

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

БІЛОУС ІННА ЮРІЇВНА

УДК 620.91: 697.1

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ В УМОВАХ
ДИНАМІЧНОЇ ЗМІНИ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРЕДОВИЩА**

05.14.01 – енергетичні системи та комплекси

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



І.Ю. Білоус

Науковий керівник : **Дешко Валерій Іванович**, доктор технічних наук, професор

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Білоус І.Ю. Оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" МОН України, м. Київ, 2019.

У вступі наведено актуальність теми, де обґрунтовано доцільність розвитку методів та підходів оцінки енергоефективності будівель. Сформовано мету, наукове завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, наведено дані про апробацію та публікації, окреслено особистий внесок здобувача, наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

В першому розділі проведено огляд сучасних тенденцій використання математичного моделювання енергетичного стану та визначення енергоефективності будівель. В загальному енергобалансі країни на функціонування житлово-комунального сектору витрачається найбільша кількість енергоносіїв, тепла енергія складає основну частину витрат. Для оцінки потенціалу енергоефективності будівель потребують адекватної моделі розрахунку з врахуванням комплексу показників, а саме теплофізичні та теплоінерційні особливості огорожень, умови мікроклімату, графіки експлуатації, кліматичні умови, система опалення та теплонадходження тощо, які впливають на питомі енергетичні характеристики (показник енергоефективності) будівлі є складною комплексною задачею, тому будівлю доцільно розглядати як складну систему в комплексі з зовнішнім середовищем. Математичні моделі можуть бути різного складності та часових інтервалів розрахунку, що спрощує / ускладнює модель.

В більшості розвинених країн оптимізація показників енергоефективності будівель виконується на стадії проектування. Враховуючи, що 80% будівель в Україні не відповідає сучасним нормам, тому аналіз показників енергоефективності проводиться на стадії експлуатації для вже діючих будівель, що має свої особливості. Світові тенденції розрахунку питомої енергопотребі будівлі (показник енергоефективності) направлені на зменшення часових інтервалів (наприклад, година). Гармонізація кращих європейських підходів з умовами України - є одним з основних кроків. Динамічні моделі на базі програмних продуктів та стандартів, які широко використовуються провідними енергоефективними країнами світу, достатньо досліджені для їх кліматичних умов. Таких системах порівнянь для будівель, які знаходяться в зоні різкоконтинентального клімату (кліматичні умови України) проведено не було.

У другому розділі описані методики визначення енергопотребі та перерахунку кліматичних даних до параметрів, які враховуються у математичних моделях (сонячні теплонадходження, кратність повітрообміну). Енергопотреба будівель на опалення та/або охолодження може визначатися на основі стаціонарних (розрахунок для річних інтервалів), квазістаціонарних (помісячних інтервалів) та динамічних (погодинних інтервалів) методів. В роботі розглянуті існуючі математичні моделі визначення енергетичних характеристик будівель та запропоновані авторські динамічні моделі.

В умовах ефективного використання енергоносіїв (регулювання опалення) потреба в опаленні повинна розраховуватися з урахуванням погодинної зміни кліматичних характеристик, що не можливо реалізувати в стаціонарних моделях. В Україні все ширшого застосування набувають динамічні моделі визначення енергетичних характеристик будівель, які потребують використання погодинних кліматичних даних.

Проведено порівняльний аналіз особливостей застосування різних кліматичних база даних для різних інтервалів усереднення. В будівельній кліматології України наведено середньомісячні значення зовнішньої температури повітря та сонячних теплонадходжень на вертикальні та горизонтальну поверхні,

що є достатнім при стаціонарному та квазістаціонарному методі розрахунку. Нормативної погодинної кліматології в Україні не існує. Міжнародних кліматичний файл IWEC включає в погодинні дані. Сонячні теплонадходження представлені в даному файлі потребують методик та підходів перерахунку на вертикальні поверхні. В роботі розглянуто кліматичні дані для міст Києва та Одеси, що є усередненою характеристикою двох температурних зон України. Відмінність становить близько 40% в зимовий період та 30% в літній для Києва. Для Одеси дана розбіжність становить до 50%.

Перевірка адекватності моделей, що розглядаються в роботі проведена для визначення енергопотреб будівлі для холодного періоду року та для визначення внутрішньої температури повітря в приміщенні для теплого періоду року. Розбіжність розглянутих моделей з перевірочними становить менше 5%, що є адекватною оцінкою та прийнятною розбіжністю для їх застосування.

В третьому розділі проведено порівняння методик визначення енергопотреб будівлі для різних температурних зон. Визначено особливості використання розглянутих методик та застосування різних часових інтервалів усереднення вихідних параметрів, як впливовий параметр на результати дослідження. Динамічні методи E+ та 5R1C (погодинний розрахунок) дають майже однакове значення потреби для опалення, відмінність до 4-8%, в режимі охолодження – до 16-18% з даними кліматології IWEC. Порівняння цих даних для періоду опалення з результатами стаціонарного за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 та квазістаціонарного за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 методів розрахунку, в яких використані дані будівельної кліматології України, дає відмінність до 15% та 15-25%, відповідно, а для охолодження за квазістаціонарним методом 20-30%.

Проведено аналіз часової зміни кліматичних даних та інших параметрів, виконано ряд імітаційних моделювань в обраному діапазоні зміни впливових параметрів (рівень опалення, сонячні теплонадходження, зовнішня температура, кратність повітрообміну, що суттєво впливають на внутрішню температуру повітря. На основі імітаційного моделювання, почергової зміни обраних параметрів в розглянутому діапазоні, побудовані багатофакторні рівняння регресії

для прогнозування внутрішньої температури повітря та/або рівня опалення. Середнє арифметичне відхилення внутрішньої температури повітря складає $0,4^{\circ}\text{C}$ з отриманим на базі імітаційного, а максимальна розбіжність результатів до 1°C . При використанні лінійної багатофакторної моделі, середнє значення відхилення складає $0,6^{\circ}\text{C}$, а максимальне $1,7^{\circ}\text{C}$ в порівнянні з імітаційним моделюванням.

Розробленні методичні основи та створенні математичні моделі для прогнозування та регулювання рівня опалення на основі регресійного аналізу та врахування передісторії впливу чотирьох груп внутрішніх та зовнішніх факторів впливу. Для трьох днів передісторії лінійна багатофакторна регресійна модель потребує визначення 13 коефіцієнтів рівняння регресії. Нелінійна багатофакторна регресія дозволяє використовувати один коефіцієнт при кожному з впливових параметрів незалежно від кількості днів врахування передісторії зміни параметру, для визначення яких достатньо по одному модельному експерименту.

В четвертому розділі розглянуто моделювання переривчастих режимів опалення будівлі ВНЗ розташованої в м. Києві на базі імітаційної динамічної моделі будівлі в EnergyPlus. Встановлено економію від провадження регулювання та особливості функціонування будівлі як енергетичної системи з переривчастим опаленням (пониженням температури повітря в приміщеннях в неробочі години). Впровадження постійного пониження температури повітря в неробочі години для розглянутого типу конструкцій та зовнішніх умов стабілізація графіка зміни внутрішньої температури повітря досягається на 6-8 день, для розглянутого діапазону пониження рівня опаленням в неробочі години, при цьому знижується внутрішньої температура повітря на $1,5\text{--}2^{\circ}\text{C}$. Для уникнення просідання температури повітря в робочі години потрібно збільшувати рівень опалення в робочі години.

При щоденному пониженні температури повітря в приміщенні на $\{2; 3; 4\}^{\circ}\text{C}$ в неробочі години дозволяє заощадити $\{2; 6; 8\}\%$ тепла, відповідно. При переривчастому режимі опалення за розігріву системи опалення перед початком робочих годин для пониження температури на $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$ в неробочі години від базового, досягається економія $\{5; 7; 9\}\%$, відповідно. Загалом форсування

системи опалення перед початком робочих годин дозволяє збільшити економію на 2% в порівнянні з аналогічним графіком пониження температури в неробочі години без форсування системи опалення.

Для цього ж об'єкту проведено експериментально-розрахункове визначення інтегральних та розосереджених характеристик теплового та енергетичного стану будівлі. На базі багаторічних спостережень (2003-2017 рр.) вперше отримано дані по розподілу температур в приміщеннях багатоповерхової будівлі навчального корпусу в залежності від їх розташування, використання та забезпечення рівня опалення. Сіре моделювання дозволяє проводити аналіз шляхом поєднання розрахункових та експериментальних даних. Кратність повітрообміну параметр, який складно визначати експериментально, тому на основі створеної багатофакторної регресійної моделі та фактичних значень внутрішньої температури, рівня опалення, сонячних теплонадходжень можна уточнювати кратність повітрообміну. Для розглянутого інтервалу часу кратність повітрообміну знаходилась в діапазоні $0,2 \dots 2 \text{ год}^{-1}$ для обраних приміщень, на базі розрахункових методів ASHRAE діапазон зміни аналогічний.

Для групи громадських будівель проведено аналіз енергетичної ефективності (на основі квазістаціонарного методу) та виходячи з особливостей розташування та функціонування запропоновані підходи до енергетичної сертифікації та побудови шкал. При побудові шкали енергетичної сертифікації будівель на розкид меж класів енергоефективності впливає співвідношення фактичних та нормативних значень енергоспоживання. Запропоновані підходи визначення реперних точок для побудови шкал енергетичної сертифікації будівель з врахуванням особливостей їх функціонування та розміщення.

Результати передано до використання ДП "Державний науково дослідний інститут будівельних конструкцій", Українським фондом соціальних інвестицій, службою енергетичного менеджменту Сумського державного університету та Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (КПІ ім.Ігоря Сікорського), а також у навчальному процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського на кафедрі теплотехніки та

енергозбереження. Отримано акти в провадження та свідоцтва авторського права на методики.

Ключові слова: математична модель, енергопотреба, енергоефективність, будівлі, температура, теплонадходження, кліматологія, енергетична сертифікація.

ABSTRACT

Bilous I.Yu. Estimation of building energy efficiency in conditions of environment characteristics dynamic change. - Manuscript.

The dissertation on completion of the candidate of technical sciences degree on specialty 05.14.01 - Energy systems and complexes. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The introduction introduces the relevance of the topic where the feasibility of developing methods and approaches for assessing the energy efficiency of buildings is substantiated. The purpose, scientific task, object, subject and methods of research have been formed, the scientific novelty and practical value of the obtained results have been determined, the data on testing and publications are given, the personal contribution of the applicant is outlined, the acts of implementation of the results of the dissertation work are presented.

In the first section, an overview of the current trends in the use of mathematical modeling of the energy status and the determination of energy efficiency of buildings. In the overall energy balance of the country, the housing and utilities sector consumes the largest amount of energy, and thermal energy accounts for the bulk of the costs. In order to assess the energy efficiency of buildings, an adequate model of calculation, taking into account a set of indicators, is needed, in particular, thermophysical and heat-inertial features of fencing, microclimate conditions, operating schedules, climatic conditions, heating and heat supply systems, etc., which influence the specific energy characteristics (energy efficiency index) of the building is difficult a complex task, therefore the building should be regarded as a complex system in conjunction with the

external environment. Mathematical models can have different complexity and time intervals of calculation, which simplifies / complicates the model.

In most developed countries, optimization of energy efficiency indicators of buildings is carried out at the design stage. Given that 80% of buildings in Ukraine do not meet current standards, the analysis of indicators of energy efficiency is carried out at the stage of operation for existing buildings, which has its own characteristics. World trends in calculating the specific energy demand of a building (energy efficiency indicator) are aimed at reducing time intervals (for example, an hour). Harmonization of the best European approaches to the conditions of Ukraine - is one of the main steps. Dynamic models based on software products and standards that are widely used by leading energy-efficient countries in the world are sufficiently explored for their climatic conditions. Such systems of comparison for buildings in the zone of a highly content climate (climate conditions of Ukraine) were not carried out.

The second section describes the methods for determining the energy demand and converting climatic data to the parameters that are taken into account in mathematical models (solar heat transfer, multiplicity of air exchange). The energy needs of buildings for heating and / or cooling can be determined on the basis of stationary (calculation for annual intervals), quasi-stationary (monthly intervals) and dynamic (hourly intervals) methods. Existing mathematical models of determination of energy characteristics of buildings and proposed author dynamic models are considered in this work.

In the conditions of efficient use of energy resources (heating regulation), the need for heating should be calculated taking into account hourly changes in climatic characteristics that can not be realized in stationary models. In Ukraine, more and more applications are being acquired by dynamic models for determining the energy performance of buildings that require hourly climatic data.

A comparative analysis of the peculiarities of the application of different climatic databases for different averaging intervals has been carried out. In the building climate of Ukraine, the average monthly values of the external air temperature and solar heat consumption on the vertical and horizontal surfaces are given, which is sufficient in the stationary and quasi-stationary method of calculation. Normative hourly climatology in

Ukraine does not exist. The IWEC International Climatic File includes hourly data. Solar heat supply presented in this file requires methods and approaches for converting to vertical surfaces. The paper considers climatic data for the cities of Kiev and Odessa, which is averaged characteristic of two temperature zones of Ukraine. The difference is about 40% in the winter and 30% in summer for Kyiv. For Odesa this discrepancy is up to 50%.

The adequacy of the models considered in the work is carried out to determine the energy demand of the building for the cold period of the year and to determine the indoor air temperature in the room for the warm period of the year. The discrepancy of the reviewed models with the verifications is less than 5%, which is an adequate assessment and acceptable disagreement for their application.

In the third section, a comparison of the methods for determining the energy demand of the building for different temperature zones is made. The peculiarities of the use of the considered methods and application of various time intervals of the averaging of the initial parameters as an influential parameter on the research results are determined. Dynamic methods E + and 5R1C (hourly calculation) give almost the same value of the need for heating, the difference to 4-8%, in cooling mode - up to 16-18% with climatic data IWEC. Comparison of these data for the heating period with the results of stationary according to DSTU-N Б A.2.2-5: 2007 and quasi-stationary DSTU B A.2.2-12: 2015 calculation methods, in which the data of the Ukrainian climatic data are used, gives a difference of up to 15% and 15 -25%, respectively, and for cooling by a quasi-stationary method of 20-30%.

The analysis of temporal changes in climatic data and other parameters, a series of simulation simulations in the chosen range of changes in the influence parameters (level of heating, solar heat transfer, external temperature, multiplicity of air exchange, which essentially affects the internal air temperature) is performed on the basis of simulation modeling, alternating change of the selected parameters. In the considered range, multi-factor regression equations for predicting the internal air temperature and / or heating level are constructed. the deviation of the internal air temperature is 0.4 ° C with the obtained simulation, and the maximum difference of the results to 1 ° C. When using a

linear multifactorial model, the average deviation value is 0.6°C , and the maximum 1.7°C in comparison with simulation simulation.

The development of methodological foundations and the creation of mathematical models for forecasting and regulating the level of heating on the basis of regression analysis and taking into account the background of the influence of the four groups of internal and external factors of influence. For the three days of the prehistory, the linear multivariable regression model requires the determination of 13 coefficients of the regression equation. Nonlinear multifactor regression allows one factor to be used for each of the influential parameters irrespective of the number of days into the history of the change of the parameter, which is sufficient to determine which one model experiment.

In the fourth section the simulation of intermittent heating modes of the building of the university located in Kyiv based on the simulation dynamic model of the building in EnergyPlus is considered. Saving from the regulation and features of functioning of the building as an energy system with intermittent heating (lowering the air temperature in premises during non-working hours) is established. The introduction of constant decrease of air temperature during non-working hours for the considered type of structures and external conditions stabilizes the schedule of changes in the internal air temperature reaches 6-8 days, for the considered range of lowering the level of heating during non-working hours, while reducing the internal air temperature by $1.5\text{-}2^{\circ}\text{C}$. To avoid falling air temperature during working hours, it is necessary to increase the heating level during working hours.

With daily lowered room temperature on $\{2; 3; 4\}^{\circ}\text{C}$ during non-working hours can save $\{2; 6; 8\}\%$ of heat, respectively. At intermittent heating mode heating of the heating system before the start of working hours to reduce the temperature by $3\text{-}4^{\circ}\text{C}$ in non-working hours from the base, savings are achieved $\{5; 7; 9\}\%$, respectively. In general, boosting the heating system before working hours allows you to increase the economy by 2% compared to a similar schedule of lowering the temperature in non-working hours without boosting the heating system.

For the same object, an experimental and calculation determination of the integral and dispersed characteristics of the thermal and energetic state of the building has been carried out. On the basis of long-term observations (2003-2017), for the first time, data were obtained on the distribution of temperatures in the premises of a multistory building of an educational building, depending on their location, use and provision of heating. Gray modeling allows you to analyze by combining calculation and experimental data. The multiplicity of the air exchange parameter, which is difficult to determine experimentally, therefore, the multiplicity of air exchange can be specified on the basis of the created multi-factor regression model and the actual values of the internal temperature, the level of heating, and solar heat transfer. For the considered time interval, the multiplicity of air exchange was in the range of $0.2 \dots 2 \text{ h}^{-1}$ for the selected premises, based on the ASHRAE calculation methods, the range of change is similar.

For the group of public buildings, an analysis of energy efficiency (based on the quasi-stationary method) and based on the location and operation features, proposed approaches to energy certification and scale construction. When constructing a scale of energy certification of buildings, the ratio of actual and normative values of energy consumption affects the spread of energy efficiency classes. The approaches of determining the reference points for construction of scale of energy certification of buildings with consideration of peculiarities of their functioning and placement are offered.

The results were submitted to the use of the State Research Institute of Building Structures, the Ukrainian Social Investment Fund, the Energy Management Service of Sumy State University and the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", as well as in the educational the process of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute at the Department of Heating Engineering and Energy Saving. Obtained acts in the proceedings and certificates of copyright in the methodology.

Key words: energy need, energy efficiency, buildings, mathematical model, temperature, heat gains, climatology, energy certification.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Білоус І.Ю., Дешко В.І., Сплавська В.О., Суходуб І.О., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. Управління ефективністю енерговикористання у вищих навчальних закладах: монографія / під заг. ред. В.І. Дешка. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 186с. **(колективна монографія)**. *(Здобувач провів класифікацію програмних продуктів для аналізу енергетичних характеристик будівлі або групи будівель)*
2. DESHKO V., SUKHODUB I., BILOUS I. Mathematical models for determination of energy need for heating. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, 2017. Vol. 2. P. 45-51. **(іноземне видання)**. *(Здобувачу належить розробка моделей для визначення енергопотреби будівлі)*
3. Deshko V.I., Bilous I.Yu. Mathematical models for determination of specific energy need for heating and cooling of the administrative building. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.3). P. 325-330. **(іноземне видання, включене до бази даних Scopus)**. *(Здобувачем проведено порівняння методик визначення питомої потреби на опалення та охолодження для південного регіону України)*
4. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 8. P. 65–75. **(іноземне видання, включене до бази даних Scopus)**. *(Здобувач провів параметричний аналіз впливу внутрішніх та зовнішніх впливових параметрів на внутрішню температуру повітря)*
5. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20. P. 327-336. **(іноземне видання, включене до бази даних Scopus)**. *(Здобувачем створено нелінійну багатофакторну регресійну залежність для прогнозування рівня опалення та/або внутрішньої температури повітря в будівлі)*

6. DESHKO V., SUKHODUB I., BILOUS I. Mathematical models for determination of specific energy need for heating used in Ukraine. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*. 2018. Vol. 1. P. 13-25. **(іноземне видання)**. (Здобувачем проведено порівняння застосування різних підходів визначення питомої потреби на опалення в м. Києві)

7. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гончарук С.М., Гурська Ю.В. КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЛІ. *The scientific heritage*. 2017. Vol. 9. P. 63-68. **(іноземне видання)**. (Здобувачем проведено комплексне дослідження кратності повітрообміну для репрезентативних приміщень будівлі ВНЗ)

8. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. 2014. № 80. С. 68 – 72. **(фахове видання)**. (Здобувачем проведено огляд математичних моделей будівель, що використовуються для оцінки енергоспоживання)

9. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2017. №4. С. 67-73. **(фахове видання, включене до бази даних Index Copernicus)**. (Здобувач провів порівняння кліматичних баз даних для України)

10. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Моніторинг температурного стану навчального корпусу. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2015. №2. С. 24-32. **(фахове видання, включене до бази даних Index Copernicus)**. (Здобувач провів збір та аналіз фактичних інтегральних та локальних характеристик температурного стану навчального корпусу)

11. Дешко В.І., Шевченко О.М., Красовський О.П., Білоус І.Ю. Енергетична сертифікація будівель закладів соціальної сфери. *Науково-технічний, виробничий та інформаційно-аналітичний журнал «Наука та будівництво»*. 2016. №2. С. 14-20. **(фахове видання)**. (Здобувачем запропоновано шкалу для енергетичної сертифікації громадських будівель)

12. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Суходуб І.О. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на внутрішню температуру огорожень будівлі. *Журнал "Вісник КНУТД"*. 2015. №5(90). С. 24-31. **(фахове видання, включене до бази даних Ulrich's Periodical Directory)**. *(Здобувачем досліджено сумісний вплив сонячної радіації та власного теплового випромінювання стін на внутрішню температуру огорожень)*

13. Дешко В.І., Буяк Н.А., Білоус І.Ю. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. *Журнал "Вісник КНУТД"*. 2015. №5(90). С. 71-80. **(фахове видання, включене до бази даних Ulrich's Periodical Directory)**. *(Здобувачем створено математичну модель для дослідження комфортних умов у будівлі)*

