y., Lu, J., Jiang, X., Shen, S., & Wang, X. (2021). A study on heat transfer load in large space buildings with stratified air-conditioning systems based on building energy modeling: Model validation and load analysis. *Science Progress*, 104(3), 00368504211036133. <https://doi.org/10.1177/00368504211036133>

70. Zhang, X., Shi, W., Yan, B., Malkawi, A., & Li, N. (2017). *Decentralized and Distributed Temperature Control via HVAC Systems in Energy Efficient Buildings* (Bepcĩa 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1702.03308>

71. Uddin, M. N., Wei, H.-H., Chi, H. L., & Ni, M. (2021). Influence of Occupant Behavior for Building Energy Conservation: A Systematic Review Study of Diverse Modeling and Simulation Approach. *Buildings*, 11(2), 41. <https://doi.org/10.3390/buildings11020041>

72. Hong, T., Yan, D., D'Oca, S., & Chen, C. (2017). Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. *Building and Environment*, 114, 518–530. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.006>

73. Bilous, I., & Holubenko, O. (2024). Energy consumption of the school under conditions of partial occupancy for different heating modes. *System technologies*, 1(150), 166–181. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-150-2024-17>

74. Delzendeh, E., Wu, S., Lee, A., & Zhou, Y. (2017). The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1061–1071. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.264>

75. Yan, D., O'Brien, W., Hong, T., Feng, X., Burak Gunay, H., Tahmasebi, F., & Mahdavi, A. (2015). Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges. *Energy and Buildings*, 107, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.032>

76. Delavar, T., Borgentorp, E., & Junnila, S. (2025). The Smart Buildings Revolution: A Comprehensive Review of the Smart Readiness Indicator Literature. *Applied Sciences*, 15(4), 1808. <https://doi.org/10.3390/app15041808>

77. Internet of Things based Smart Energy Management for Smart Home. (2019). *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 13(6). <https://doi.org/10.3837/tiis.2019.06.001>
78. Gholamzadehmir, M., Del Pero, C., Buffa, S., Fedrizzi, R., & Aste, N. (2020). Adaptive-predictive control strategy for HVAC systems in smart buildings – A review. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102480. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102480>
79. Dr. V. Kanimozhi & V. Sneha. (2024). The Role of Artificial Intelligence in Smart Homes. *IARJSET*, 11(6). <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2024.11648>
80. *International Weather for Energy Calculations*. [Dataset]. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/UKR_Ukraine/index.html#ID_KC_Kiev_City-
81. ДСТУ Б В.2.2-39:2016 *Методи та етапи проведення енергетичного аудиту будівель*. (2016). ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК).
82. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 *Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія*. (2010). ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК).
83. Valerii Deshko, Inna Bilous, Volodimer Vynogradov-Saltykov, Maryna Shovkaliuk, & Hanna Hetmanchuk. (2020). *Integrated Approaches to Determination of CO2 Concentration and Air Rate Exchange in Educational Institution*. 22, 82–104.
84. Michalak, P. (2022). Thermal—Airflow Coupling in Hourly Energy Simulation of a Building with Natural Stack Ventilation. *Energies*, 15(11), 4175. <https://doi.org/10.3390/en15114175>

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Deshko, V., Bilous, I., Buyak, N., Hetmanchuk, H., Hurieiev, M., & Odineca, T. (2025). Parametric Analysis of Heat Flows Through Building Envelope Considering Orientation, Massiveness, and Intermittent Heating Modes. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 27, 110–120. <https://doi.org/10.54740/ros.2025.010> (іноземне видання, включене до бази даних **Scopus** і **Web of Science**)
2. Deshko, V., Bilous, I., Hetmanchuk, H., & Hurieiev, M. (2024). Динамічні енергетичні баланси будівлі під впливом зміни теплоінерційних властивостей оболонки будівлі та режимів опалення. *Energy and Automation*, 6, 152–166. [https://doi.org/10.31548/energiya6\(76\).2024.152](https://doi.org/10.31548/energiya6(76).2024.152) (фахове видання)
3. Buyak, N., Deshko, V., Bilous, I., Gureev, M., & Holubenko, O. (2020). EN Assessment of the window replacement influence on building energy consumption and human thermal comfort on the basis of dynamic modeling. *Refrigeration Engineering and Technology*, 55(5–6), 282–292. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i5-6.1656> (фахове видання)
4. Deshko, V., Bilous, I., Buyak, N., & Gureev, M. (2020). Energy need dynamics estimation of mass-building buildings considering the exergetic model of heat comfort. *Energy and automation*, 1(47), 77–92. <https://doi.org/10.31548/energiya2020.01.077> (фахове видання)
5. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2024). Вентиляція як складова енергетичного динамічного балансу в будівлях. *Technologies and Engineering*, 1, 25–39. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.1.3> (фахове видання)
6. Дешко, В. І., Буяк, Н. А., Білоус, І. Ю., Гурєєв, М. В., & Голубенко, О. О. (2019). Вплив теплоінерційних особливостей огорожень на умови комфортності при впровадженні енергоощадних режимів опалення в будівлях. *Комунальне господарство міст*, 3(149), 44–50. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-3-149-44-50> (фахове видання)