14. Соловей О.І., Шевченко О.М., Білоус І.Ю. Оцінка рівня ефективності енергоспоживання об'єктів житлового комплексу (на прикладі гуртожитків НТУУ «КПІ»). *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. 2013. № 77. С. 293-297. **(фахове видання)**. *(Здобувачем запропоновано використовувати підхід групування при оцінці енергоефективності гуртожитків)*

15. Шовкалюк М.М., Білоус І.Ю. Аналіз енергетичних і математичних показників і балансів навчального закладу з розробкою енергетичних заходів. *Науково-практичний журнал "Екологічні науки"*. 2014. №1(5). С. 108-115. **(фахове видання)**. *(Здобувачем розроблено комплекс енергозберігаючих заходів виходячи з енергетичних балансів)*

16. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Моделювання режимів опалення приміщень. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2016. №3 С. 97-104. **(видання, включене до бази даних Index Copernicus)**. *(Здобувачем проведено динамічне моделювання різних режимів опалення)*

17. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Євтухов В.Я., Білоус І.Ю., Красовський О.П. Досвід впровадження міжнародного інвестиційного проекту з підвищення енергоефективності об'єктів соціальної сфери. *Науковий вісник "Економіка і регіон"*. 2015. №6(55). С. 59–63. *(Здобувачем встановлено особливості*

впровадження міжнародного інвестиційного проекту з підвищення енергоефективності громадських будівель для різних регіонів України)

18. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Жижа М.І. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на рівень опалення приміщення. *Международный научно-практический журнал "Керамика: наука и жизнь"*. 2015. №4(29). С. 34–40. *(Здобувачем проведено моделювання сумісного впливу сонячної радіації та власного теплового випромінювання на рівень опалення приміщень)*

19. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Bilous I.Yu. Mathematical models for determination of energy need for heating. *II International Scientific-Technical Conference "Actual Problems Of Power Engineering, Construction And Environmental Engineering"* (23-25 November 2017, Kielce, Poland). Kielce: Kielce University of Technology, 2017. P. 33-40. *(Здобувачем розроблено математичні моделі визначення енергопотреби на опалення для України)*

20. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Бази кліматичних і погодних даних для визначення енергетичних характеристик будівель. Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Буд-Майстер-Клас-2017» (28.11-01.12.2017, Київ). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2017. С. 80-81. *(Здобувачем розроблена динамічна модель кімнати для визначення енергетичних характеристик)*

21. Bilous I., Hetmanchuk H. Use of climatic databases for determining the energy need of heat buildings. *International Internet Conference "Scientific Results Of 2017"* (15.12.2017, Vinnitsa). Vinnitsa, 2017. P. 14-16. *(Здобувачем проаналізовані методики перерахунку кліматичних даних до кінцевих параметрів впливу в зоні кімнати)*

22. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гурєєв М.В. Аналіз зміни енергопотреби будівлі при заміні вікон. V Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'18 (17-19 квітня 2018 р., м.Київ). Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2018. С. 16. *(Здобувачем досліджено різні типи енергозберігаючих вікон та вплив їх на енергопотребу будівлі)*

23. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Визначення кратності повітрообміну в залежності від зовнішніх та внутрішніх факторів. Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання.» (26-27 квітня 2018 р., Тернопіль). Тернопіль: ТНТУ, 2018. С. 81-82. *(Здобувачу належить аналіз методик визначення кратності повітрообміну в будівлі)*

24. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Динамічні моделі для визначення енергопотреб на охолодження будівель. Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (24-27 квітня 2018 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТЕФ, 2018. С. 184. *(Здобувачем досліджено динамічні режими охолодження для громадських будівель)*

25. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Голубенко О.О. Динамічні методи розрахунку у будівництві та поширені технології утеплення. Міжнародна науково-практична конференція "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем" (10 - 12 травня 2018 р., м. Чернігів). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 105-107. *(Здобувачем досліджено теплоінерційні особливості утеплення для різних типів будівель та утеплювачів)*

26. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі для визначення питомої енергопотреб на опалення та охолодження адміністративної будівлі. Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту» (14-16 травня 2018р., м. Харків). Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 89-91. *(Здобувачем створено математичні моделі кімнати для дослідження енергопотреб будівель в опаленні та/або охолодженні з річним, помісячним та погодинним кроками розрахунку)*

27. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гурська Ю.В. Дослідження підходів визначення енергопотреб будівель. Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (25-28 квітня 2017 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря

Сікорського, ТЕФ, 2017. С. 175. *(Здобувачем проведено аналіз методик визначення енергопотреб в Україні)*

28. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гурська Ю.В. Порівняння методів визначення енергопотреб будівель в опаленні. Іх міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» (25-26 травня 2017 р., м.Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2017. С. 129-133. *(Здобувачем проведено моделювання енергопотреб репрезентативних приміщень)*

29. Басок Б.І., Дешко В.І., Гончарук С.М., Білоус І.Ю. Вплив сонячної радіації на тепловий стан будівлі. *Промышленная теплоэнергетика*. 2017.№7. С. 49. *(Здобувачем проаналізовано рівень сонячних теплонадходжень в зону будівлі)*

30. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Жижа М.І. Моделювання переривчастого опалення будівель. XIV Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (18-21 квітня 2016 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТЕФ, 2016. С. 202. *(Здобувачем проведено аналіз глибини пониження температури повітря в кімнаті в неробочі години)*

31. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Жижа М.І. Моделювання переривчастого опалення будівель. Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» (1-3 червня 2016 р., м. Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2016. С. 185-190. *(Здобувачем проведено оцінку економії енергоресурсів при впровадженні переривчастих режимів опалення будівлі)*

32. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Шевченко О.М. Шкала визначення класу енергоефективності для закладів соціальної сфери. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та студентів "Еколого-енергетичні проблеми сучасності" (14 квітня 2016 р., Одеса). Одеса: ОНАХТ, 2016. С. 71–73. *(Здобувачем проведено аналіз підходів визначення класу енергоефективності будівель)*

33. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гурська Ю.В. До застосування регресійного аналізу для прогнозування енергоспоживання будівель. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан

та перспективи розвитку – REIMS'16» (30 травня-1 червня 2016 р., м.Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, С. 77. *(Здобувачем проведено аналіз впливовості факторів на прогноз енергоспоживання будівлі)*

34. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Фактори температурних режимів приміщень в енергетичному менеджменті громадських будівель. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REIMS' 15» (19-21 травня 2015 р., м. Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2015. С. 28. *(Здобувачем проведено дослідження температурних режимів приміщень навчального корпусу)*

35. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Суходуб І.О. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на внутрішню температуру огорожень приміщення. Міжнародна конференція "Проблеми промислової теплотехніки" (20-23 жовтня 2015 р., м. Київ). Київ: ІТТФ, 2015. С. 110-111. *(Здобувачем проведено дослідження впливу власного теплового випромінювання огорожень на внутрішню температур повітря в кімнаті)*

36. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Євтухов В.Я., Красовській О.П., Білоус І.Ю. Досвід впровадження міжнародного інвестиційного проекту з підвищення енергоефективності об'єктів соціальної сфери. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасні інноваційно-інвестиційні механізми розвитку національної економіки» (27 листопада 2015 р., м. Полтава). Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, 2015. С. 138-139. *(Здобувачем проведено оцінку економії енергоресурсів від провадження енергозберігаючих заходів)*

37. Білоус І.Ю., Дешко В.І., Шовкалюк М.М. Підвищення енергоефективності навчального закладу. Международная научно-практическая конференция «Энергосберегающие технологии теплогазоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры» (23-22 ноября 2013, Харьков). Харьков: ХНУГХ им. А.Н.Бекетова, 2015. С. 90. *(Здобувачем проведено аналіз особливостей впровадження енергозберігаючих заходів в навчальному закладі)*

38. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. Всеукраїнська науково-технічна конференція

«Енергоефективність у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання»(5 березня 2014 р., м.Київ). Київ: НДІБК, 2014. С. 68–72. *(Здобувачем проведено аналіз діючих методів визначення енергопотреб будівель в Україні)*

39. Шовкалюк М.М., Белоус І.Ю. Практический пример анализа энергетических и материальных показателей и балансов зданий учебного заведения с разработкой энергосберегающих мероприятий. Международный форум для устойчивого развития бизнеса "GREEN MIND" (15-17 октября 2013 г., Киев.). Киев: Торгово-промышленная палата Украины, 2013. С.120. *(Здобувачем проведено аналіз балансів будівлі до та після впровадження енергозберігаючих заходів)*

40. Bilous I., Shovkaluyk M., Shevchenko E. Study level energy efficiency for public sector agencies. International Green Energy Conference (IGEC-8) (17-19 June, 2013., Kyiv). Kyiv: NAY, 2013. P.230-231. *(Здобувачем досліджено підходи оцінки енергоефективності громадських будівель)*

41. Білоус І.Ю., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. Дослідження рівня ефективності енерговикористання. Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (16-19 квітня 2013 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТЕФ, 2013. С. 162. *(Здобувачем проведено енергетичну сертифікацію будівель для визначення ефективності енерговикористання)*

42. Шовкалюк Ю.В., Білоус І.Ю. Аналіз впливу на повітряне середовище поквартирних систем опалення. Всеукраїнська наукова конференція студентів, магістрів та аспірантів "Сучасні проблеми екології та геотехнології". (23-25 березня 2011р., Житомир). Житомир. С. 85. *(Здобувачем проаналізовано температурний стан приміщень багатоквартирного житлового будинку)*

43. Шовкалюк М.М., Білоус І.Ю. Використання в навчальному процесі програмних продуктів з енергетичної сертифікації будівель. Всеукраїнська студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання.» (20 березня 2012 р., Тернопіль). Тернопіль: ТНТУ,

2012. С. 111. *(Здобувачем проведено огляд програмних продуктів для енергетичної сертифікації будівель)*

44. *Свідотство про реєстрацію авторського права. Нелінійні багатофакторні регресійні залежності для прогнозування внутрішньої температури повітря в адміністративній будівлі та параметричний аналіз зовнішніх та внутрішніх факторів впливу" / І.Ю. Білоус, В.І. Дешко. – № 79449; заявл. 11.05.2018; зареєстр. 31.05.2018. (Здобувачем запропоновано методику побудови нелінійних багатофакторних моделей для прогнозування енергетичних характеристик будівлі)*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	24
ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ	32
1.1 Рівень енергоефективності житлово-комунального комплексу.....	32
1.2 Напрямки впливу на споживання енергії	33
1.3 Будівля як складна енергетична система.....	38
1.4 Використання моделювання при визначенні та підвищенні енергоефективності будівель	43
1.5 Вибір та розробка моделей для моделювання теплового стану будівель	48
Висновки та постановка завдань дослідження.....	62
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ТА ЕНЕРГОПОТРЕБИ БУДІВЕЛЬ.....	64
2.1 Об'єкти аналізу та моделювання.....	64
2.2 Математичні моделі для визначення енергопотреби будівлі на опалення	69
2.2.1 Модифікації динамічних сіткових моделей з EN 13790	77
2.2.2 Математичні моделі на базі програмного продукту EnergyPlus	81
2.3 Методи адаптації даних кліматичних баз використання в математичних моделях.....	83
2.4 Порівняння даних кліматології IWEC і діючої в Україні кліматології	91
2.5 Тестування та верифікація моделей	95
Висновки до розділу	98
РОЗДІЛ 3 ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДО АНАЛІЗУ ЗОВНІШНІХ ТА ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СТАН БУДІВЛІ ДЛЯ РІЗНИХ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ	100
3.1 Порівняння математичних моделей для визначення енергопотреби будівель.....	100
3.2 Моделі сумісного впливу сонячної та теплової радіації.....	113

3.2.1	Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на температуру внутрішніх поверхонь огорожень будівлі.....	114
3.2.2	Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на рівень опалення приміщення	117
3.3	Багатофакторні регресійні залежності для визначення часових змін енергетичних характеристик будівель	121
3.3.1	Дослідження факторів, які мають вагомий вплив на зміну внутрішньої температури повітря.....	122
3.3.2	Дослідження впливу зміни температури внутрішнього повітря під впливом різних факторів.....	129
3.4	Побудова регресійних моделей	132
3.4.1	Лінійна багатофакторна регресійна залежність для прогнозування внутрішньої температури повітря	133
3.4.2	Нелінійна багатофакторна регресійна залежність для прогнозування внутрішньої температури повітря	136
3.4.3	Нелінійна багатофакторна регресійна залежність для прогнозування рівня опалення	145
	Висновки до розділу	147
	РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ	150
4.1	Моделювання теплового стану енергетичної системи будівлі при переривчастому опаленні	150
4.1.1	Зниження температури в неробочі години	151
4.1.2	Введення форсування системи опалення перед початком робочих годин ..	155
4.1.3	Визначення економії теплової енергії від регулювання рівня теплонаджоджень	156
4.2	Експериментально-розрахункове визначення інтегральних та розосереджених характеристик енергетичного стану та енергетичної ефективності будівлі навчального корпусу ВНЗ	158

4.2.1	Опис експериментальної методики визначення температурних показників будівлі.....	158
4.2.2	Результати обробки температурних карт	159
4.2.3	Результати вимірювання часових температурних характеристик репрезентативних приміщень	163
4.2.4	Добові зміни зовнішньої температури та аналіз	166
4.2.5	Розосередження теплонадходження системи опалення будівлі	168
4.2.6	Визначення кратності повітрообміну.....	170
4.3	Енергетична сертифікація громадських будівель.....	174
4.3.1	Характеристика об'єктів соціальної сфери	175
4.3.2	Задачі сертифікації та оцінка рівня енергоефективності заходів з енергозбереження.....	181
4.7.3	Побудова шкали енергоефективності	185
4.4	Використання динамічних моделей для прогнозування рівня опалення будівлі ВНЗ	190
	Висновки до розділу	193
	ВИСНОВКИ.....	197
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	199
	Додаток А.....	218
	Додаток Б.....	225
	Додаток В	227
	Додаток Г	228

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ВЕМ - енергетичні моделі будівель;
- ВEMS - системи енергетичного менеджменту будівель;
- ВІМ - інформаційні моделі будівель;
- СDD - охолоджувальні градусо-дні;
- EN - Європейські норми;
- EP - програмний продукт EnergyPlus;
- HDD - опалювальні градусо-дні;
- HVAC - системи опалення, вентиляції і кондиціонування;
- IWEC - Міжнародний погодні файл;
- ВНЗ - вищий навчальний заклад;
- ГВП - гаряче водопостачання;
- ДБН - Державні будівельні норми;
- ДНЗ - дошкільний навчальний заклад;
- ДСТУ - Державний стандарт України;
- ЕСКО - енергосервісна компанія;
- ЄС - Європейський Союз;
- КПІ - Київський політехнічний інституту;
- НДР - науково-дослідні роботи;
- Пн - північ;
- Пд - південь;
- ТЕЦ - теплоелектроцентрально;
- УФСІ - Український фонд соціальних інвестицій.

ВСТУП

Актуальність теми. Близько 40% світового енергоспоживання припадає на будівлі [1]. Тому в українських стандартах зростають вимоги до ефективного використання енергії в будівлях. Адекватність оцінки рівня енергоефективності будівель залежить від використання математичних моделей енергетичного стану будівлі як складної енергетичної системи. Тому вирішення питання потребує використання математичних моделей різної складності в залежності від задач, що вирішуються.

Відповідно до міжнародних норм і стандартів, які активно впроваджуються в Україні, будівлі розглядають як складні енергетичні системи в комплексі з огорожувальними конструкціями, джерелом, внутрішнім та зовнішнім середовищем. До комплексу показників теплової енергоефективності будівлі відносять енергетичну оцінку та енергопотребу. На базі значень енергопотреби визначається енергетична оцінка будівлі. Оцінка ефективного використання енергії на опалення та/або охолодження визначається на базі енергетичної потреби будівлі, яка розраховується та не може бути легко виміряна. Розвиток математичних моделей будівлі є важливим кроком для визначення енергоефективності будівель та оцінки потенціалу енергозбереження.

В цьому напрямку проведено низку досліджень. В працях іноземних дослідників Ю. Табунщиков, В. Богословський, W. Perera, M. Mijakowski, P. Narowski, L. K. Norford, J.C. Lam, H. C.M. Sam.

Значний внесок у розвиток підходів оцінки енергоефективності будівель зробили українські науковці Г. Фаренюк, Н. Фіалко, В. Дешко, В. Маляренко, Б. Басок, Б. Давиденко, С. Дубовський, П. Круковський. Незважаючи на науковий досвід і досягнення в даному напрямку, залишається не вирішеною проблема адаптації та застосування сучасних підходів світової практики до умов України. Це підкреслює актуальність дослідження.

Таким чином, **наукова задача** дисертаційної роботи полягає у розробці та розвитку методів для визначення енергетичних характеристик будівель.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України КПІ імені Ігоря Сікорського, відповідно до напрямку "Енергетика та енергоефективність" Закону України "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки" та Законів "Про енергозбереження", "Про енергетичну ефективність будівель". Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання держбюджетних НДР: "Розробка комплексу науково-технічних рішень для створення системи енергоменеджменту закладів освіти МОН України" (№ держреєстрації 0115U000313); "Управління енергоспоживанням об'єктів комунальної сфери" (№ держреєстрації 0117U000469); "Розробка моделей та методів інтегрованих систем управління ефективністю енерговикористання об'єктів галузі освіти" (№ держреєстрації 0113U001575), госпдогорівних НДР: "Науковий супровід проекту УФСІ підвищення якості освіти послуг бюджетних закладів Кіровоградської та Вінницької обл. Методика енергоаудиту." (№ 11 від 15.12.2014), "Розробка методики проведення енергетичного аудиту по програмі УФСІ" (№ 2 від 23.10.2015).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є удосконалення і подальший розвиток методів визначення енергетичного стану будівель шляхом вдосконалення врахування сукупності часової динаміки погодних та експлуатаційних факторів в нестационарних сіткових моделях будівель.

Реалізація поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань:

- провести аналіз методів визначення та підвищення ефективності управління споживанням енергії в енергетичних системах будівель;
- розробити сукупність математичних моделей енергетичного стану та провести їх порівняння для вирішення різних задач в сфері управління енергоспоживанням будівель;
- визначити вагомість впливу мінливості сукупності погодних та експлуатаційних факторів на динаміку енергопотреб будівель;

- провести експериментально-розрахункову діагностику локального та часового розосередження характеристик, що впливають на тепловий комфорт будівлі;
- визначити ефективність переривчастого опалення з врахуванням теплової інерційності будівель та мінливості погодних умов;
- застосувати математичні моделі для енергетичної сертифікації будівель закладів соціальної сфери.

Об'єкт дослідження – процес оцінювання енергоефективності в умовах динамічної зміни характеристик середовища.

Предмет дослідження – методи і способи оцінювання показників енергетичної ефективності громадських будівель.

Методи дослідження. Методичну основу проведеного наукового дослідження склали такі методи: аналізу та синтезу, математична статистика, методи математичного та імітаційного моделювання, фундаментальні положення теорії тепломасообміну, експериментальні методи визначення температурного стану приміщень, системний підхід з урахуванням температурно-погодних та експлуатаційних факторів.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає у наступному:

- вперше запропоновано методологічні основи та створені математичні моделі для визначення енергетичних характеристик будівель, які відрізняються поєднанням сучасних комп'ютерних методів енергетичного моделювання будівлі як складної системи, регресійного аналізу, історії зміни і групування сукупності внутрішніх та зовнішніх факторів впливу, що дозволяє прогнозувати та регулювати опалення з урахуванням інерційності будівель до зміни погодних умов та умов експлуатації;
- удосконалено нестационарну сіткову модель визначення теплового стану будівель за рахунок уточнення розділення теплоінерційних характеристик огорожень будівлі, що дозволяє зменшити розбіжність визначення енергопотреби будівлі у режимах опалення та/або охолодження в умовах країн з різкоконтинентальним кліматом;

- розвинено підхід до аналізу режимів переривчастого опалення шляхом визначення надбавки навантаження на опалення в робочі години для оптимальних глибин пониження температури в неробочі години, що дозволило забезпечити комфортний рівень температури в приміщенні в робочі години і визначити показники ефективності переривчастого опалення громадських будівель в нестационарних режимах;

- науково обґрунтовано та розвинуто комплексний підхід до поглибленого аналізу теплоенергетичного стану будівлі, який реалізується на основі поєднання експериментальних методів визначення розподілу температур в приміщеннях будівлі та математичних моделей локального та часового розосередження характеристик, що дозволяє визначити фактичні енергетичні характеристики (розподіл навантаження на систему опалення та кратності повітрообміну), в умовах нестационарних режимів зміни теплового стану будівлі;

- запропоновано нову енергетичну шкалу на 14 класів для сертифікації будівель громадських закладів, розташованих у невеликих містах та селах, що ґрунтується на визначених реперних точках питомої енергопотребити та дозволяє провести оцінку енергоефективності будівель при реалізації енергозберігаючих проектів з врахуванням особливостей розташування та функціонування об'єктів.

Практичне значення одержаних результатів полягають в тому, що запропоновані підходи дозволяють підвищити управління енергоефективного енергоспоживанням у будівлях. Розроблені математичні моделі для аналізу енергетичного стану будівлі дозволяють прогнозувати температурний стан приміщень та/або рівень опалення в приміщеннях з врахуванням динамічних особливостей огорожень та часової мінливості погодних та експлуатаційних особливостей. В цілому для громадського сектору будівель України застосування режимів переривчастого опалення протягом опалювального сезону з врахуванням динаміки зміни умов середовища дозволить досягти економії - до 3,6 млн. Гкал.

Для Українського Фонду Соціальних Інвестицій виконано аналіз споживання енергії будівель закладів соціальної сфери та запропоновані підходи до їх енергетичної сертифікації. Результати передано до використання в

ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» для розробки умов реалізації динамічних моделей, а також визначення реперних точок та побудови шкал енергетичної сертифікації будівель України. Для служби енергетичного менеджменту Сумського державного університету (СумДУ) розроблено динамічні математичні моделі для аналізу та прогнозування енергопотреб будівлі навчального закладу. Службою енергетичного менеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського для навчального корпусу використано розроблену нелінійну багатофакторну регресійну модель для прогнозування енергопотреб та/або теплового стану будівлі. Отримані результати використовуються у навчальному процесі на кафедрі теплотехніки та енергозбереження для викладання курсу "Методи енергомоніторингу та енергоаудиту" та дисциплін "Енергозбереження в будівлях", "Математичне моделювання енергетичних процесів в антропогенному середовищі".

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею. Всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У друкованих працях (Додаток А), які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: проведено класифікацію підходів та програмних продуктів для аналізу енергетичних характеристик будівель [1, 8, 38]; проведено порівняння математичних моделей для визначення енергопотреб будівель на опалення та охолодження [2, 3, 6, 19, 24, 26-28] та особливості використання різних кліматичних баз даних [9, 20, 21, 29]; досліджено переривчасті режими опалення та визначено рівень енергозбереження [16, 30, 31]; виконано параметричний аналіз внутрішніх та зовнішніх факторів впливу на внутрішню температуру повітря та створено багатофакторні регресійні залежності для прогнозування внутрішньої температури повітря та/або рівня опалення [4, 5, 33, 34, 44]; досліджено комплексний вплив сонячної радіації та власного теплового випромінювання огорожень на внутрішню температуру повітря та/або рівень опалення в кімнаті [12, 13, 17, 35]; досліджено температурний стан приміщень навчального корпусу та комплексне дослідження енергетичних характеристик будівлі [7, 10, 23]; застосовано динамічні методи

розрахунку для аналізу найбільш поширених енергозберігаючих заходів в будівлях [14, 15, 22, 25, 37, 39, 41, 42]; запропоновано шкалу для енергетичної сертифікації громадських будівель при реалізації проектів енергоефективності з врахуванням особливостей розташування та функціонування об'єктів [11, 18, 33, 36, 38, 40, 43].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, представлені в дисертації, були висвітлені на Міжнародних і Всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: Міжнародній науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання.» (Тернопіль, 2012, 2018), Международном форуме для устойчивого развития бизнеса "Green Mind" (Київ, 2013), Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии теплогазоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры» (Харків, 2013), International Green Energy Conference (Київ, 2013), Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Київ, 2014, 2016, 2017, 2018), Міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS" (Київ, 2015, 2016, 2018), Міжнародній конференції "Проблеми промислової теплотехніки" (Київ, 2015, 2017), Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2016, 2017), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та студентів "Еколого-енергетичні проблеми сучасності" (Одеса, 2016), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції "Сучасні інноваційно-інвестиційні механізми розвитку національної економіки" (Полтава, 2015), II International Scientific-Technical Conference "Actual problems of power engineering, construction and environmental engineering" (Poland, 2017), Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Буд-Майстер-Клас-2017» (Київ, 2017), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції "Наукові підсумки 2017 року" (Вінниця, 2017), Міжнародній науково-практичній конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем" (Чернігів, 2018), Міжнародній науково-технічній конференції

«Технології та інфраструктура транспорту» (Харків, 2018), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Енергоефективність у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання» (Київ, 2014), Всеукраїнському конкурсі "Молодь енергетиці України: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків" (Київ, 2010, 2013, 2016). Представлені на конкурсі роботи здобули призові місця.

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи відображено у 44 наукових працях, у тому числі – 14 у наукових фахових виданнях (з них 6 в виданнях іноземних держав, з них 3 – внесені до міжнародної бази Scopus; 4 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 3 – в інших наукових виданнях (з них 2 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз) та у одній колективній монографії, одному свідоцтві про реєстрацію авторського права на науковий твір, 25 тезах доповідей у збірниках матеріалів конференції, з яких 1 у виданні іноземних держав.

Структура і обсяги дисертації. Дисертації на робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг роботи складає 236 сторінки, у тому числі, 186 сторінок основного тексту, 76 рисунків, 9 таблиць, список використаних джерел зі 198 найменувань та 4 додатки.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

Адекватна оцінка рівня енергоефективності будівель залежить від використання математичних моделей енергетичного стану будівель як складної енергетичної системи. В роботі проаналізовано рівень енергоефективності комплексу громадських будівель та визначено основні напрямки реалізації енергозберігаючих заходів. Використання математичного моделювання при визначенні та підвищенні енергоефективності будівель є основним інструментом оцінки, тому вибір та розробка моделей для моделювання теплового стану будівель є основною задачею.

1.1 Рівень енергоефективності житлово-комунального комплексу

За статистикою споживання енергетичних ресурсів України можна поділити на три великі групи: промисловість (до 28%), транспорт (до 32%) та житловий сектор (понад 40%) [1]. Особливості економіки України полягають в тому, що в структурі споживання первинних енергоресурсів в Україні газ становить десь 41% (нафта 18,4%, вугілля 24,3%, атомна енергія та інші – 16,3%), що втричі більше, ніж в світі, і удвічі – ніж у Європі. При цьому, ситуацію, безумовно, ускладнює те, що незважаючи на загальний стереотип, головними споживачами газу в Україні, до того ж у край неефективними, є не підприємства промисловості, а населення, комунальне господарство та ТЕЦ, які виробляють теплову та електричну енергію. Так, у 2007 році з 69,8 млрд. куб. м. в Україні весь промисловий сектор використав близько 26 млрд. куб. м газу, а населенням, непромисловими підприємствами та ТЕЦ (йдеться про виробіток електро- та теплоенергії для населення) спожито 35-36 млрд. куб. м газу. [1, 2]

У житлово-комунальному господарстві України споживається 75 млн. т умовного палива, що становить близько 40% щорічного витрачання палива в

загальному енергобалансі країни [1-5]. Житловий фонд та інші об'єкти соціальної сфери споживають 85% енергоресурсів на потреби опалення.

В 70...80-х роках в опалювальний сезон питома витрата енергії на 1 м² житла для будинків, побудованих раніше, складала 280 кВт·год/м² в Англії, 360 кВт·год/м² в Німеччині, 400 кВт·год/м² в Польщі. В 90-х роках ХХ століття в Західній Європі цей показник сягав 120 кВт·год/м², а згідно сучасних вимог 40 або 60 кВт·год/м². В той же час в Україні питома витрата теплової енергії на 1 м² житла становить у будинках, зведених в радянський період, багатоквартирних цегляних – 400 кВт·год/м², багатоквартирних панельних – 600 кВт·год/м², індивідуальних – 700 кВт·год/м². [1]

Висновок. З вище розглянутого видно, що будівлі є сегментом, які потребують значної уваги. Нераціональне використання енергоресурсів ЖКГ потребує дієвих методів та засобів впливу на енергоефективність.

1.2 Напрямки впливу на споживання енергії

Проблемами для України залишається неефективне споживання населенням паливно-енергетичних ресурсів та неналежний технічний стан переважної більшості існуючих будівель та енергетичних систем. Низький рівень енергоефективності будівель в основній мірі пов'язаний з низьким термічним опором огорожувальних конструкцій. Норми по тепловому захисту будівель в Україні (в Радянському Союзі) існують з 1921 р. протягом цього часу вони підлягали більше десяти редакціям, пов'язаних зі змінами технічного рівня будівництва в країні. До кінця 80-х років акцент наголошувався на вартості будівництва, тобто мінімізувалися капітальні затрати і майже не враховувалися експлуатаційні витрати. На той час основна увага приділялася не ефективному використанню енергетичних ресурсів в будівлях, а орієнтувалася на економію будівельних матеріалів, нормування показників гігієни та безпеки. Більшість будівель, що експлуатуються в Україні (близько 80%) відповідають вимогам масової забудови 70-80-х років.

Ситуація змінилася після набуття Україною статусу незалежної держави та переходу до ринкової економіки. Починаючи з 90-х років і до сьогодні цей період характеризується постійним ростом цін на енергоносії в середині країни, що є відповіддю на аналогічні тенденції у світі. У зв'язку з газовою кризою в Україні починаючи з 2014 року, яка особливо гостро постала взимку 2017-2018 року, питання енергоефективності є одним з основних напрямків розвитку країни.

Зниження витрати енергоносіїв на опалення будівель може досягатися різними шляхами. В Україні один з шляхів – це використання сучасних теплоізоляційних матеріалів та технологій на стадіях як проектування та і експлуатації (рис. 1.1). Другим напрямком є використання відновлювальних та альтернативних джерел енергії в системах розподіленої генерації. Третій напрямок – використання автоматичного керування системами теплопостачання будівель (локальне керування теплоспоживанням). Четвертий – використання впливу на соціальний фактор, умови експлуатації, управління поведінкою користувачів.

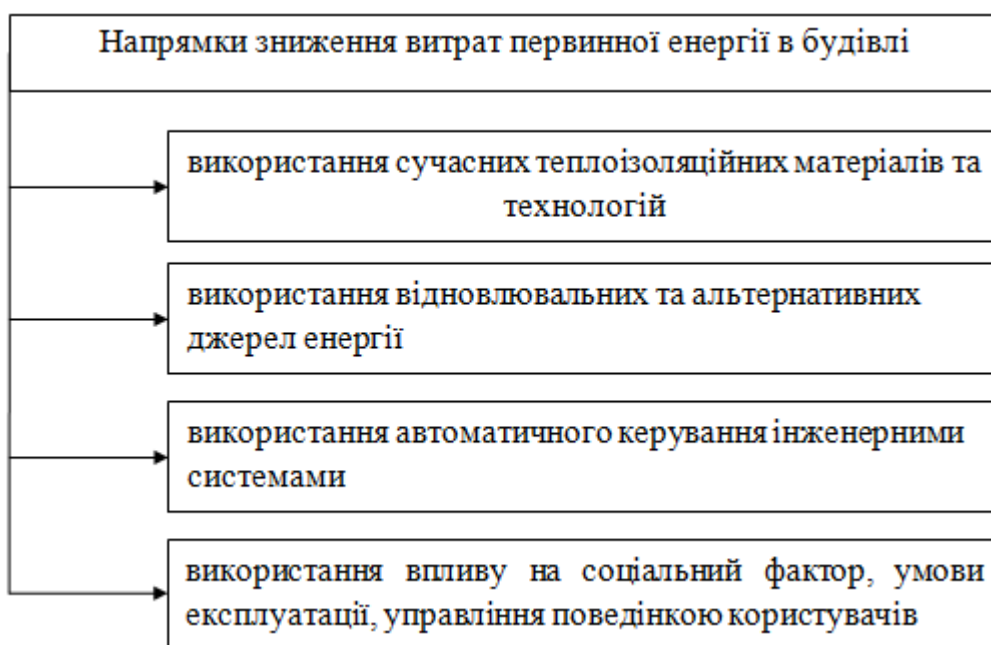


Рис. 1.1 – Основні напрямки зниження витрат енергоносіїв на опалення будівель

Для реалізації першого напрямку для стимулювання населення до енергозбереження в Україні з червня 2017 року набув чинності Закон "Про

енергетичну ефективність будівель" № 2118-VIII [6] та діє ряд державних та регіональних програм підтримки населення при впровадженні енергоощадливих технологій [7, 8].

Міжнародні інвестиційні програми в Україні в більшій мірі зосереджені на термомодернізації громадських об'єктів та майже небрали до уваги житлові будинки. Наприклад, в рамках проекту "Вища освіта України" між Україною та Європейським інвестиційним банком проводиться термомодернізація вищих навчальних закладів. Такі об'єкти мають великий розмір, а отже потребують великих капіталовкладень, що зменшує кількість програм, де можуть реалізуватися такі проекти. Для міжнародних інвестиційних програм, що діють в Україні, невеликі соціальні об'єкти (наприклад, школи, дитячі садочки) є більш привабливими з точки зору залучення коштів. Наприклад, Український фонд соціальних інвестицій за фінансової підтримки Уряду Німеччини реалізують проекти по термомодернізації соціальних об'єктів по всій території країни. В програмі вже прийняли участь міста, смт. та села Львівської, Кіровоградської, Вінницької, Запорізької та Київської області. Ще один з напрямків набув актуальності при термомодернізації у бюджетній сфері, залучення до співпраці енергосервісної компанії – ЕСКО. ЕСКО компанія інвестує кошти та отримує відсоток від отриманої економії, у т.ч. і з бюджетних коштів, призначених для оплати енергоресурсів [9].

З жовтня 2014 року для населення та ОСББ діє розроблена Держенергоефективності та запроваджена Урядова програма "теплих" кредитів.

Програмою передбачено відшкодування з держбюджету у таких розмірах [9]:

- 20% суми кредиту на придбання негазових/неелектричних котлів для фізичних осіб;
- 35% суми кредиту на придбання енергоефективного обладнання/матеріалів для фізичних осіб;
- 40% суми кредиту для ОСББ/ЖБК, як юридичних осіб, для загальнобудинкових заходів.

Громадяни мають можливість отримати часткову компенсацію на енергоефективні заходи не тільки з державного бюджету, але й додатково – 15-20% – з обласних і міських бюджетів. В Україні діє 204 місцеві програми здешевлення "теплих" кредитів. [9] Одночасна компенсація енергоефективних заходів з державного та місцевого бюджетів дозволяє збільшити розмір компенсації до 45% вартості проекту і скоротити строк окупності більшості енергоефективних заходів.

Усього у 2016р. Урядом було виплачено 843 млн. грн. (у 2015р. – 390 млн. грн.) безповоротної фінансової допомоги на енергоефективні заходи. Домінуючим попитом користувалися “теплі” кредити на покупку енергоефективних матеріалів і устаткування. Найбільшої популярності в регіональному розрізі програма набула в Львівській, Київській (включно м. Київ), Сумській, Вінницькій, Івано-Франківській, Рівненській та Дніпропетровській областях [7].

Середня економія теплової енергії від впровадження енергоефективних заходів за програмою, які застосували ОСББ і ЖБК склала: при термомодернізації стін – 24%; при встановленні енергоефективних світлопрозорих конструкцій у місцях загального користування – 14%. Крім того, зафіксована суттєва економія електроенергії при освітленні місць загального користування (71%) [8].

Разом з тим, приватні домогосподарства, завдяки участі в програмі (встановлення вікон, заміна застарілих газових котлів, утеплення стін в одно-квартирних будинках), зменшили споживання газу до 43%, а після заміни вікон, радіаторів у квартирах багатоквартирних будинків – заощадили до 24% тепла.

Для реалізації другого напрямку підвищення енергоефективності діє система зелених тарифів, що набула особливої популярності в приватних домогосподарствах. Для громадських будівель впроваджуються проекти зеленої сертифікації (LEED-сертифікація) [10].

Третій напрямок є найбільш ефективним з точки зору забезпечення комфортних умов з врахуванням добових та сезонних коливань зовнішніх погодних умов та графіку роботи будівель певного призначення [11, 12]. Регулювання температури приміщень являється найбільш маловитратним, але

широке застосування даного напрямку має ряд проблем. При цьому теплові процеси в будівлі є складним динамічним процесом тепломасообміну. Аналіз ефективності управління системою опалення базується на створенні адекватної математичної моделі. В основі регулювання лежить зниження температури повітря в приміщеннях до визначеного рівня в період відсутності людей, потім у визначений момент система опалення вмикається або збільшує теплове навантаження для прогріву повітря до комфортної температури до моменту приходу людей в приміщення.

Потенціал зниження енергозатрат добре вивчений у стаціонарному режимі, зниження температури повітря в приміщенні на 1°C дозволяє знизити тепловтрати на 2...5%. Значне зменшення споживання теплової енергії може бути досягнуто шляхом зниження внутрішньої температури в період відсутності людей в житлових чи офісних будівлях. Добове використання економічних режимів з обмеженням температури повітря в приміщенні 10°C протягом 5 робочих днів тижня дозволяє зменшити енергозатрати на опалення до 14,7% в порівнянні з постійним режимом комфортної температури. Постійне зниження температури до 10°C має місце, наприклад, у святкові періоди, коли працівники відсутні на робочих місцях [12]. Для забезпечення комфортної температури у робочі години після тривалого пониження рівня внутрішньої температури повітря, потрібно завчасно вмикати опалення, що зменшить економічний ефект [12]. В стандарті [13] рекомендована глибина пониження внутрішньої температури повітря не нижче $3-4^{\circ}\text{C}$ від нормативної температури в робочі години.

В рамках реалізації проекту "Вища освіта України" - для громадських будівель та програми "теплі кредити" - для житлових будівель, при облаштуванні індивідуальних теплових пунктів автоматичним погодним регулюванням, дозволило зменшити енерговикористання на 10% [8].

Висновок. Рівень енергоспоживання будівель в Україні зменшується різними напрямками і залежить від ряду факторів, таких як тепловий захист огорожувальні конструкції, керування інженерними системами теплопостачання, кліматичні умови тощо. Саме тому для забезпечення раціонального використання

енергетичних ресурсів на опалення необхідний ефективний підхід щодо вивчення впливу цих факторів, встановлення можливого потенціалу економії енергоресурсів.

1.3 Будівля як складна енергетична система

В спеціальності 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси основним є напрям, спрямований на підвищення енергоефективності та енергозбереження. Енергоефективність – це показник, який характеризується відношенням ефективності від використання енергоресурсів до їх витрат. Підвищення рівня енергоефективності комплексом чи системою включають розробку організаційних, техніко-економічних, екологічних, технічних, технологічних аспектів виробництва, розподілу, транспортування та споживання енергії. Споживання енергії є найбільш впливовим напрямком реалізації комплексу енергозберігаючих заходів.

Система народного господарства району або певного територіального комплексу включає енергетичну систему району, яка складається з: системи електропостачання, теплопостачання, газопостачання, системи водопостачання та відведення та інше. Комплекс будівель (наприклад, району), згідно з методологією комплексного аналізу [14], можна розглядати як систему (S), як сукупність методик, процесів, ресурсів необхідних для її функціонування. За визначенням система розглядається як сукупність укрупнених компонентів, принципово необхідних для існування і функціонування досліджуваної системи [14]:

$$S = \{Z, STR, TECH, COND\}, \quad (1.1)$$

Z – сукупність цілей;

STR – сукупність структур реалізуючих цілі (наприклад, виробнича, організаційна тощо);

TECH – сукупність методик, технологій тощо, за якими реалізується система;

COND – умови роботи системи, тобто врахування чинників (зовнішні, внутрішні), що впливають на її функціонування.

В працях В.Н.Садовського і Є.Г. Юдіна взаємодія системи з середовищем представлена у визначеннях: 1) вона базує особливу єдність з середовищем; 2) як правило, будь яка розглянута система представляє собою елемент системи більш високого порядку; 3) елемент будь якої розглянутої системи, в свою чергу, зазвичай виступає як система більш низького порядку [14].

Тому, на прикладі, системи енергопостачання району/групи будівель є підсистемою енергопостачання міста/регіону, елементи якої можуть бути розділені як система нижчого порядку (наприклад, будівля). Тому поняття підсистеми передбачає, що виділена відносно незалежна частина системи (наприклад, будівля), володіє властивостями системи, має свою ціль, на досягнення якої орієнтована підсистема.

По даним [15] витрата теплової енергії на підтримання функціонування будівель складає більше 25% в енергобалансі України. Громадські та житлові будинки являються одними з найбільших споживачів енергоресурсів в Україні. Практично 80% будівель нині не відповідають сучасним вимогам енергоефективності. На сьогоднішній день головними проблемами таких будівель є підвищені витрати теплової енергії на опалення та невідповідність внутрішнього мікроклімату приміщень загальноприйнятим нормам комфорту.

Поняття енергетична ефективність будівель з'явилося на початку 70-років минулого століття. Причиною цьому стала перша енергетична криза, яка змусила увесь світ замислитися про ефективність споживання енергетичних ресурсів. Сьогодні у світовій практиці, розглядаючи питання енергетичної ефективності будівель, розташованих у помірній та холодній кліматичних зонах, основний акцент роблять на теплоспоживанні будівель, оскільки це є основна складова витрат на енергоресурси, а також саме в цій сфері зосереджений найбільший резерв енергозбереження.

Відповідно до європейського стандарту [16], будівля - це конструкція в цілому, включаючи її огорожувальну конструкцію і всі інженерні системи

будівлі, для яких енергія використовується для опалення та/або кондиціонування внутрішнього мікроклімату, для забезпечення гарячого водопостачання і освітлення та інших послуг, пов'язаних з використанням будівлі для забезпечення її функціонування [16]. В стандарті [16] відмічено, що термін може відноситися до будівлі в цілому або її частин, які були вибрані або змінені для окремого дослідження. Будівля є складною єдиною енергетичною системою, тому для її вивчення застосовується методологія системного підходу. Як єдина енергетична система будівлі включає огороження, джерела, внутрішнє та зовнішнє середовище, активні споживачі. [16-19]. Визначення будівлі як енергетичної системи введено Табунщиковим Ю.А., до складу якої він включає зовнішній клімат, оболонку будівлі, енергетичні процеси в приміщеннях. [20] ДСТУ Б EN ISO 13790:2011, ДСТУ Б EN 15217:2013, ДСТУ EN 15603:2013 до її складу та енергетичного балансу включають інженерні системи будівлі. [16, 17] Буяк Н.А. до енергетичної системи будівлі включила людину як індикатор умов комфортності середовища [18].