7. Deshko, V. I., Buiak, N. A., Bilous, I. Y., Hurieiev, M. V., & Holubenko, O. O. (2019). Оцінка впливу заміни вікон на енергопотребу та умови комфорту в будівлі на основі динамічного моделювання. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*, 3, 52–62. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164428> **(фахове видання)**
8. Білоус, І. Ю., Гетманчук, Г. О., & Гурєєв, М. В. (2024). Оцінка енергоспоживання будівель на основі енергетичного моделювання з врахуванням мінливості природного повітрообміну. *Refrigeration Engineering and Technology*, 60(3), 205–214. <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.2950> **(фахове видання)**
9. Deshko, V., Bilous, I., Shovkaliuk, M., & Hurieiev, M. (2020, May 12-14). Evaluation of differentiated impact of apartment building occupants' behavior on energy consumption. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 196–200. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160046>
10. Buiak, N., Deshko, V., Bilous, I., Hurieiev, M., & Odineca, T. (2024, September 23-26). Parametric analysis of heat flows through building envelopes considering orientation, massiveness, and intermittent heating modes. *8th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering*, 239–248.
11. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2019, Травень 14-16). Аналіз впровадження регулювання системи опалення за допомогою енергетичного моделювання. *IX Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, 2, 183–185.
12. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2018, Квітень 17-19). Аналіз зміни енергопотреби будівлі при заміні вікон. *V Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'18*, 16.
13. Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2023, Травень 16-18). Використання програмного забезпечення EnergyPlus для визначення складової повітрообміну. *XV Науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» Присвячена 125-річчю КПІ*, 58–61.

14. Дешко, В. І., Буяк, Н. А., Білоус, І. Ю., Голубенко, О. О., & Гурєєв, М. В. (2019, Червень 4-5). Вплив теплоінерційних особливостей огорожень на умови комфортності під час впровадження енергоощадних режимів опалення житлових будівель. *II Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи»*, 2, 46–52.
15. Білоус, І. Ю., & Гурєєв, М. В. (2024, Квітень 23-26). Динамічне енергетичне моделювання для дослідження енергетичних балансів будівель. *XXI міжнародна науково-практична конференція молодих вчених і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»*, 1, 212–214.
16. Єщенко, О. І., & Гурєєв, М. В. (2018, Квітень 24-27). Енергоаудит системи опалення багатоквартирного будинку—Методика, ефективність результатів. *XVI Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»*, 2, 253.
17. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., Буяк, Н. А., & Гурєєв, М. В. (2019, Грудень 19). Оцінювання енергопотреб будівель на основі динамічних моделей та ексергетичній моделі теплового комфорту. *V Міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова «ПРЕАП-2019» «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК»*, 155–157.

ДОВІДКА

впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта
кафедри теплової та альтернативної енергетики
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ГУРСЄВА МАКСИМА ВЯЧЕСЛАВОВИЧА

В дисертаційній роботі Гурсєва М.В. досліджено вплив розподілених енергетичних потоків у будівлі, зокрема врахування природної вентиляції, інфільтраційних втрат та впливу конструктивних елементів на загальне теплове навантаження. Використані методи енергетичного моделювання на основі програм EnergyPlus та DesignBuilder дозволили оцінити варіанти величину перетоків між зонами/квартирами житлової будівлі для різних варіантів конструктивних особливостей та режимів експлуатації будівлі.

Розвинуті в роботі сучасні підходи до аналізу енергетичних балансів та теплових потоків через огорожувальні конструкції, з урахуванням орієнтації, масивності та переривчастих режимів опалення, що дозволили провести комплексний енергетичний аналіз для різних варіантів термомодернізації будівлі та режимів інженерних систем.

Отримані у дослідженні результати можуть бути використані ОСББ "Наш дім на Галана" для планування заходів з енергоефективності, в тому числі для налаштування роботи індивідуального теплового пункту, терморегуляторів системи опалення, що сприяє підвищенню комфорту мешканців та дозволить прогнозувати витрати на опалення для різних варіантів експлуатації сусідніх приміщень/квартир будинку.

Даний документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор ОСББ "Наш дім на Галана"





Кваліфікаційний центр "Центр підготовки енергоменеджерів навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту" Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", сертифікат про акредитацію кваліфікаційного центру №167, виданий Національним агентством кваліфікацій 19 квітня 2024 року

Адреса: 02000. Київ, вул. Борщагівська, 115/3, корпус №22, к.310.
Код ЄДРПОУ 02070921; тел.: +380442048643;
Email: tcmkpi2023@gmail.com; <https://tcm.kpi.ua/>

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта
кафедри теплової та альтернативної енергетики
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ГУРЄЄВА МАКСИМА ВЯЧЕСЛАВОВИЧА

У дисертаційній роботі Гурєєва М.В. проведено дослідження управління режимами опалення в будівлях, зокрема аналіз динамічних методів оцінки факторів впливу на енергетичну потребу на основі енергетичного моделювання. Розглянуто можливості оптимізації роботи систем опалення шляхом налаштування термостатів та впровадження адаптивних режимів, що враховують змінні експлуатаційні умови. Результати дослідження дозволяють більш якісно використовувати енергію в будівлях за умови врахування масивності та теплозахисних властивостей внутрішніх і зовнішніх огорожувальних конструкцій за постійних та переривчастих режимах роботи системи опалення, температурних режимів у суміжних приміщеннях тощо.

Розроблені в дисертації методичні підходи використані при створенні навчальних матеріалів для програм підготовки енергоаудиторів та експертів з енергоефективності будівель, організованих у Центрі підготовки енергоменеджерів (ЦПЕМ) навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Рекомендації щодо налаштування термостатів та оптимізації роботи опалювальних систем застосовуються у навчальному процесі для формування професійних компетентностей фахівців у сфері енергоефективності.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор ЦПЕМ НН ІЕЕ
КПІ імені Ігоря Сікорського
К.Т.Н., доц.,
EUREM UA-IEV-0001



Анатолій ЧЕРНЯВСЬКИЙ

Підпис засвідчує
Ташура В.Б.