Тому будівля як складна енергетична система розглядається як сукупність зовнішнього клімату, інженерних систем, оболонки, людини, як індикатор умов комфортності, та енергетичних процесів в приміщеннях будівлі.

В працях Табунщикова Ю.А. [20] представлено будівлю як складну архітектурно-конструктивну систему з різноманітним складом її елементів огорожувальних конструкцій та інженерного обладнання, в яких протікають різні по фізичній суті процеси поглинання, перетворення і перенесення теплоти.

Під дією різниці температур зовнішнього і внутрішнього повітря і сонячної радіації приміщення через огорожувальні конструкції в зимовий час втрачає, а в літній отримує теплоту. Гравітаційні сили, дія вітру і вентиляція створюють перепади тисків, що призводять до перетікання повітря між сполученими приміщеннями і до його інфільтрації/ексфільтрації через пори матеріалів і нещільності огорожень. Атмосферні опади, вологовиділення в приміщеннях, різниця вологості внутрішнього і зовнішнього повітря призводять до

вологообміну через огорожі, під впливом якого можливо зволоження матеріалів, накоплення вологи в огороженні і погіршення їх теплозахисту [20].

Зовнішні огороджувальні конструкції захищають приміщення від несприятливих впливів клімату, спеціальні системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря підтримують у приміщенні протягом усього року певні параметри внутрішнього середовища. Сукупність усіх інженерних систем і пристроїв, що забезпечують заданий тепловий режим в приміщеннях будівлі, називається системою кліматизації будівлі [20].

Тепловим режимом будівлі називається сукупність всіх факторів і процесів, що визначають теплову обстановку приміщення. Теплова ефективність будівлі характеризується витратами енергії на кліматизацію, віднесеними до розрахункового періоду часу.

Завдання забезпечення в приміщеннях будівлі певного теплового режиму являє собою організацію взаємодіючих і взаємопов'язаних теплових потоків в складній архітектурно-конструктивній системі з різноманітним складом її елементів огороджувальних конструкцій та інженерного обладнання, кожен з яких є енергоносієм і енергопередатчиком. Принциповою особливістю цієї системи є те, що будівля як єдина енергетична система представляє не просте сумування елементів, а особливості з'єднання, що додає всій системі в цілому нової поведінки/якості, які відсутні у кожного з елементів по одинці [20].

В даний час для побудови і реалізації математичних моделей складних енергетичних об'єктів, до яких може бути віднесено будівля, використовується методологія системного підходу [20, 21].

Системний підхід побудови математичної моделі теплового режиму будівлі передбачає виконання таких етапів [20]:

1. Виділення із загальної енергоспоживаючої системи даного об'єкту, наприклад, виділення будівлі з мікрорайону, цеху в будівлі заводу або окремого корпусу, приміщення в житловому або громадському будинку.

2. З'ясування складових елементів, їх внутрішньої структури і видів зв'язків між ними.

3. Розділення об'єкта за допомогою методу декомпозиції на більш прості елементи і його подальше відновлення, наприклад, за допомогою теорії графів.

4. Розробка системи взаємопов'язаних математичних моделей окремих елементів будівлі і узагальненої математичної моделі теплового режиму будівлі в цілому.

Наукові основи проектування енергоефективних будівель [22], запропоновані авторами Табунщиковим Ю.А та Бородачем М.М., засновані на розгляді будівлі і оточуючого середовища як єдиної енергетичної системи.

До існуючих будівель та тих, що проектуються, висуваються вимоги енергоефективності, тобто мінімальний рівень енергоефективності, який має бути досягнутий [16]. Як згадувалось вище, основна увага приділяється тепловій енергоефективності. Теплова енергоефективність будівель – це комплекс показників, які характеризуються питомими затратами енергії на опалення, охолодження, вентиляцію, гаряче водопостачання, освітлення приміщень тощо. До комплексу показників теплової енергоефективності будівлі відноситься енергетичний рейтинг, енергопотреба тощо.

Потреба в енергії на опалення або охолодження визначається, як тепло, що має бути доставлене чи видалене з кондиціонованого простору для підтримки призначених температурних умов для певного періоду часу [23]. Потреба в енергії розраховується і не може бути легко виміряна, тому її визначення потребує застосування різноманітних методик, моделей та програмних продуктів. На базі значень енергопотреби будівлі визначають енергетичний рейтинг. Показник енергоефективності - енергетичний рейтинг поділений на кондиціоновану/опалювальну площу

Енергетичний рейтинг представляє собою оцінку енергетичної ефективності будівель на основі зваженої суми розрахованого або виміряного використання енергоносіїв [17]. Енергетичні оцінки будівлі бувають: розрахункові; стандартні; проектні; пристосовані; інструментальні.

Висновок. Вирішення задач енергоефективності будівель з врахуванням комплексу показників, а саме теплофізичні та теплоінерційні особливості

огорожень, умови мікроклімату, графіки експлуатації, кліматичні умови, система опалення та теплонадходження тощо, які впливають на питомі енергетичні характеристики (показник енергоефективності) будівлі потребує системного підходу є складною комплексною задачею. Вирішення цих задач потребує створення математичних моделей для дослідження енергетичних характеристик будівлі. Математичні моделі можуть бути різного кроку дискретизації розрахунків в залежності від задач, що ставляться, що спрощує/ускладнює модель.

1.4 Використання моделювання при визначенні та підвищенні енергоефективності будівель

Одним з показників ефективного використання теплової енергії для опалення є питомі значення на одиницю площі чи/або об'єму. Тому особлива увага приділяється методам по визначенню енергопотребности на опалення, на базі яких встановлюються значення питомих показників енергоефективності, для з'ясування можливого рівня економії енергоресурсів будівлі. Для підвищення енергоефективності будівель, за попередньо розглянутими напрямками в п. 1.2, потрібно вирішити ряд задач, які потребують адекватної моделі розрахунку. Модель - це спрощене уявлення реального пристрою та/або протікаючих явищ, процесів. Одні й ті ж процеси в будівлях можуть описуватися різноманітними моделями. Можуть використовуватись алгебраїчні, сіткові, чисельні та на експериментальних даних моделі. Аналітична модель - є системою таких співвідношень між заданими й шуканими величинами, які виражені математичними формулами в явному вигляді. Їх рішення шукаються в замкнутому вигляді, у вигляді функціональних залежностей. [24] Рішення чисельних методів - є дискретний ряд чисел чи таблиць. Моделі універсальні, зручні для вирішення складних завдань, але не наочні і трудомісткі при аналізі і встановленні взаємозв'язків між параметрами. В даний час такі моделі реалізують в вигляді програмних комплексів - пакетів програм для розрахунку на комп'ютері.

Сіткова модель – множина поєднаних між собою фізично залежних елементів для опису. На основі сіткових моделей побудовано більшості програмних продуктів. Математична модель може бути побудована шляхом обробки експериментально отриманих результатів, такі моделі отримали назву експериментальні. [25]

Вирішення цих завдань, аналіз фактичних та отримання приведених до стандартних умов даних по енергоспоживанню потребує використання методів розрахунку та математичних моделей різного призначення [26]. На рис. 1.2 наведено класифікацію моделей для визначення та підвищення енергоефективності.

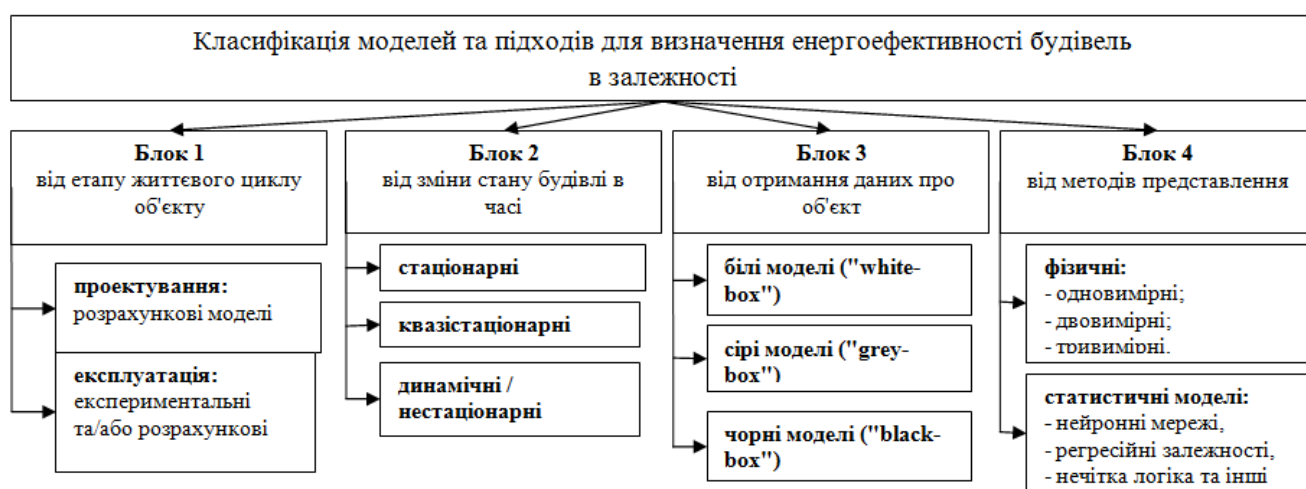


Рис. 1.2 – Класифікація моделей для визначення та підвищення енергоефективності

В *блоці 1* розглядаються розподіл використання моделей енергетичного стану будівлі на стадії проектування та і на стадії експлуатації. В проектуванні використовуються розрахункові моделі для аналізу та оцінки енергоспоживання. Для вже існуючих будівель - розрахункові та/або експериментальні.

В *блоці 2* розглядаються підходи до класифікації в залежності від зміна стану будівлі в часі, тобто в залежності від часових інтервалів розрахунку моделі можуть бути стаціонарні, квазістаціонарні та динамічні (нестационарні). Стаціонарні методи розрахунку, що найбільш широко використовуються в Україні, дозволяють проводити розрахунок визначення енергопотреби будівлі в опалені в річному розрізі та не враховують інерційні особливості будівлі.

Квазістаціонарні методи використовують для розрахунку теплових балансів для досить тривалого інтервалу часу (зазвичай один місяць чи цілий сезон), динамічні процеси використання надходжень та/або втрат приймають до уваги за емпірично визначеним коефіцієнтом. Для детального аналізу енергетичних характеристик доцільно використовувати нестационарні та/або динамічні моделі розрахунку енергоспоживання. В динамічних методах тепловий баланс розраховують за короткотривалими часовими інтервалами (зазвичай одна година), беручи до уваги обсяг тепла, що акумулюється в, або вивільняється від масиву будинку [26].

В залежності від отримання даних про взаємозв'язок між параметрами в *блоці 3* розглядаються три типи моделей: метод чорного ящика ("black-box"), білого ящика ("white-box") та сірі моделі ("grey-box"). [27] Моделі які побудовані на базі рівнянь фізичних процесів та/або імітаційного моделювання називають "white-box". Імітаційне моделювання передбачає представлення моделі у вигляді алгоритму та комп'ютерної програми, яка дозволяє відтворити поведінку об'єкту. Імітаційні моделі розглядаються як експерименти, що проводяться на комп'ютерах, з математичними моделями, що імітують поведінку реальних об'єктів. При цьому імітуються елементарні явища, що складають процес, зі збереженням їх логічної структури та послідовності у часі, що дозволяє отримати відомості про стан системи у певний момент часу та оцінити характеристики системи. Імітаційні моделі дозволяють вирішувати більш складні задачі, ніж аналітичні. Моделі, які побудовані на основі статистичного аналізу отриманих даних про будівлю називаються "black-box". Поєднання фізичних та статистичних моделей аналізу отримало назву "grey-box" [28-32].

В *блоці 4* в залежності від методів аналізу будівель моделі бувають фізичні та статистичні. Фізичні методи розрахунку можуть вирішувати одновимірні, двовимірні та тривимірні задачі. Статистичні моделі будівель можуть проводити аналіз на основі нейронних мереж, регресійного аналізу та нечіткої логіки і т.п., тобто при створенні моделей даних по енергоспоживанню можуть застосовуватися формальні підходи Datamodeling [33, 34].

Виходячи з вище розглянутої класифікації моделі можуть мати різні напрямки застосування, що залежать від області та мети застосування та задач дослідження.

Енергопотреба може визначатися в річному [35, 36, 39, 40], помісячному [23], погодинному [23, 37, 38] розрізі на стадії проектування [23, 37] та експлуатації [23, 32, 37-39] будівель.

Зі зростанням попиту на енергоефективне будівництво виникла проблема прогнозування енергетичної ефективності будівництва на етапі проектування. Моделювання енергетичної ефективності будівель на стадії проектування активно використовується в Європі. Інформаційне моделювання будівель (Building Information Modeling - BIM) - це інтелектуальний процес заснований на 3D-моделях, який використовується на стадії проектування та будівництва для більш ефективного планування, проектування та управління будівлею, групою будівель та інфраструктурою в цілому. BIM на основі моделювання енергії дає ряд переваг, включаючи: більш точний та повний аналіз енергоефективності на ранніх етапах проектування, зниження вартості життєвого циклу тощо [41, 42]. В Росії BIM підходи до аналізу будівель були прийняті з кінця 2016 року. Інформаційна модель будівель BIM більш широке поняття та включає в себе моделювання енергетичного потенціалу (Building Energy Modeling - BEM). Енергетичне моделювання в будівництві (BEM) передбачає прогнозоване споживання енергії будівлею та відповідний рівень енергозбереження порівняно із стандартною базовою лінією. Таким чином, це демонструє відповідність проекту вимогам зеленої сертифікації LEED. BEM прогнозує енергоефективність на основі даних типового метеорологічного року (Typical Meteorological Year - TMY), а також припущень щодо експлуатації будівель, що, в свою чергу, дозволяє розрахувати різні енергозберігаючі заходи [41, 42]. BEM може бути використаний для оцінки споживання енергії в будівництві при застосуванні різних дизайнерських рішень та допомагає проектувальникам приймати найкращі рішення [41-43, 30]. BEM підходи реалізуються на базі програмних продуктів, найбільш поширений серед них це EnergyPlus та TRNSYS [44, 45]. BEM використовуються для аналізу вже

діючих будівель. Для діючого старого фонду будівель України актуальний аналіз на стадії експлуатації, тому ВЕМ може знайти використання в нашій країні. На стадії експлуатації для аналізу та моніторингу використовують Системи енергоменеджменту будівлі (Building Energy Management Systems - BEMS) постійно привертають увагу як дієва система контролю будівлі [29, 46]. Ці системи в даний час працюють з класичними алгоритмами управління, такими як включення-вимкнення, PID-регулювання (proportional–integral–derivative controller) та оптимальні процедури запуску-зупинки. Теплова взаємодія між різними зонами будівлі та HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning - системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря) призводить до різноманітної поведінки, яку не можна точно контролювати за допомогою класичних методів управління [29]. Таким чином, вдосконалені системи керування, які можуть обробляти декілька входів і множинних виходів, є кращим підходом для контролю теплового стану будівель [29, 46, 47]. Інтеграція математичних моделей ВЕМ, які можуть описувати будівельну фізику, може допомогти в успішному контролі енергоефективності будівництва.

При проектуванні звертається увага впливу конструкцій оболонки для оцінки групи/району будівель [39, 48, 49], для окремих будівель [50], репрезентативних приміщень [20, 51], впливу кліматичних факторів на енергопотребу [52, 53].

Для експлуатаційних умов важливим є прогноз навантаження на систему HVAC для різних часових інтервалів [38, 49, 31, 32, 48, 49], для періоду опалення [31, 40, 54] та/або охолодження [40, 54].

Математичні моделі будівлі можуть використовуватися при сертифікації будівель [55-60] та побудові енергетичних рейтингів будівель [56, 61, 62].

Наукові дослідження в сфері моделювання енергетичного стану будівель мають такі напрямки:

- порівняння, розвиток та розробка моделей [63-68];
- параметричний аналіз впливовості факторів (вплив погодних умов та інших факторів) [52, 53];
- розробка та порівняння типів та шкал сертифікації [55-62].

Висновки. В більшості розвинених країн оптимізація показників енергоефективності будівель виконується на стадії проектування. В Україні житловий та громадський фонд будівель в значній своїй мірі побудований в роки СРСР, тому аналіз показників енергоефективності широко використовується на стадії експлуатації для вже діючих будівель. Основна перешкода – відсутність адекватної оцінки енергопотреби в будівлях в Україні призводить до того, що на відміну від країн ЄС, неможливо визначити базу порівняння поточного рівня енергоефективності сектора нерухомості і встановити реалістичні цілі щодо його зниження в перспективі. Запропоновані підходи аналізу будівлі як складної енергетичної системи мають свої особливості та межі застосування, що потрібно враховувати при розробці та вдосконаленні моделей.

1.5 Вибір та розробка моделей для моделювання теплового стану будівель

Для аналізу теплового стану будівель моделі створюються на базі програмних продуктів, стандартів для визначення енергопотреби будівель та використовуються авторські розробки.

Моделі на базі програмних продуктів.

Для аналізу будівель наявний великий спектр програмних продуктів, вони різняться за вартістю та доступністю, побудовані для різних операційних систем. Методологічно вони можуть бути побудовані: як бази даних; на базі фізичних розрахунків на основі фізичних законів, рівнянь; для вирішення завдань оптимізації; для моделювання об'єктів енергоспоживання за різних умов (стаціонарних, квазістаціонарних, нестаціонарних режимів) [69].

Багато програмних продуктів можна знайти через Інтернет як у вільному доступі так і через ліцензійний доступ. В огляді наведені програмні продукти, які

дозволять проводити аналіз як окремої будівлі (зони), так і групи будівель/району міста.

За класом вирішуваних задач розглянуті програмні продукти підрозділяються для:

- прийняття рішень в містах та визначені збиткового сектора: LEAP, Energy PLAN, TRACE [70];
- прогнозування та планування енергоспоживання: OSeMOSYS, SUPER, MESSAGE [70], EnergyPlus [71], eQUEST [72], TRNSYS [73];
- оцінки інвестиційних проектів: MAC Tool, RETSKREEEN, COMPOSE [70];
- оцінки екологічної ситуації: COMPOSE, CO2DB, LEAP, MAED, REAP, Energy Plus, Energy PLAN, SUPER, TIMES/MARKAL, VACTool, EFFECT [71, 73];
- оптимізації енергоспоживання: Energy PLAN, EnergyPlus, eQUEST, TRNSYS, OSeMOSYS, HOMER, Modelica [70, 71, 74];
- фізичного моделювання процесів теплообміну: ANSYS, FLUENT, SolidWorks [75, 76], EnergyPlus [71], eQUEST [72], TRNSYS [73];
- визначення енергетичних характеристик будівель: Енергетичний паспорт, Дисплей, EnergyPlus, eQUEST, TRNSYS [35, 77, 71-73];

Програмні продукти, характеристика яких наведена на рис.1.3, є різними за складністю, доступністю та іншими ознаками, що призводить до різного ступеню застосування.

Для деяких програмних продуктів, що не є у вільному доступі (наприклад, FLUENT), створені безкоштовні аналоги на базі Linux (наприклад, OpenFOAM).

Розглянуті програмні продукти дозволяють вирішувати великий спектр задач. Для визначення енергетичних характеристик будівель найбільш розповсюдженим є використання існуючих програмних продуктів, таких як EnergyPlus, eQUEST, TRNSYS, ANSYS / FLUENT, SolidWorks, Modelica тощо [71-76].

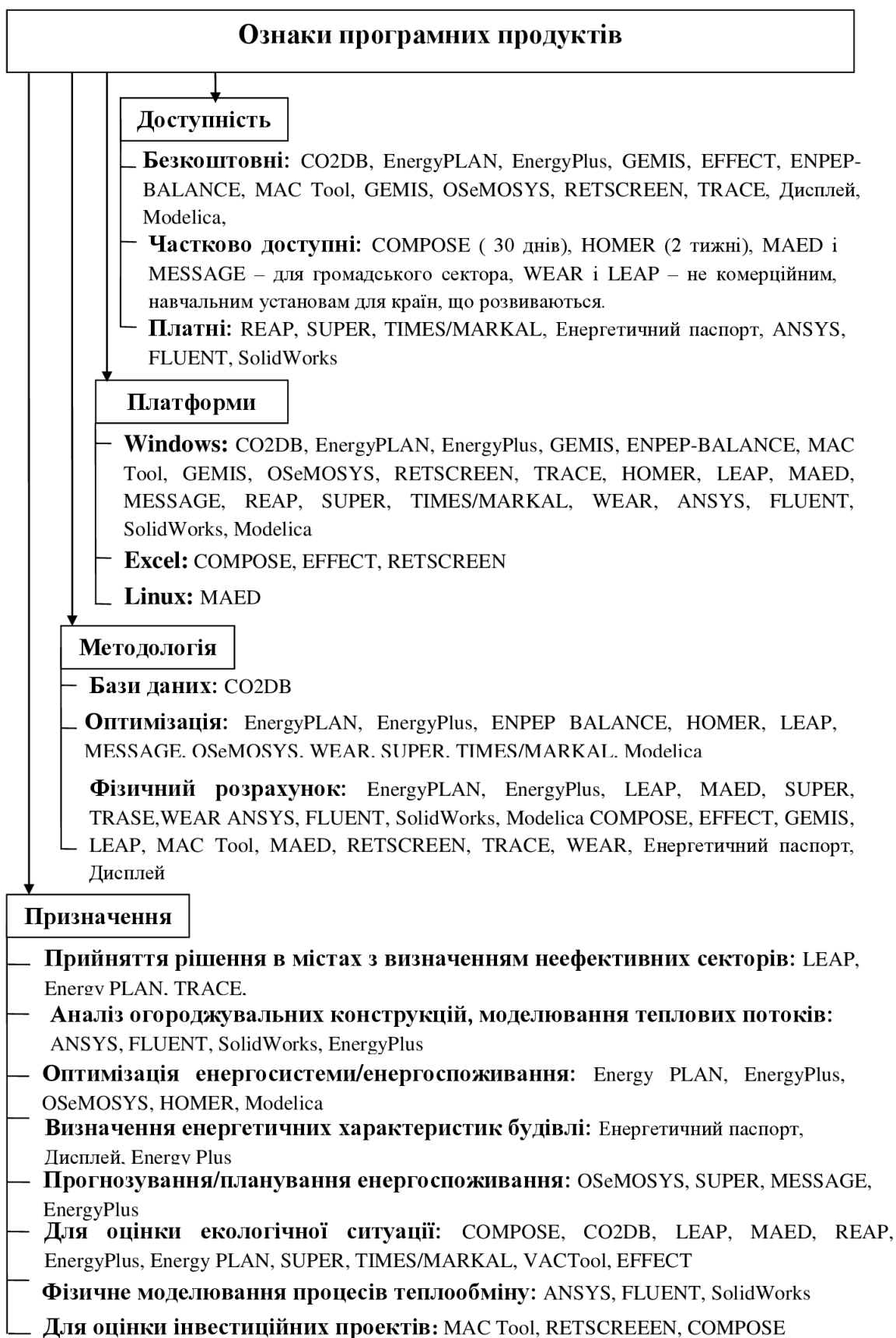


Рис. 1.3 – Ознаки програмних продуктів [69]

Залежно від завдань, що вирішуються, відповідні програми побудовані на основі методології моделювання або аналітичні. Програмні продукти EnergyPlus, eQUEST та TRNSYS базуються на динамічних методах [71-73]. Нестационарні підходи використовуються в програмних продуктах ANSYS / FLUENT, SolidWorks, Modelica, які дозволяють аналізувати просторовий розподіл досліджуваних параметрів [74-76].

Динамічні методи, які набувають популярності в Україні, вже широко використовуються країнами Європи. Динамічні програмні продукти на базі сіткових моделей EnergyPlus, eQUEST та TRNSYS використовують підходи європейських стандартів, які активно впроваджуються на теренах України останнім часом [78-81, 30, 44]. Програмне забезпечення EnergyPlus є найбільш розвиненою і докладною програмою для аналізу споживання енергії на будівлях, що базується на динамічному моделюванні. Для умов України найбільш доступним є використання EnergyPlus з наступних причин: програмний продукт у вільному доступі; має досить високу точність розрахунків та можливостей; для двох міст України у вільному доступі погодинні кліматичні файли, що підтримується програмою [82]. Загалом для України створено 41 погодинний файл. Програмний продукт не має свого графічного редактору, тому розміри елементів огорожень можна задати по координатах або через графічний редактор Google SketchUp або ліцензійну версію Design Builder. Задаються теплофізичні властивості багат шарового огороження, віконні конструкції з оптичними особливостями скління, інженерні системи, графік роботи та температурні режими роботи та інше. Програмний продукт враховує інерційні особливості огорожень та систем будівлі, динаміку мінливості кліматичних даних. На виході програмний продукт дозволяє отримувати температуру повітря, радіаційну температуру поверхонь, навантаження на систему опалення/охолодження та вентиляцію (HVAC-систему), та інше. EnergyPlus використовує функції DOE-2 та BLAST, до яких наближені європейські стандарти, що робить його привабливим для використання [83, 84]. Статті [85-88] присвячені моделюванню енергопотреб

будівель різного призначення та для різних вихідних параметрів в програмному середовищі EnergyPlus. В статтях розглядаються об'єкти соціальної сфери, енергоспоживанням цих об'єктів управляється та контролюється на рівні держави, що близьке до підходів реалізованих в нашій країні.

Моделі на базі стандартів.

Національні стандарти для визначення потреби в енергії будівель в кожній країні свої, наприклад, існують американські стандарти ASHRAE, DOE-2 та серія Європейських стандартів EN. [89] Стандарти EN активно впроваджуються в Україні, тому основна увага приділена саме цим стандартам [13, 15, 16, 23].

Один з оціночних підходів, яким і досі користуються в Україні, базується на використанні норм та опалювальних характеристик. Більшість будівель України відноситься до будівель масової забудови 60-90-х років. Для даних будівель встановлено питомі характеристики значення опалення та вентиляції в залежності від призначення, року забудови та об'єму будівлі [90]. За даними укрупненими опалювальними характеристиками і сьогодні проводяться розрахунки в Україні. Також існують міжгалузеві норми на потребу в опаленні, що дозволяють встановлювати енергоспоживання в залежності від призначення та розташування об'єкту [91].

До 2015 року методи визначення енергоспоживання та оцінки енергоефективності в Україні враховували лише річне енергоспоживання на опалення та не приймали до уваги енерговитрати на охолодження та гарячого водопостачання (ГВП) [35, 92]. Згідно з [35] енергетична ефективність будівель повинна визначатися на базі розрахункової або фактичної річної енергії на задоволення потреб на опалення, при забезпеченні відповідних санітарно-гігієнічних норм в приміщеннях будинку.

Стандарт ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 [35], на відміну від укрупнених показників [90], використовує більш деталізований метод розрахунку енергоспоживання на основі градусо-днів (метод ГД). Метод ГД є стаціонарним методом розрахунку. Фіксована тривалість опалювального періоду необхідна для розрахунків сумарної

теплопередачі та сумарних теплових надходжень протягом опалювального періоду [35].

Даний метод також дозволяє скоригувати споживання енергії на опалення відповідно до фактичних значень зовнішньої температури, тривалості опалювального періоду та середніх температур приміщень. [93] Але при розгляді будівлі, як енергетичної системи до енергетичних потреб повинні бути віднесені потреби на опалення та охолодження для підтримування заданої температури, потреби у енергії на ГВП, а також джерела енергії.

В ЄС розроблено ряд стандартів для визначення енергетичних характеристик і встановлення енергетичного рейтингу та енергетичної сертифікації будівлі EN 13790, EN 15603, EN 15217[23, 16, 15].

EN ISO 13790, введений в Україні [23], представлено методи для розрахунку витрат енергії на опалення, охолодження будівлі. Стандарт [23] надає два основні типи методик розрахунку енергоспоживання на опалення та охолодження:

– квазістаціонарні методи, за якими для визначення споживання за рік або сезон тепловий баланс розраховують за місячними інтервалами часу, що дозволяє прийняти до уваги динамічні ефекти за емпірично визначеним коефіцієнтом використання надходжень та/або втрат [23, 94];

– динамічні методи, за якими тепловий баланс розраховують за короткотривалими часовими періодами (зазвичай одна година), беручи до уваги обсяг тепла, що акумулюється в або вивільняється від масиву будинку за допомогою приведення розрахунку до вузлів [23].

На основі даного стандарту [23] розроблений метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та ГВП [94]. Використана в цих стандартах методика дозволяє розділити будівлю на декілька зон, використовувати різні часові інтервали, тим самим досягти більшої точності розрахунку. На зміну стандарту ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 [35] введений метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94], що є заснований на квазістаціонарному підході з стандарту [23] та включає визначення потреби на опалення, охолодження, ГВП та базується на визначені місячних показників

(квазістаціонарний метод розрахунку). У зв'язку з цим отримав розвиток стандарт ДБН В.2.6-31:2006 [92], введено стандарт ДБН В.2.6-31:2016 [95]. Нормативні значення питомих показників енергоефективності для груп будівель, також переглянуто, вони тепер включають енергопотребу на опалення, охолодження та ГВП [95].

Для детального аналізу енергетичних характеристик доцільно використовувати динамічні моделі розрахунку енергоспоживання. Другий підхід європейського стандарту [23] базується на спрощеному погодинному методі розрахунку енергоспоживання. В стандарті [23] запропонована модель – п'ять опорів, одна ємність (5R1C). Даний метод не набув широкого вжитку в Україні - і потребує накопичення та аналізу досвіду використання .

Поняття "енергоефективність будинку" та "класифікація будинків за показником енергоефективності" ввійшли до термінології нормативних документів України з набуттям чинності ДБН В.2.6-31:2006. Визначення "теплоізоляційна оболонка будівлі" - розглядається як єдина система, що дозволяє вже на стадії проектування здійснювати оптимізацію конструктивних рішень по енергозбереженню [96]. Зміни до ДБН В.2.6-31:2006 внесені в липні 2013 року [92] та розділяє територію України на дві температурні зони, на зміну чотирьом. На зміну ДБН В.2.6-31:2006 з зміною 2013 року введений ДБН В.2.6-31:2016 [95], де підвищено мінімально допустимий опір теплопередачі огорожень будівель [95].

Одним з інструментів оцінки енергетичної ефективності будівель, що широко використовується у світовій практиці та набуває розповсюдження й в Україні є енергетична сертифікація будівель, яка є останнім кроком відображення змін в енергоспоживанні при проведенні заходів з підвищення енергоефективності.

З введенням в дію Директиви 2002/91/ЕС європейського парламенту та Ради щодо енергетичної ефективності будівель [97] енергетична сертифікація будівель була поширена на всі країни-члени, а з 2009 року стала обов'язковою. Метою [97] стало сприяння покращенню енергетичної ефективності будівель, з урахуванням зовнішніх кліматичних та вимог щодо клімату у приміщеннях, при цьому встановлено вимоги до загальної схеми методології розрахунку комплексного

енергетичного виконання будівель; застосування мінімальних вимог стосовно енергетичної ефективності будівель; енергетичної сертифікації будівель тощо.

Для реалізації положень [97] в ЄС розроблено низку стандартів, зокрема: EN 15316-2-1:2007 [98], що нормує ефективність систем опалення; ДСТУ EN 15217:2013 [15], що забезпечує методи для визначення енергетичної ефективності будівель з урахуванням теплоспоживання як системи опалення в опалювальний період, так і системи кондиціонування в період охолодження, енергоспоживання систем гарячого водопостачання, вентиляції, освітлення, а також оцінки ступеню автоматизації інженерних систем та оцінки захисту від інсоляції; EN 15232:2007 [99], що визначає вимоги до інженерних систем будівель з урахуванням класів енергоефективності; EN 12831:2003 [13], що містить порядок розрахунку теплової потужності систем водяного опалення; EN 13829 [100], EN 14501 [101], EN 13779 [102] – надають можливість адекватного порівняння показників енергоефективності будівель та їх енергетичної сертифікації; за EN 7730 [103] проводиться нормування мікроклімату приміщень, в тому числі за параметрами теплового комфорту приміщень, ДСТУ EN 15603:2013 [16], наводить методологію оцінки загального енергоспоживання будівлею та типи рейтингів, що необхідно використовувати для оцінки енергетичної ефективності будівель, ДСТУ EN 15217:2013 [15], наводить методологію енергетичної сертифікації та запропоновані підходи побудови шкал енергоефективності, що має плаваючий нерівномірний розподіл між класами, межі яких залежать від типу призначення будівлі. ДСТУ EN 15217:2013 [15] введений в Україні, але не використовується в зв'язку з складнощами отримання фактичних показників енергоспоживання типів будівель для умов України [104].

У європейських стандартах, що визначають процедуру та порядок проведення енергетичної сертифікації будівель визначено необхідність розробки методу оцінки енергоефективності як нових, так і існуючих будівель. У зв'язку з цим у ДСТУ EN 15603:2013 [16] запропоновано два типи енергетичних оцінок будівель: перша – розрахункові, що базується на розрахунках очікуваного

енергоспоживання будівлею для потреб систем опалення, вентиляції, охолодження, гарячого водопостачання (ГВП) та освітлення і друга – інструментальна оцінка, що базується на фактичних вимірних в будівлі даних.

Розрахункова оцінка поділяється на стандартні та пристосовані оцінки. Стандартна оцінка використовує процедуру розрахунку в межах використання стандартних моделей та кліматичних умов не залежно від поведінки мешканців, фактичних погодних та внутрішніх умов клімату. Дана оцінка може бути сформована для будівель протягом процесу проектування, нових чи існуючих будівель. В останньому випадку у розрахунку використовуються реальні умови і рейтинг стає пристосованим. У світовій практиці частіше за все інструментальний рейтинг використовується для існуючих громадських та комерційних будівель, а розрахунковий – для малих, індивідуальних будівель та всіх нових будівель [104]. При цьому розрахункові оцінки доцільно використовувати для нових будівель на передпроектній та кінцевих стадіях будівництва через наявність всієї необхідної інформації для розрахунку та відсутність фактичних даних про енергоспоживання та режим експлуатації будівлі. Низка цих стандартів вже введена [15, 16, 23], але їх використання потребує вихідних параметрів, які не визначенні/ не прийняті в Україні.

Висновки. Нормативи побудовані на використанні моделей на базі зменшених часових інтервалів розрахунку є нові для умов України та потребують аналізу і порівняння.

Авторські моделі розрахунку.

Крім математичних моделей оцінки енергоефективності будівель на базі стандартів та програмних продуктів, знайшли своє застосування альтернативні авторські модифіковані моделі.

Поширені стаціонарні та квазістаціонарні підходи розрахунку дозволяють проводити аналіз в річному/сезонному чи місячному розрізі [35, 94]. Інерційні особливості огорожень враховуються досить укрупнено або й не враховуються зовсім. Тому для аналізу погодинних значень імітаційна модель повинна бути

динамічною. У роботах Табунщикова Ю.А. та Богословського В.Н. [20, 22, 105] значна увага присвячена розробці енергетичних моделей будівель та застосування їх для оптимізації теплових режимів. Велика кількість робіт присвячена динамічним особливостям розрахунку енергетичних характеристик будівель [105, 20]. Однак математичні моделі, що наведені в [105, 20] потребують програмної платформи для їх реалізації.

Моделі на базі стандартів [23] отримали розвиток, що представлено в дослідженнях [63-68]. Динамічний підхід до аналізу наведено в європейському стандарті EN ISO 13790, який введений в Україні з 2013 року [23], з використанням моделі 5R1C. В статтях [106-111] проведено особливості застосування даного стандарту для різних країн Європи. Модифікації моделі 5R1C наведені в статтях [63-68], що стосується розділення вузла вентиляції на природну та механічну. Rouvel і Zimmermann [112] розділили будівельні елементи на симетричні та асиметричні навантаження, які, як правило, являють собою внутрішні перегородки та зовнішні стіни відповідно. Запропонований розподільний підхід для двох теплових навантажень набув чинності в Німеччині в стандарті VDI 6007-1 [37], де запропонована вузлова модель 7R2C. В статті [68] проведено порівняння моделі 5R1C, 7R2C з моделлю, реалізованою в програмному продукті TRNSYS для міст Палерно, Венеції, Відня та Хельсінкі для потреб опалення та охолодження. Розбіжність потреби на опалення не перевищує 9% для розглянутих міст, на охолодження - до 27%, що стало підставою збільшення числа опорів та ємностей в новому стандарті [68], що дозволить точніше визначити енергопотребу на охолодження будівель.

Останнім часом широко використовуються емпіричні методи моделювання енергоспоживання будинків з використанням нейронних мереж, елементів нечіткої логіки та регресійних моделей [113-121]. На основі накопичення фактичних даних по факторам впливу і по споживанню енергії складається, наприклад, регресійна модель, що дозволяє аналізувати та передбачати різні аспекти поведінки будівлі як енергетичної системи [59, 29], тобто формальний підхід Data modeling.

На відміну від динамічних моделей для оцінки енергетичної ефективності будівлі, які потребують більше часу та розширеного пакету вхідних значень, використання статистичних моделей є гарною альтернативою по швидкості та простоті використання [123, 124, 31, 32, 38]. Накопичені фактичні дані несуть комплексний вплив ряду факторів, що не дозволяє виокремити вплив кожного, що ускладнює аналіз та зменшує точність результатів. Моделі, що базуються на статистичному аналізі та штучному інтелекті, вимагають великої кількості накопичених даних для забезпечення високої точності прогнозування результатів [124]. Регресійні залежності дозволяють вирішувати задачі прогнозування на різних рівнях.

Методи машинного навчання чи методи метамоделювання (Machine learning models or metamodeling methods) проаналізовані та використані в [32, 31, 38, 39, 48, 49] для прогнозу річного споживання енергії використовуючи різні часові інтервали розрахунку, будівель та кліматичних даних.

Деякі з них присвячені короткотерміновому прогнозу (24 годинний прогноз) і ультра короткочасному (1 годину) прогнозування з метою забезпечення енергоефективного прогнозного контролю системи HVAC та енергозбереження. Протягом дослідженого періоду економія може оцінюватись до 48% для опалення та 39% - охолодження [31] прогноз спирається на значення температури внутрішнього повітря на початку доби та на попередньо навчений оптимізатор і не може бути використаним при значних коливаннях вхідних параметрів за попередній період.

Короткочасні (24 години вперед) та ультракороткочасні (1 година) прогнози навантаження на систему опалення розглянуті в статті [38], визначено достатнім враховувати 8-ми годину передісторію зміни вхідних параметрів. Для кліматичних умов та рівня масивності будівель України величина збурень вхідних параметрів та їх вплив може бути більш значним. Робінзон та ін. автори [32] аналізують дані, отримані з огляду енергоспоживання комерційних будівель, що мають невелику кількість будівельних особливостей/відмінностей, авторами отримано оцінку $R^2=0,82$. В статтях [48, 49] розглянуті підходи базуються на

використанні результатів імітаційного моделювання будинку використані для машинного навчання (machine learning).

В статті [50] розглянута оцінка теплового навантаження в будівлях з використанням динамічних багатовимірних адаптивних регресійних сплайнів, машин експериментального навчання, гібридних моделей MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines) and ELM (Extreme Learning Machine). В статті [50] прогнозування теплового навантаження та охолодження використовується для підвищення енергетичних показників будівлі при проектуванні. Прогноз навантаження здійснювався на основі 8 залежних змінних, таких як відносна компактність, площа поверхні, площа стін, площа даху, загальна висота, орієнтація, площа застління, розподіл площ застління по орієнтаціям. В існуючих будівлях в процесі експлуатація виникає інший ряд вагомих факторів, які впливають на динамічні режими енергоспоживання та використовуються при оптимізації в будівлях.

В статті [39] запропонована регресійна адаптивна модель споживання енергії в залежності від кліматичних даних для старих шведських житлових будівель. Результати отримані за регресійною залежністю відповідають традиційному методу градусо-днів (HDD - heating degree days). В випадку низькоенергетичних будівель та майже нуль енергії будівель кращий результат отримується з рівняння регресії особливо у випадку, якщо кілька років тривають аномальні погодні умови або аналізуються більш складні інженерні об'єкти, такі як теплові насоси чи сонячні панелі.

Наприклад, у роботі [54] регресійні залежності використовуються для щорічного прогнозування споживання енергії. В адміністративних будівлях лінійні регресійні моделі, описані в [40], дозволяють аналізувати річну потребу в енергії для нагріву та охолодження в семи різних кліматичних зонах. Отримана помилка становить 10-15%, а $R^2=0.9$.

В регресійних залежностях для річних інтервалів споживання енергії не враховується вплив інерційних характеристик огорожувальних конструкцій та

технічних систем, це робить не можливим їх перенесення та використання для прогнозування на менших відрізках часу (доба, година).

Щоб підвищити точність результатів, можна використовувати сірі моделі, згадані вище [125, 33]. У роботі [125] розглядаються лінійні регресивні залежності, які включають 6 впливових факторів, але не враховують передісторію зміни факторів. Відсутність передісторії впливу можлива у випадку постійного профілю температури будівлі, який в умовах України важко досягти. Авторами [125] розроблені лінійні багатофакторні регресійні залежності на базі даних імітаційного моделювання в програмному середовищі EnergyPlus для трьох типових будівель та трьох міст, що є представниками різних кліматологій. Регресійні залежності такого типу можуть використовуватись як простий та дешевий інструмент аналізу економічної ефективності при впровадженні енергозберігаючих заходів [125]. Створення моделей регресії є альтернативою імітації складної архітектури будівлі. Вони можуть бути використані для аналізу та прогнозування поведінки будівлі як енергетичної системи [33, 36, 125-129]. Моделі регресії - це простий у використанні інструмент для аналізу енергетичних характеристик, який може застосовуватися до певної будівлі, на відміну від динамічних моделей [33]. В статті [33] нелінійна багатофакторна регресія для прогнозування погодинного навантаження на систему опалення була створена на основі фактичних даних в програмному середовищі MATLAB визначені коефіцієнти та показники степеня. Модель враховує інженерні системи опалення, але не враховує особливості зміни факторів за попередню годину. У випадку, якщо внутрішня температура повітря за попередні години була вища/нижча нормативно запланованої - це не враховується моделлю, що обмежує використання регресії в переривчастих режимах опалення. В статті [126] розроблена багатофакторна лінійна регресійна залежність для прогнозування споживання енергії в офісних будівлях, впливових параметрів обрано 17, які однотипні з параметрами запропонованими в [50, 130]. В роботі [131] розглянуто лінійні регресійні залежності для трьох громадських будівель, що дозволяють прогнозувати навантаження на систему опалення для різних часових інтервалів

(година, день, місяць) та кліматичних даних. В залежності від задач прогнозу може використовуватися одна з простих регресійних залежностей споживання опалення від зовнішньої температури [131].

Регресійний аналіз часто використовується для довгострокових прогнозів, наприклад, в статті [132] запропоновані багатофакторні регресії для оцінки споживання електроенергії і природного газу в супермаркеті Англії від таких фактичних параметрів як зовнішня температура та відносна вологість повітря (середньодобові значення). Дана модель має ряд обмежень та не враховує сонячну радіацію, швидкість та напрям вітру та не враховує будь-які зміни в оболонці будівлі [132].

Значна увага дослідників зосереджена на використанні лінійних багатофакторних регресійних залежностей через їх простоту, нелінійні багатофакторні регресії вивчені мало через складність використання та аналізу умов їх побудови, тому зазвичай віддають перевагу математичним моделям навчання (machine learning models), які досить точні, самонавчаючі, але мають обмеження в аналізі та застосуванні, до них відносять нейронні мережі.

Також регресійні моделі часто використовуються при якісному регулюванні рівня опалення [133]. Такі залежності можна побудувати на основі погодинних накопичених фактичних даних або даних моделювання. [29] У першому випадку отримані результати несуть комплексний вплив ряду факторів, що ускладнює аналіз та визначення впливу кожного фактора окремо. У другому випадку модель регресії базується на ряді результатів імітаційного моделювання [134].

Висновки. Сучасні європейські стандарти в сфері енергоефективності будівель активно гармонізуються та впроваджується в Україні. Динамічні моделі на базі програмних продуктів та стандартів, які широко використовуються дослідниками провідними країнами світу, достатньо досліджені для їх кліматичних умов. Такої бази порівняння для будівель, які знаходяться в кліматичній зоні різкоконтинентального клімату України, проведено не було. Основна перешкода – відсутність адекватної оцінки енергопотреб в будівлях в Україні призводить до того, що на відміну від країн ЄС, неможливо визначити

базу порівняння поточного рівня енергоефективності сектора нерухомості і встановити реалістичні цілі щодо його зниження в перспективі. Поглиблені підходи до аналізу будівель, як складної енергетичної системи, при реальних напрямках підвищення енергоефективності слід враховувати зміни теплового стану в час, мінливість погодних даних та інше.

Висновки та постановка завдань дослідження

Ефективне використання енергоресурсів в житлово-комунальному секторі є надзвичайно важливим завданням на шляху до забезпечення соціально-економічного розвитку та енергетичної незалежності України в цілому. Оціночний потенціал енергозберігаючих заходів із зменшення річної потреби тільки на опалення житлових та громадських будинків в Україні складає на рівні 800 млн. ГДж [2].

Вирішення задач енергоефективності будівель з врахуванням комплексу показників, а саме теплофізичні та теплоінерційні особливості огорожень, умов мікроклімату, графіки експлуатації, кліматичні умови, система опалення та теплонадходження тощо, які впливають на питомі енергетичні характеристики (показник енергоефективності) будівлі є складною комплексною задачею, тому будівлю доцільно розглядати як складну енергетичну систему в комплексі з зовнішнім середовищем. Вирішення цих задач потребує створення математичних моделей для дослідження енергетичних характеристик будівлі. Математичні моделі можуть бути різного складності та кроку дискретизації розрахунку в часі в залежності від задач, що ставляться, що спрощує/ускладнює модель.

В більшості розвинених країн оптимізація показників енергоефективності будівель виконується на стадії проектування. В Україні житловий та громадський фонд будівель в значній своїй мірі побудований в роки СРСР, тому аналіз показників енергоефективності широко використовується на стадії експлуатації для вже діючих будівель. Гармонізація кращих європейських підходів з умовами України - є одним з основних кроків. Динамічні моделі на базі програмних

продуктів та стандартів, які широко використовуються провідними енергоефективними країнами світу, достатньо дослідженні для їх кліматичних умов. Таких системах порівнянь для будівель, які знаходяться в зоні різкоконтинентального клімату (кліматичні умови України) проведено не було.

Для оцінки енергоефективності будівель як кінцевий показник використовують енергетичну сертифікацію. Підходи до сертифікації та побудови шкал енергоефективності будівлі потребують врахування особливості об'єктів, які розташовані у великих містах чи у провінційних містечках України.

Потребують розвитку та аналізу питання адаптації і застосування в умовах України міжнародних стандартів та наукових підходів до моделювання теплового стану будівель, а саме:

1) зменшення часових інтервалів осереднення і розширення спектру впливових факторів з орієнтиром на передісторію зміни та умов експлуатації, що є вагомим показником для масивних огорожень, які застосовуються в Україні.

2) порівняння моделей та умов їх застосування, в тому числі використання баз кліматичних даних для умов України.

3) розвиток і порівняння комплексного застосування чисельного моделювання, регресійного аналізу та експериментальних даних як основа для аналізу теплового стану будівель в Україні на базі впровадження нових національних стандартів.

4) гармонізація застосування стандартів визначення класу енергетичної ефективності будівель. Використання рівномірних та нерівномірних шкал енергетичної сертифікації будівель.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ТА ЕНЕРГОПОТРЕБИ БУДІВЕЛЬ

Рівень енергоспоживання будівель залежить від ряду факторів, таких як огорожувальні конструкції, кліматичні умови тощо. Як згадувалось раніше, що в залежності від задач, що вирішуються використовуються різні моделі. Наприклад, для оцінки інвестиційних проектів достатнім є використання стаціонарних і квазістаціонарних моделей для енергетичного аналізу. В умовах керування та детального вивчення енергетичної поведінки об'єкту використовують динамічні моделі. Тому в цьому розділі представленні об'єкти аналізу та моделювання, моделі, що досліджуються, а також методики перерахунку первинних погодних факторів на кінцеві фактори впливу на енергетичні характеристики в зоні будівлі/кімнати, що застосовуються в розглянутих моделях.

2.1 Об'єкти аналізу та моделювання

В роботі проводився аналіз характеристик енергетичного стану та моделювання для громадських об'єктів різної складності, регіонального розміщення та року побудови, умов експлуатації. Основна частина будівель розглянутих в роботі відносяться до закладів освіти та науки: школи, дитячі навчальні заклади (ДНЗ), вищі навчальні заклади (ВНЗ). На рис. 2.1 наведено загальну характеристику об'єктів моделювання.

При оцінці та аналізі енергоефективності об'єкту потрібно враховувати, крім енергетичних показників, ряд інших параметрів, наприклад, об'єкти розташовані в невеличких містах та/або сільській місцевості мають свою специфіку функціонування та архітектурно відмінні від типових проектів будівель масової забудови міст. Тому при аналізі окремо розглядалися об'єкти розташовані в урбанізованих містах та в невеликих провінційних містечках.

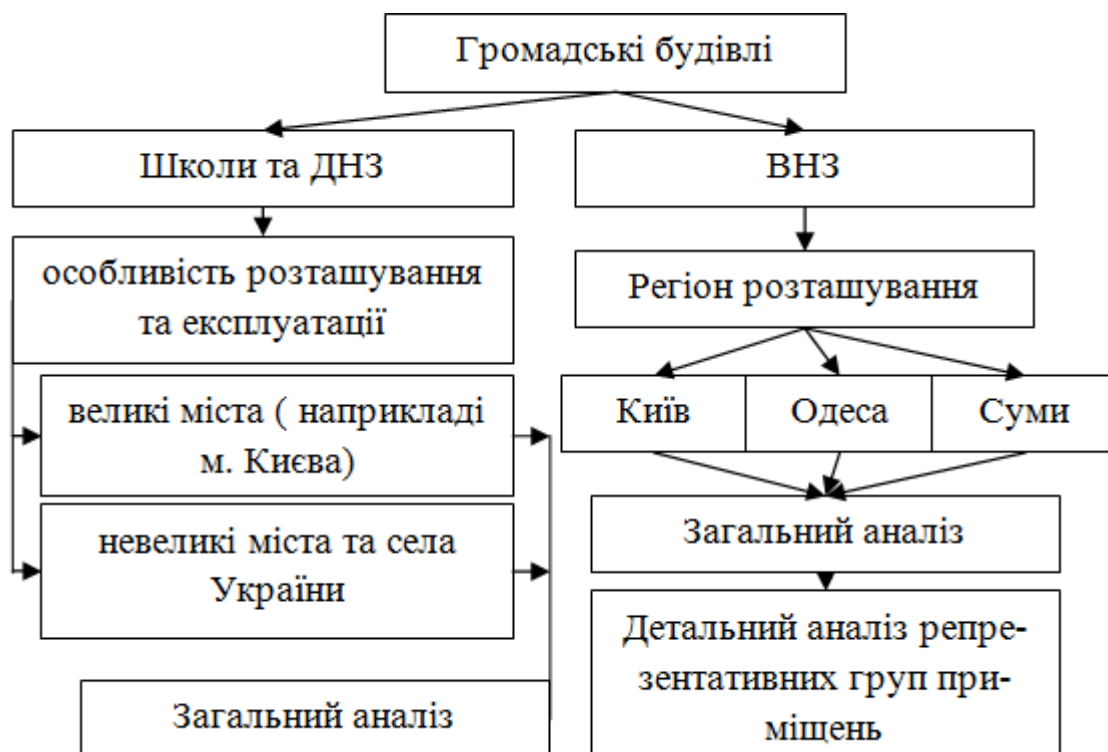


Рис. 2.1 –Об'єкти дослідження

В рамках проекту «Сприяння розвитку соціальної інфраструктури» Українського фонду соціальних інвестицій за фінансової підтримки Уряду Німеччини було обрано більш ніж 60 будівель об'єктів бюджетних установ соціальної сфери, розташованих в невеличких містах та сільській місцевості Вінницької, Кіровоградської та Львівської області. Це типові невеликі об'єкти, більшість з них знаходяться в сільській місцевості. Більшість будівель побудована в період 1955–1990 рр., деякі будівлі збудовані навіть наприкінці XVIII сторіччя. Більшість об'єктів, які розглядалися в рамках інвестиційного проекту, – це школи та ДНЗ. Об'єкти частково використовують свої площі, що пов'язане зі зменшеною відносно проектних показників кількістю дітей. Дані особливості використання площ призводять до перевитрати споживання енергоресурсів, а отже, - надмірних витрат в бюджетній сфері.

До термомодернізації в розглянутій групі будівель соціальної сфери середній термічний опір зовнішніх непрозорих огорожень становив 0,8–1,5 м²К/Вт. На розглянутих об'єктах використовували застарілі котли, деякі будівлі опалюються

за допомогою печей (грубок). Основний вид палива – це вугілля та дрова, так як в даних регіонах відсутній газ. [135] Характеристика об'єктів наведена в Додатку Б.

В місті Київ в рамках співпраці Солом'янської районної державної адміністрації та Інститута енергозбереження та енергоменеджменту проводились енергетичні аудити для шкіл та ДНЗ даного району. Всі об'єкти відносились до 70-80-тих років масової забудови з класичними архітектурними конфігураціями та теплофізичними рішеннями, що відповідають рокам забудови. На відміну від вище розглянутої групи будівель, дані будівлі повністю використовують площу забудови та в 3-4 рази мають більший об'єм. Характеристика об'єктів наведена в Додатку В.

Наступним блоком аналізу (рис. 2.1) були будівлі ВНЗ. В аналізі будівлі розташовані в м. Києві, Одесі та Сумах. Розглянуті міста відносяться до різних температурних зон України: Київ та Суми - I температурна зона; Одеса до II температурної зони.

ВНЗ м. Києва розглянуто на прикладі КПІ ім. Ігоря Сікорського навчального корпусу № 22. Це 7-поверхова будівля з технічним поверхом, збудована в 1974р., загальна площа становить 16030м². В будівлі знаходяться адміністративні приміщення - 8%, навчальні аудиторії - 38,5%, комп'ютерні класи - 5%, науково-дослідні лабораторії - 19%, буфет, підсобні приміщення - 15%, НДІ та навчальні центри - 14,5%. Площа застакнення – 4055м² (близько 45% площі зовнішніх стін). Будівля має форму витягнутого прямокутника зорієнтованого фасадами на північ та південь. Вентиляція - природна [136].

Теплопостачання здійснюється від районних мереж. Система опалення незалежна однотрубна радіаторна (радіатори М-140) з верхнім розведенням по 53 стоякам, підключена до теплових мереж через пластинчатий теплообмінник. Комерційний облік теплової енергії здійснюється через лічильник, встановлений на вводі в будівлю. В більшій частині опалювального періоду теплові мережі не дотримують температурний графік подачі теплоносія, що призводить до зниження температур в приміщеннях будівлі відносно комфортних умов. (див. п.4.1-4.3 аналіз температурних карт та погодинної зміни внутрішньої температури

повітря). Підходи до вибору репрезентативних приміщень для детального аналізу наведені далі.

Репрезентативні приміщення ВНЗ м. Одеси обрано з аналогічними геометричними та теплофізичними властивостями огороження, що дозволить провести аналіз застосування моделей для різних температурних зон України.

ВНЗ в м. Суми обрано приміщення з кращими теплофізичними параметрами огорожень, віконними конструкціями та меншим коефіцієнтом засклення.

Метою дослідження є використання математичного моделювання для аналізу зміни енергетичної поведінки обраного об'єкту. За умов виключно центрального регулювання та недостатнього рівня опалення в приміщеннях будівлі крім зниження рівня має місце відчутний нерівномірний розподіл температур, різний коефіцієнт засклення та стан вікон, вплив радіації та інфільтрації, що дозволяє розглядати будівлю в якості об'єкта впливу сукупності різних експлуатаційних факторів на просторово-часові зміни температур приміщень.

Науковці близького зарубіжжя Табунщиков Ю.А., Богословський В.Н. [20, 105] та далекого зарубіжжя [51] в своїх працях при детальному аналізі динамічних енергетичних характеристик будівлі стверджують, що достатнім є розглядати не будівлю в цілому, а окрему її зону (офіс), дані приміщення яких є однотипними і за необхідності можна повторити аналогічний розрахунок. Виділення репрезентативних приміщень дозволить проводити аналіз для окремих зон та отримати загальну картину енергетичних характеристик для об'єкту в цілому.

Враховуючи запропоновані підходи та рекомендації статей [20, 51], а також на основі температурних карт були обрані репрезентативні приміщення досліджуваних будівель. Репрезентативні приміщення були обрані з врахуванням призначення, орієнтації та поверховості будівлі. Кутові приміщення розглядалися окремо, враховуючи геометричними особливості протяжності будівлі, дані приміщення є не характерними для будівлі в цілому[136].

Об'єктом досліджень в м. Києві та Одесі обрано кімнати орієнтовані на Пн та Пд (для оцінки аналізу крайніх впливів кліматичних даних) та розташовані на

різних поверххах (для аналізу повітряних потоків в будівлі). Розміри кімнати 5,5 м х 6,1 м, висота приміщення становить 3,2 м. Кімната має одну зовнішню стіну (5,5 м) з вікном (5х2,5 м). Конструкція будівлі відповідає вимогам забудови 70-х років. Зовнішня стіна з термічним опором $1 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Вікно з подвійним засткленням у дерев'яних спарених плетіннях. Внутрішні стін – цегляна кладка в пів-цегли. Переkritтя над опалювальними приміщеннями залізобетонні – 20 см. Вентиляція - природна.

В м. Суми об'єктом дослідження є аудиторія лабораторного корпусу Сумського державного університету.

Ширина кімнати без рахування стін становить 8,52 м, довжина 6,08 м, висота кімнати - 2,72 м. Кімната має три внутрішніх стіни та одну зовнішню стіну. Опалювана площа кімнати становить близько $51,8 \text{ м}^2$. Переkritтя загальною товщиною 250 мм виконане з монолітної залізобетонної плити завтовшки 220 мм, покрита бетоном на зольному гравію товщиною 30 мм. Місцями підлога покрита плиткою завтовшки 5 мм, на бетонній стяжці товщиною 15 мм. Внутрішні стіни, стеля та підлога контактують з приміщеннями, температура повітря у якому не відрізняється від температури повітря у приміщенні, що досліджується, не більше як на 3°C . Будівля має двотрубну вертикальну систему опалення з нижнім розподілом теплоносія. Об'єм внутрішнього повітря – $146,12 \text{ м}^3$. Товщина зовнішніх стін – 0,8 м, об'єм – $19,32 \text{ м}^3$, площа – $24,15 \text{ м}^2$. Товщина внутрішніх стін - 0,18 м, об'єм – $9,66 \text{ м}^3$, площа - $56,25 \text{ м}^2$. Кімната має три вікна з однокамерним склопакетом.

В роботі проведено енергетичний аналіз розглянутих об'єктів з різним набором вихідних параметрів та особливістю функціонування. В залежності від задач, що ставляться для аналізу будівлі як енергетичної системи використано математичне моделювання різного рівня деталізації, а отже і складності.

2.2 Математичні моделі для визначення енергопотреби будівлі на опалення

Визначення та аналіз енергопотреби на базі експериментальних даних несуть в собі ряд наближень та неточностей, тому встановлення річної енергопотреби для опалення будівель доцільно отримувати на базі розрахункових підходів. Вирішення цих завдань, потребує використання методів розрахунку та математичних моделей.

Розрахунок за укрупненими показниками та нормами

Більшість будівель України збудована до 2000-х років в період масової забудови. Для даних будівель встановлено питомі характеристики значення опалення та вентиляції в залежності від призначення, року забудови та об'єму будівлі [90]. За укрупненими опалювальними характеристиками стандарту КТМ-2004 [90] і сьогодні проводяться розрахунки в Україні. Також існують міжгалузеві норми для громадських будівель на потребу в опаленні, що дозволяють встановлювати енергопотребу в залежності від призначення та розташування об'єкту. [91]

$$Q_0^{\text{рік}} = Q_0^{\text{max}} \frac{\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ср.о}}}{\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{р.о}}} n_o \cdot 24, \quad (2.1)$$

$Q_0^{\text{рік}}$ – річна кількість теплоти в опаленні, кВт год/рік,

Q_0^{max} –максимальна витрата теплоти на опалення, кВт,

θ_{int} – розрахункова температура внутрішнього повітря в опалювальний період, °С,

$\theta_{\text{ср.о}}$ – середня температура зовнішнього повітря в опалювальний період, °С,

$\theta_{\text{р.о}}$ – розрахункова температура зовнішнього повітря для проектування, °С,

n_o –тривалість опалювального періоду, діб,

24 – час роботи системи опалення протягом доби, год.

$$Q_0^{\text{max}} = \alpha q_0 V_3 (\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{р.о}}) \cdot 10^{-3}, \quad (2.2)$$

α – коефіцієнт, що враховує відмінність реальних умов від розрахункових,
 q_0 – питома опалювальна характеристика будівель при розрахунковій температурі зовнішнього повітря $\theta_{p,o} = -30^\circ\text{C}$, (Вт м³)/К,
 V_3 – зовнішній об'єм будівлі, м³.

Метод градусо-днів

Метод градусо-днів (ГД) знайшов широке застосування у світовій практиці, як стаціонарний метод, що дозволяє визначати енергопотребу на опалення (Heating Degree Day - HDD) та охолодження (Cooling Degree Day - CDD) [137]. Метод дозволяє проводити корегування фактичного енергоспоживання до базових умов. Проводити розрахунок для різної зовнішньої та внутрішньої температури повітря, кількість опалювальних днів та інше. Спрощений варіант методу ГД знайшов своє застосування в національному стандарті ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 [35].

Фіксована тривалість опалювального періоду необхідна для розрахунків сумарної теплопередачі та сумарних теплових надходжень протягом опалювального періоду [35].

$$Q_o^{\text{рік}} = Q_{tr} - (Q_{int} + Q_s), \quad (2.3)$$

Q_{tr} – загальні тепловтрати будинку через огорожувальну оболонку будинку, кВт·год/рік,

Q_{int} – побутові теплонадходження протягом опалювального періоду, кВт·год/рік,

Q_s – теплові надходження через вікна від сонячної радіації протягом опалювального періоду, кВт·год/рік.

$$Q_{tr} = \chi_1 k_b D_d F_\Sigma, \quad (2.4)$$

χ_1 – розмірний коефіцієнт,

k_b – загальний коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку, Вт/(м²К),

D_d – кількість градусо-днів опалювального періоду,

F_{Σ} – внутрішня загальна площа огорожувальних конструкцій частини будинку, що опалюється з урахуванням покриття/перекриття верхнього поверху та підлоги, м².

$$k_b = k_{tr} + k_{ve}, \quad (2.5)$$

k_{tr} – загальний коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будівлі, Вт/(м²К),

k_{ve} – умовний коефіцієнт теплопередачі огорожувальних конструкцій будинку, що враховує тепловтрати за рахунок інфільтрації та вентиляції, Вт/(м²К).

Даний метод також дозволяє скоригувати споживання енергії на опалення відповідно до фактичних значень зовнішньої температури, тривалості опалювального періоду та середніх температур приміщень [93]. Модель реалізована в програмному середовищі Microsoft Excel.

Розрахунок за укрупненими показниками та нормами, метод градусо-днів використано при порівнянні результатів розрахунку енергопотреби на опалення за допомогою моделей створених на базі програмного продукту EnergyPlus, спрощеного погодинного методу за EN 13790 (5R1C) та квазістаціонарного методу за EN 13790 для репрезентативних приміщень ВНЗ міст Києва та Одеси.

Квазістаціонарний метод за EN 13790

На зміну стандарту ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 [35] введений метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94], що включає визначення потреби на опалення, охолодження, ГВП та базується на визначенні місячних показників (квазістаціонарний метод розрахунку з стандарту EN 13790 [23]). У зв'язку з цим отримав розвиток стандарт [92], введено стандарт [95]. Нормативні значення питомих показників енергоспоживання для груп будівель, також переглянуто, включають потребу на опалення, охолодження та ГВП [94].

Річна енергопотреба будинку в теплі визначається:

$$Q_o^{pik} = \sum_{i=1}^n Q_{H.nd.i}, \quad (2.6)$$

i – порядковий номер опалювального місяця,

n – кількість опалювальних місяців,

$Q_{H.nd}$ – місячна енергопотреба для постійного опалення, кВт·год.

$$Q_{H.nd} = Q_{H.tr} - \eta_{H.gn} Q_{H.gn}, \quad (2.7)$$

$Q_{H.tr}$ – місячна сумарна теплопередача трансмісією та вентиляцією, кВт·год,

$Q_{H.gn}$ – місячні сумарні теплонадходження в режимі опалення, кВт·год,

$\eta_{H.gn}$ – безрозмірний місячний коефіцієнт використання надходжень.

$$Q_{H.hr} = Q_{tr} + Q_{ve}, \quad (2.8)$$

Q_{tr} – теплопередача трансмісією по місяцям, кВт·год,

Q_{ve} – теплопередача вентиляцією, кВт·год.

$$Q_{H.gn} = Q_{int} + Q_{sol}, \quad (2.9)$$

Q_{int} – сума внутрішніх теплонадходжень протягом даного періоду, кВт·год,

Q_{sol} – сума сонячних теплонадходжень протягом даного періоду, кВт·год.

$$Q_{tr} = H_{hr} (\theta_{int} - \theta_e) t, \quad (2.10)$$

H_{tr} – загальний коефіцієнт теплопередачі трансмісією зони, кВт/К,

θ_{int} – задана температура зони будівлі для опалення, °С,

θ_e – середньомісячна температура зовнішнього середовища, °С,

t – тривалість місяцю для якого проводиться розрахунок, год.

$$Q_{ve} = H_{ve} (\theta_{int} - \theta_e) t, \quad (2.11)$$

H_{ve} – загальний коефіцієнт теплопередачі вентиляцією, Вт/К.

Інерційні особливості огороження враховуються через коефіцієнти для чотирьох типів масивностей [23]. Для масивності будівель України в стандарті [94] запропоновано використовувати постійне значення коефіцієнту ($C=80$ Вт·год/(м²·К)), що дещо нівелює інерційні особливості різних будівель.

Модель реалізована в програмному середовищі Microsoft Excel.

Квазістаціонарний метод за EN 13790 використаний при порівнянні результатів розрахунку енергопотреби на опалення та охолодження за допомогою моделей створених на базі програмного продукту EnergyPlus, спрощеного погодинного методу за EN 13790 (5R1C) для репрезентативних приміщень ВНЗ

міст Києва та Одеси, а також при визначенні базового рівня енергоспоживання до та після впровадження енергозберігаючих заходів шкіл та ДНЗ м. Києва та інших розглянутих регіонів України.

Динамічний метод за EN 13790

Для детального аналізу енергетичних характеристик доцільно використовувати динамічні моделі розрахунку енергопотреби. Велика кількість робіт присвячена застосуванню математичних методів визначення енергопотреби та встановленню теплової ефективності будівель [139-145, 105, 20]. Ще один з підходів європейського стандарту [23], що прийнято в Україні, базується на спрощеному погодинному методі розрахунку енергопотреби. В стандарті [23] запропонована сіткова модель – п'ять опорів, одна ємність (5R1C), що дозволяє реалізувати модель у спрощеному трьох вузловому погодинному методі. Даний підхід потребує написання або використання існуючих програм для реалізації даного методу. На рис. 2.2 наведено спрощену схему реалізації методу.

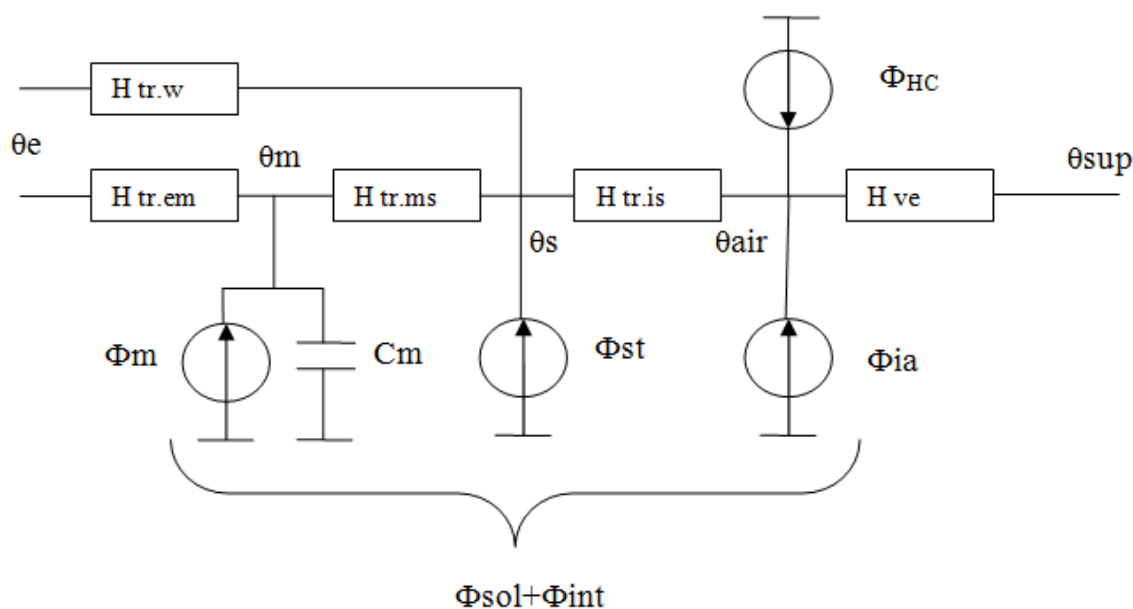


Рис. 2.2 – Модель п'ять опорів, одна ємність (5R1C)

Енергопотреба на опалення знаходяться за розрахунком значення потужності опалення чи охолодження для кожної години, $\Phi_{nc.nd}$, що повинна бути надана до,

або відібрана з вузла температури внутрішнього повітря, θ_{air} , для підтримування певної мінімальної або максимальної заданої температури. Операційна температура θ_{op} є середньозваженою за температурою повітря та середньою радіаційною температурою.

Теплопередача вентиляцією, H_{ve} , прямо пов'язана з вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та вузлом, що відображає температуру припливного повітря, θ_{sup} . Теплопередача трансмісією поділяється на частину через світлопрозорі отвори, $H_{tr.w}$, що приймається з нульовою тепловою масою, та решту через H_{op} , з тепловою масою, яка, в свою чергу, поділяється на дві частини: $H_{tr.em}$ та $H_{tr.ms}$. Сонячні та внутрішні теплові надходження розподіляються між вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , центральним вузлом, θ_s (суміш θ_{air} та середньої радіаційної температури θ_r) та вузлом, що представляє масив зони будівлі, θ_m . Теплова маса відображується питомою теплоємністю, C_m , визначеною між $H_{tr.ms}$ та $H_{tr.em}$. Сполучення провідністю визначається між вузлом температури внутрішнього повітря та центральним вузлом. Величина теплового потоку за рахунок внутрішніх джерел, Φ_{int} , та величина теплового потоку за рахунок сонця, Φ_{sol} , поділені між трьома вузлами: температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та внутрішніми вузлами, θ_s, θ_m . Дана схема може бути реалізована на базі стандартів EN 13790, EN 13786 [23, 138]. стандарт EN 13786 [138] дозволяє розраховувати інерційні особливості огорожень, на відмінну від укрупнених підходів запропонованих в стандарті [23].

$$H_{tr.is} = h_{is} A_{tot} \quad (2.12)$$

$$H_{tr.ms} = h_{ms} A_m \quad (2.13)$$

$$H_{tr.em} = \frac{1}{\frac{1}{H_{op}} + \frac{1}{H_{tr.ms}}} \quad (2.14)$$

$$H_{tr.1} = \frac{1}{\frac{1}{H_{ve}} + \frac{1}{H_{tr.is}}} \quad (2.15)$$

$$H_{tr.2} = H_{tr.1} + H_{tr.w} \quad (2.16)$$

$$H_{tr.3} = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr.2}} + \frac{1}{H_{tr.ms}}} \quad (2.17)$$

$$C_m = \sum k_j A_j \quad (2.18)$$

$$\Phi_{ia} = 0,5\Phi_{int} \quad (2.19)$$

$$\Phi_m = \frac{A_m}{A_{tot}} (0,5\Phi_{int} + \Phi_{sol}) \quad (2.20)$$

$$\Phi_{st} = \left(1 - \frac{A_m}{A_{tot}} - \frac{H_{tr.w}}{9,1A_{tot}}\right) (0,5\Phi_{int} + \Phi_{sol}) \quad (2.21)$$

$$\Phi_{m.tot} = \Phi_m + H_{tr.em} \theta_e + \frac{H_{tr.3}(\Phi_{st} + H_{tr.w} \theta_e + H_{tr.1} \left(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC.nd}}{H_{ve}} + \theta_{sup}\right))}{H_{tr.2}} \quad (2.22)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_{m,t} + \theta_{m,t-1}}{2} \quad (2.23)$$

$$\theta_{m,t} = \frac{\theta_{m,t-1} \left(\frac{C_m}{3600} - 0,5(H_{tr.3} + H_{tr.em})\right) + \Phi_{m.tot}}{\frac{C_m}{3600} + 0,5(H_{tr.3} + H_{tr.em})} \quad (2.24)$$

$$\theta_s = \frac{H_{tr.ms} \theta_m + \Phi_{st} + H_{tr.w} \theta_e + H_{tr.1} \left(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC.nd}}{H_{ve}} + \theta_{sup}\right)}{H_{tr.ms} + H_{tr.w} + H_{tr.1}} \quad (2.25)$$

$$\theta_{air} = \frac{H_{tr.is} \theta_s + H_{ve} \theta_{sup} + \Phi_{ia} + \Phi_{HC.nd}}{H_{tr.is} + H_{ve}} \quad (2.26)$$

θ_{air} – температура внутрішнього повітря, °С;

θ_s – температура центрального вузла s , °С;

θ_m – температура у вузлі m , °С;

θ_{sup} – температура припливного повітря вентиляційних систем, °С;

Φ_{int} – теплонадходження від внутрішніх джерел, Вт;

Φ_{sol} – тепловий потік від сонця, Вт;

$\Phi_{ia}, \Phi_m, \Phi_{st}$ – тепловий потік від внутрішніх джерел та сонця розподіляється між 3-ма вузлами, $\theta_{air}, \theta_s, \theta_m$;

$\Phi_{m.tot}$ – повний тепловий потік, Вт;

$\Phi_{HC.nd}$ – тепловий потік від опалення чи охолодження, Вт;

h_{is} – коефіцієнт теплопередачі між вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та центральним вузлом, θ_s , з фіксованим значенням $h_{is} = 3,45 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$;

h_{ms} – коефіцієнт теплопередачі між вузлами m та s , з фіксованим значенням $h_{ms} = 9,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$;

A_m – ефективна масова площа, м²;

A_j – площа j -го елемента, м²;

A_{tot} – площа всіх зовнішніх огорожень зони будівлі, m^2 ;

C_m – внутрішня теплоємність, Дж/К;

k_j – внутрішня теплоємність на одиницю площі j -го елемента будівлі, Дж/($m^2 \cdot K$);

$H_{tr.ms}$ – сполучення провідністю між вузлами m та s , Вт/К;

$H_{tr.em}$ – сполучення провідністю між вузлами m та зовнішнім середовищем, Вт/К;

$H_{tr.is}$ – сполучення провідністю між вузлами s та внутрішнім повітрям, Вт/К;

H_{op} – узагальнений коефіцієнт теплопередачі непрозорих елементів будівлі, Вт/К;

$H_{tr.w}$ – коефіцієнт теплопередачі прозорих елементів будівлі, Вт/К;

$H_{tr.1}, H_{tr.2}, H_{tr.3}, H_{tr.3}$ – првідність умовних вузлів 1, 2, 3, Вт/м;

H_{ve} – загальний коефіцієнт теплопередачі вентиляцією, Вт/К.

Модель реалізована в середовищі Mathcad.

Динамічний метод за EN 13790 використаний при порівнянні результатів розрахунку енергопотреби на опалення та охолодження за допомогою моделей створених на базі програмного продукту EnergyPlus, квазістаціонарного методу за EN 13790 для репрезентативних приміщень ВНЗ міст Києва та Одеси, а також при аналізі застосування різних баз кліматології. Сіткова модель 5R1C створена для репрезентативного приміщення СумДУ, що використана для прогнозування рівня опалення.

Авторські моделі розрахунку енергетичних характеристик

Крім математичних моделей, які наведені в державних стандартах, існують альтернативні варіанти на базі вже створених програмних продуктів, фізичних розрахунків, статистичного аналізу або їх поєднання.

2.2.1 Модифікації динамічних сіткових моделей з EN 13790

Сіткова спрощена погодинна модель стандарту EN 13790 [23] розглянута в статтях [106-111]. Як згадувалось у п 1.5, 5R1C набула модифікації та представлені в статтях [63-68,]. Зміни пов'язані з розділенням вузла вентиляції на механічну та природну складову [63-67], а також з розділенням масиву внутрішніх та зовнішніх огорожень [68]. Один з можливих напрямків розвитку динамічної сіткової моделі 5R1C є врахування власного теплового випромінювання стін. В діючих підходах оцінки енергетичної потреби будівлі є ряд спрощень, що обмежують якість розрахунків. В [23, 94] приймається, що температура повітря та температура огорожувальних конструкцій однакова. Приймається, що вся сонячна радіація, яка проходять в будівлю, поглинається, а також відсутній власний променевий теплообмін стін. В стандарті [23] при детальному моделюванні невелика частина сонячного випромінювання може залишати зону будівлі через зовнішні огорожувальні конструкції.

Вплив власного теплового випромінювання стін на температуру зовнішніх огорожувальних конструкцій вивчений недостатньо. З метою дослідження врахування даного впливу створена стаціонарна математична модель кімнати. Частина радіаційного випромінювання, яке потрапляє до кімнати, поглинається огороженнями, а частина пропускається через світлопрозорі огорожувальні конструкції до атмосфери. Система рівнянь розробленої математичної моделі сумісного впливу сонячної та теплової радіації вміщує:

Рівняння теплового балансу кімнати [146, 147]

$$Q_B + Q_3 = Q_0 + Q_{TH} + Q_{рез.в.2}, \quad (2.27)$$

Втрати тепла вентиляцією

$$Q_B = nVc\rho(t_{BH} - t_3), \quad (2.28)$$

Втрати тепла через зовнішні огорожувальні конструкції

$$Q_3 = Q'_3 + Q''_3, \quad (2.29)$$

Рівняння теплопереносу на зовні від внутрішньої поверхні стіни [146, 147]

$$Q'_3 = F_{3c} \frac{t_{3c} - t_3}{R_{\alpha 3} + R_{3c}}, \quad (2.30)$$

Рівняння теплопереносу до внутрішньої поверхні стіни від приміщення за рахунок тепловіддачі, сонячної радіації та власного теплового випромінювання внутрішніх стін [148, 149]

$$Q'_3 = F_{зс} \frac{t_{вн} - t_{зс}}{R_{об}} - Q_{рез.зс.1} - Q_{рез.зс.2}, \quad (2.31)$$

Аналогічні рівняння (2.32), (2.33) для внутрішньої поверхні вікна за винятком поглинання сонячної радіації

$$Q''_3 = F_6 \frac{t_в - t_3}{R_{а3} + R_в}, \quad (2.32)$$

$$Q''_3 = F_6 \frac{t_{вн} - t_в}{R_{об}} - Q_{рез.в.1} \quad (2.33)$$

Система рівнянь для результуючих потоків теплового випромінювання стіни, вікна та внутрішніх поверхонь [148, 149]

$$Q_{рез.зс.1} = Q_{эф.зс.1} - Q_{эф.во.1} \cdot \Phi_{во-зс}, \quad (2.34)$$

$$Q_{рез.в.1} = Q_{эф.в.1} - Q_{эф.во.1} \cdot \Phi_{во-в}, \quad (2.35)$$

$$Q_{рез.во.1} = -Q_{рез.зс.1} - Q_{рез.в.1}, \quad (2.36)$$

Теж саме для сонячної радіації [148, 149]

$$Q_{рез.зс.2} = Q_{эф.зс.2} - Q_{эф.во.2} \cdot \Phi_{во-зс}, \quad (2.37)$$

$$Q_{рез.в.2} = Q_{эф.в.2} - Q_{эф.во.2} \cdot \Phi_{во-в}, \quad (2.38)$$

$$Q_{рез.во.2} = -Q_{рез.зс.2} - Q_{рез.в.2}, \quad (2.39)$$

Рівняння ефективних потоків теплового випромінювання для зовнішньої стіни, вікна та внутрішніх огорожень [148, 149]

$$Q_{эф.зс.1} = Q_{рез.зс.1} \left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + \frac{Q_{е.зс.1}}{A_1}, \quad (2.40)$$

$$Q_{эф.в.1} = Q_{рез.в.1} \left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + \frac{Q_{е.в.1}}{A_1}, \quad (2.41)$$

$$Q_{эф.во.1} = Q_{рез.во.1} \left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + \frac{Q_{е.во.1}}{A_1}, \quad (2.42)$$

Рівняння ефективних потоків сонячної радіації для зовнішньої стіни, вікна та внутрішніх огорожень [148, 149]

$$Q_{эф.зс.2} = Q_{рез.зс.2} \left(1 - \frac{1}{A_2}\right), \quad (2.42)$$

$$Q_{эф.в.2} = Q_{рез.в.2} \left(1 - \frac{1}{A_2}\right) + \frac{I_{ins} F_в}{A_2}, \quad (2.43)$$

$$Q_{\text{эф.во.2}} = Q_{\text{рез.во.2}} \left(1 - \frac{1}{A_2}\right), \quad (2.44)$$

Рівняння власних потоків теплового випромінювання для зовнішньої стіни, вікна та внутрішніх огорожень [148, 149]

$$Q_{\text{е.в.1}} = F_{\text{в}} \sigma A_1 T_{\text{в}}^4, \quad (2.45)$$

$$Q_{\text{е.зс.1}} = F_{\text{зс}} \sigma A_1 T_{\text{зс}}^4, \quad (2.46)$$

$$Q_{\text{е.во.1}} = F_{\text{во}} \sigma A_1 T_{\text{вн}}^4, \quad (2.47)$$

де $Q_{\text{з}}$ – тепловтрати через зовнішні огорожувальні конструкції, Вт;

$Q_{\text{о}}$ – теплонадходження від опалювальних приладів, Вт;

$Q_{\text{тн}}$ – додаткові теплонадходження, Вт;

$Q_{\text{рад}}$ – теплонадходження від сонячної радіації, Вт;

n – кратність повітрообміну;

V – об'єм приміщення, м³;

c, ρ – теплоємність та густина повітря, Дж/(кг К), кг/м³;

$t_{\text{вн}}, t_{\text{з}}$ – внутрішня та зовнішня температура повітря, °С;

$I_{\text{інс}}$ – інсоляційні теплонадходження, Вт/м²;

$F_{\text{в}}, F_{\text{зс}}, F_{\text{во}}$ – площа вікна, зовнішньої стіни та внутрішніх огорожень, м²

$Q'_{\text{з}}, Q''_{\text{з}}$ – тепловтрати через зовнішню стіну та вікно, відповідно, Вт;

$t_{\text{зс}}, t_{\text{в}}$ – температура на поверхні зовнішньої стіни та вікна з внутрішньої сторони, °С;

$R_{\text{зс}}, R_{\text{в}}$ – термічний опір зовнішньої стіни та вікна, м²°С/Вт;

$R_{\text{ов}}, R_{\text{оз}}$ – термічний опір тепловіддачі пристінного прошарку, м²К/Вт;

$Q_{\text{рез.в.1}}, Q_{\text{рез.зс.1}}, Q_{\text{рез.во.1}}$ – результуючий потік теплового випромінювання відповідно, вікна, зовнішньої стіни, внутрішніх огорожень, Вт;

$Q_{\text{рез.в.2}}, Q_{\text{рез.зс.2}}, Q_{\text{рез.во.2}}$ – результуючий потік сонячної радіації від вікна, зовнішньої стіни та внутрішніх огорожень, відповідно, Вт;

$Q_{\text{эф.в.1}}, Q_{\text{эф.зс.1}}, Q_{\text{эф.во.1}}$ – ефективний потік теплового випромінювання від вікна, зовнішньої стіни та внутрішніх огорожень, відповідно, Вт;

$Q_{\text{эф.в.2}}, Q_{\text{эф.зс.2}}, Q_{\text{эф.во.2}}$ – ефективний потік сонячної радіації вікна, зовнішньої стіни та внутрішніх огорожень, відповідно, Вт;

$Q_{e.v.1}, Q_{e.zc.1}, Q_{e.vo.1}$ – власний потік теплового випромінювання від вікна, зовнішньої стіни та внутрішніх огорожень, відповідно, Вт;

A_1, A_2 – коефіцієнт поглинання для стіни та вікна відповідно, теплового випромінювання та сонячної радіації;

D_2 – коефіцієнт пропускання вікон в видимій області спектру;

σ – постійна Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$;

$\varphi_{\text{во-3с}}, \varphi_{\text{во-в}}$ – кутові коефіцієнт поглинання теплової енергії від внутрішніх огорожень на зовнішню стіну та вікно, відповідно.

На базі цих рівнянь побудована модель кімнати в програмному середовищі Mathcad, яка дозволяє аналізувати теплові потоки сонячного та теплового випромінювання, температуру на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій та внутрішнього повітря в кімнаті та їх вплив на рівень опалення, тобто в загальному енергобалансі кімнати оцінити сукупний вплив власного теплового випромінювання огорожень та сонячної радіації.

Погодинна модель 5R1C [23] набула розвитку за рахунок врахування сукупного впливу власного теплового випромінювання огорожень та сонячної радіації. На рис. 2.3 наведено схему реалізації сіткової моделі 8R2C.

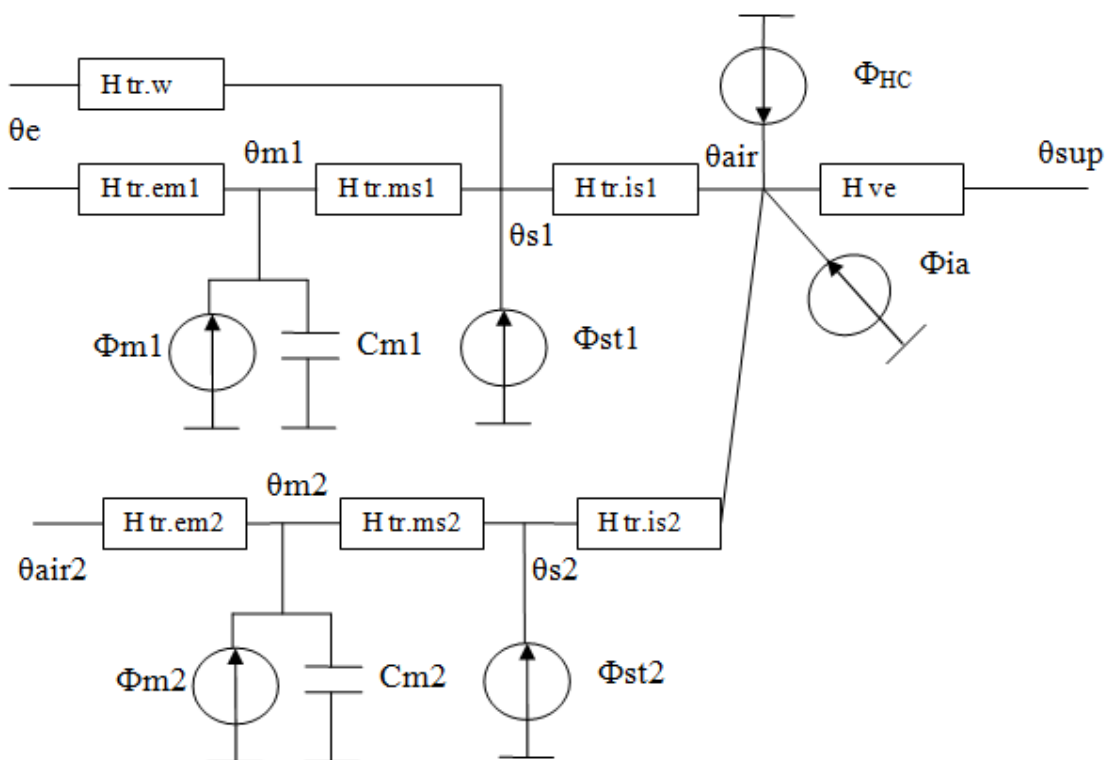


Рис. 2.3 – Модель вісім опорів, дві ємності (8R2C)

Дана модель дозволяє розділити внутрішні та зовнішні огороження, а саме визначати температури поверхонь, інерційність та врахувати власне теплове випромінювання внутрішніх поверхонь огорожень. В основі моделі 8R2C при визначенні термічних опорів і теплових потоків лежать рівняння аналогічні 2.22-2.26. Модель реалізована в програмному середовищі Mathcad передана СумДУ для аналізу регулювання рівня опалення.

2.2.2 Математичні моделі на базі програмного продукту EnergyPlus

Програмний продукт EnergyPlus (далі E+) [71] є однією з найбільш повних загальнодоступних динамічних програм для моделювання енергетичних характеристик будівлі. Дана програма використовує кращі підходи двох відомих програм DOE-2 та BLAST, методики розрахунків в яких наближені до європейських стандартів [71]. На відміну від вище розглянутого методу даний метод враховує окремо теплоємність зовнішніх та внутрішніх огорожень. При моделюванні теплових потоків через світлопрозорі елементи конструкцій E+ використовує підпрограму розрахунку Window [150], для розрахунку підлоги на ґрунті використовується підпрограма Slab Pre-Processor через Openstudio [151], що дозволяє деталізувати розрахунок.

Програмний продукт E+ використовує кліматичні дані з міжнародного кліматичного файлу IWEC для типового року певного міста [82]. Для території України у вільному доступі знаходяться кліматичні IWEC файли типового року для міст Києва і Одеси, що є усередненою характеристикою кожної з двох температурних зон. В IWEC 2 створено погодні файли для 41-го міста України, але вони є платним ресурсом, що обмежує їх використання. Використання IWEC в інших підходах та динамічних моделях, крім програмного продукту EnergyPlus, має складнощі, пов'язані з форматом представлення інформації. Для перерахунку сонячної активності потрібно використати положення сонця відносно горизонту

протягом року та його зміни протягом доби. EnergyPlus використовує кілька методик розрахунку сонячних теплонадходжень на вертикальні поверхні.

Динамічна модель створена на базі програмного продукту EnergyPlus використана для порівняння результатів розрахунку енергопотреб на опалення та охолодження з динамічною та квазістаціонарною моделями за EN 13790 для репрезентативних приміщень ВНЗ міст Києва та Одеси, а також при аналізі застосування різних баз кліматології та дослідженні режимів переривчастого опалення. Вхідні параметри включають геометричні, теплофізичні, експлуатаційні характеристики. Геометрія репрезентативних приміщень створювалась в графічному редакторі GoogleSketchup, що синхронізується через OpenStudio. Крок дискретизації розрахунку можна обрати від 10 хв. до 1 год. Кліматичні дані для ряду міст у вільному доступі можна скачати на сайті EnergyPlus, які представлені в розширенні "EPW". В IWEC файл погоди наведенні погодинні значення. Динамічна модель дозволяє отримувати погодинний локальний розподіл температури в зоні кімнати, рівень опалення та режими роботи, інерційні особливості огорожень. Параметри та інтервали представлення розрахунків (рік, сезон, місяць, доба, година), які будуть виводиться в текстовому файлі, обираються/запрошуються самостійно.

Висновки. Розглянуті моделі на базі стаціонарних і квазістаціонарних підходів були використанні для оцінки інвестиційних проектів шкіл та ДНЗ та при побудові шкал енергоефективності та визначення класу енергоефективності до та після термомодернізації. Застосування динамічної моделі 5R1C та моделі на базі EnergyPlus порівнювались між собою для університетів розташованих у містах Київ та Одеса для умов постійного та переривчастого опалення та охолодження. Для СумДУ розроблена математична модель на базі стандарту EN 13790, яка використана для прогнозу рівня опалення та порівняна з сітковою моделлю реалізованою на базі програмного продукту MicroCab [152] з аналогією моделювання енергетичних характеристик кімнати як електричного кола.

2.3 Методи адаптації даних кліматичних баз використання в математичних моделях

При розрахунку енергетичних характеристик будівель поширеними в Україні стаціонарними й квазістаціонарними методами використовуються кліматичні характеристики для відповідного регіону/обласного центру, а саме – середньомісячні показники зовнішньої температури, сонячні теплонадходження на горизонтальну та вертикальні поверхні [94, 153] для квазістаціонарного методу [94] та середні за опалювальний період - для методу градусо-діб [35]. Вплив швидкості та напрямку вітру в моделях даного кроку дискретизації розрахунків враховується укрупнено через нормативне значення кратності повітрообміну.

В нормативних кліматологічних даних, що діють в Україні, наведено середньомісячні значення зовнішньої температури повітря та сонячних теплонадходжень на вертикальні та горизонтальну поверхні, що є достатнім при стаціонарному та квазістаціонарному методі розрахунку [153]. Нормативні кліматичні дані були отриманні шляхом усереднення кліматичних даних 50-ти річної послідовності.

В умовах ефективного використання енергоносіїв (регулювання опалення) потреба в опаленні повинна розраховуватися з урахуванням погодинної зміни кліматичних характеристик, що не можливо реалізувати в стаціонарних моделях. В Україні все ширшого застосування набувають динамічні моделі визначення енергетичних характеристик будівель, які потребують використання погодинних кліматичних даних. Нормативної погодинної кліматології в Україні не існує. Фактичні кліматичні дані можна отримати з метеосайтів, але даних про сонячні теплонадходження в них не наводиться. Фактичні кліматичні дані необхідно накопичувати за декілька років, щоб використовувати при розрахунку базового рівня енергоспоживання та аналізу для умов проектування.

В рамках дослідницького проекту 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 18-річної послідовності погодних даних. Погодинні значення з файлу IWEC [82] включають в себе температуру сухого термометра, відносну вологість, швидкість та напрям вітру, барометричний тиск, повну, пряму (виражена через direct normal) та розсіяну (diffuse horizontal) сонячну радіацію на горизонтальну поверхню тощо. Для території України створено кліматичні IWEC файли типового року для міст Києва і Одеси у вільному доступі (доступний веб-сайтом DOE та EnergyPlus для моделювання енергії). В IWEC 2 створено погодні файли для 41-го міста України, але вони є платним ресурсом, що обмежує їх використання (продаються компанією ASHRAE) [154].

Існують програмні продукти, які дозволяють аналізувати динамічні характеристики будівлі і використовують вже створені деталізовані файли кліматології. Наприклад, програмний продукт EnergyPlus використовує кліматичний файл IWEC [82]. Програмний продукт EnergyPlus використовує погодний файл IWEC розширення "EPW". Використання IWEC в інших підходах, крім програмного продукту EnergyPlus, має складнощі, пов'язані з форматом представлення інформації. Для перерахунку сонячної активності потрібно використати положення сонця відносно горизонту протягом року та його зміни протягом доби. EnergyPlus використовує кілька методик розрахунку сонячних теплонадходжень на вертикальні поверхні [155].

Наприклад, в Інтернет ресурсі [156], створеному в рамках проекту NASA "Atmospheric science data center", можна задати географічними координатами потрібний регіон та отримати типові середньомісячні значення прямої, розсіяної, повної сонячної радіації на горизонтальну поверхню, кількість безхмарних днів у місяці, значення азимуту і таке інше. Дані приведені на даному сайті, є усередненими характеристиками за останні 22 роки.

Крім погодинних кліматичних даних файлів IWEC на платному Інтернет ресурсі Meteonorm [157] можна отримати деталізовані погодинні значення сонячної активності для типового року або фактичні дані вибраного року. Обмежений доступ до даних є головною перешкодою їх використання.

В залежності від задач, що вирішуються, можуть використовуватися відповідні інтервали усереднення кліматичних даних. Територія України умовно розділяється на дві температурні зони. Кліматичні погодинні значення типового року IWEC розглянуті для Києва (I кліматична зона) та Одеси (II кліматична зона) [153]. Основна частина України відноситься до першої температурної зони.

Застосування різних методик розрахунку вносить розбіжність результатів розрахунку, а відмінності у використанні кліматичних даних того чи іншого підходу ускладнюють порівняння підходів визначення енергопотреби будівель. Для співставлення нормативних середньомісячних кліматичних даних [153, 94] та погодинних даних типового року міжнародного погодного файлу IWEC [82] потрібно використовувати методики для перерахунку та усереднення часових рядів параметрів.

На відміну від зовнішньої температури та рівня опалення, фактори, що відображають вплив сонячних теплонадходжень та повітрообміну можна представити у вигляді кінцевих факторів впливу в зоні кімнати, а саме щогодинні або щодобові значення сонячних теплонадходжень та кратність повітрообміну, які залежать від ряду кліматичних показників та орієнтації зовнішніх поверхонь. При розрахунку енергопотреби за діючими в Україні методиками серед кліматичних показників ураховується зовнішня температура повітря та сонячні теплонадходження на вертикальні та горизонтальні поверхні, а також кратність повітрообміну, що залежить від швидкості, напрямку, етажності і т.д. для природної вентиляції [94, 35].

В спрощений погодинний динамічний метод розрахунку на базі європейського стандарту EN 13790 [23], який враховує у своїх розрахунках погодинні сумарні сонячні теплонадходження в зону кімнати, дані можуть обиратися з IWEC. Програмні продукти, які використовують кліматичні дані типового року IWEC (наприклад, EnergyPlus) містять вбудовані методики перерахунку деталізованих до спрощених.

В роботі розглянута та використана методика перерахунку сонячних теплонадходжень в зону кімнати в залежності від орієнтації за підходами,

запропонованими в працях Даффі [158, 159] та визначення кратності повітрообміну під дією різниці тисків і температур зовні і всередині приміщень [160-162] наведеною нижче. Для типових для Києва умов центрального тепlopостачання з якісним погодним регулюванням прийнято, що характер зміни рівня опалення веде себе аналогічно як і зовнішня температура або змінюється відповідно до завдань переривчастого опалення.

Перерахунок сонячних теплонадходжень

Схилення Сонця в певний день визначається за формулою:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right), \quad (2.48)$$

де n - порядковий номер дня, відрахований від 1 січня.

Кількість теплоти, яка надходить на вертикальні поверхні огороження, залежить від розташування в певній місцевості на широті φ (для Києва $50^{\circ}27'$, для Одеси $46^{\circ}28'$).

Величина питомої теплової енергії q_i , Вт·год/м², що надходить на 1 м² південної поверхні за i -ту годину, визначається за формулою:

$$q_i = H_B \frac{\cos(\varphi - s) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - s) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} + H_D = H_B \cdot R_B + H_D, \quad (2.49)$$

де H_B і H_D , Вт/м² – питомі теплові потоки прямого та розсіяного сонячного випромінювання, що падає на горизонтальну поверхню, на широті населеного пункту при безхмарному небі;

R_B – коефіцієнт перерахунку прямої сонячної радіації на похилу поверхню з південною орієнтацією;

s – кут нахилу поверхні до горизонту ($s=90^{\circ}$).

При розрахунках за формулою (2.49) треба враховувати лише значення, які задовольняють умовам:

$$\omega < 90^0; \quad \omega < \omega_{C(3)} = \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi - s) \cdot \operatorname{tg} \delta); \quad R_B > 0, \quad (2.50)$$

де $\omega_{C(3)}$ - годинний кут сходу (заходу) сонця на похилу поверхню.

У розрахунках прийнято, що на північну поверхню потрапляє лише розсіяна сонячна радіація. В даній методиці розрахунку хмарність врахована шляхом зменшення значення прямої сонячної радіації. В IWEC файлі показник хмарності наведений.

Тепловий потік, що надходить в зону кімнати визначається:

$$Q_{sol} = q_i F_e k_{np} k_{zm}, \quad (2.51)$$

де Q_{sol} - тепловий потік від сонця в зону кімнати, Вт;

q_i - питомий тепловий потік, що надходить на вертикальну поверхню відповідної орієнтації, Вт/м²;

F_e - площа світлопрозорих елементів конструкцій, м²;

k_{np} - коефіцієнт пропускання сонячної радіації;

k_{zm} - коефіцієнт, що враховує наявність затіняючих елементів.

Визначення кратності повітрообміну під дією різниці тисків і температур зовні і всередині приміщень

Зазвичай, у математичні моделі для визначення енергопотреби будівель вентиляційна складова (повітрообмін) задається через значення кратності повітрообміну. Повітрообмін важко визначити експериментально. Навіть при однакових конструкціях вікон, з точки зору повітропроникності, природнім чином в приміщення потрапляє різна кількість повітря. Повітрообмін в приміщенні залежить від ряду факторів як зовнішніх так і внутрішніх. Авторами статей [160-162] розглянутий поширений підхід заснований на визначенні різниці тисків. Різниця тисків в будівлі створюється трьома різними механізмами: ефект стека (stack effect), тиску вітру, примусовий тиск вентилятора механічної вентиляції. Загальний тиск визначається за формулою (2.52) та представлено схему профілів зміни даних тисків по висоті на рис. 2.4.

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_s + \Delta P_w + \Delta P_v = \Delta P_{inf} + \Delta P_v, \quad (2.52)$$

ΔP_{tot} - загальна різниця тисків, Па;

ΔP_s - різниця тисків від ефекту стека, Па;

ΔP_w - різниця тиску від вітру, Па;

ΔP_v - різниця тисків від примусової вентиляції, Па;

ΔP_{inf} - інфільтраційна різниця тисків, Па.

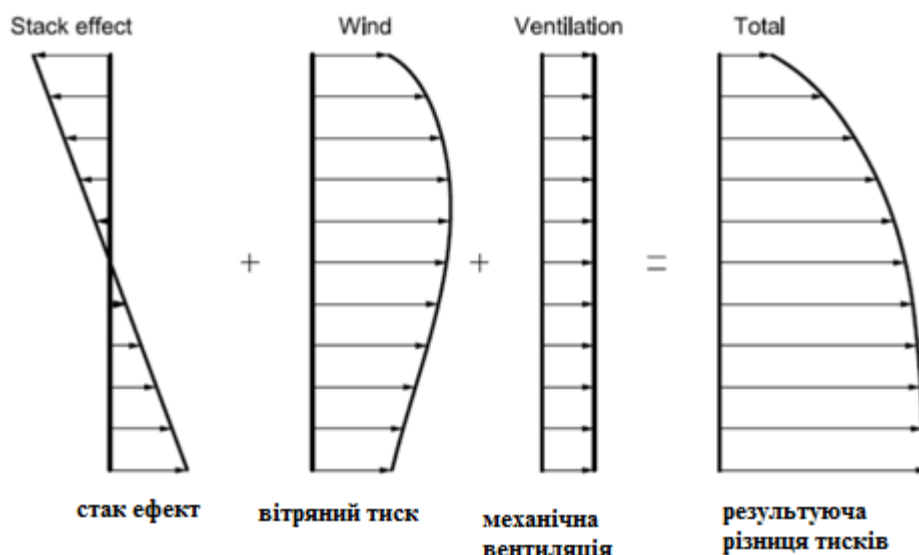


Рис. 2.4 – Приклад підсумування профілів різниці тиску [160]

Ефект стека також називають ефект плавучості, що створюється різницею густин між теплим і холодним повітрям. Зниження тиску повітря з висотою, що визначається за формулою (2.53):

$$\Delta P_s = P_e(z) - P_i(z) = z(\rho_e - \rho_i)g, \quad (2.53)$$

z - висота від опорної точки, м;

ρ_e, ρ_i - густина повітря зовнішнього та внутрішнього повітря, кг/м^3 .

На рис. 2.5 наведено висота $z=0$, що характеризує нейтральним тиском (P_{NPL}) при якому внутрішній та зовнішній тиски однакові, зазвичай, цей рівень знаходиться на середньому поверсі будівлі ($H/2$).

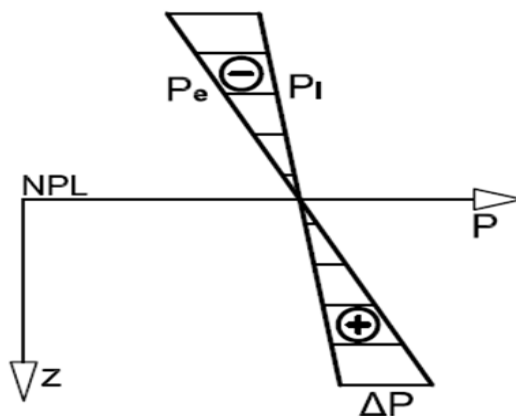


Рис. 2.5 – Величина різниці тисків від рівня нейтрального тиску [160]

Від рівня нейтральних тисків в сторону першого поверху різниця тисків додатня, в сторону останнього поверху - від'ємна. Приймаючи припущення, що повітря це ідеальний газ формула (2.54) набуває вигляду:

$$\Delta P_s = 3456 \cdot z \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right), \quad (2.54)$$

T_e, T_i - температура зовнішнього та внутрішнього повітря, відповідно, К.

Вітряний тиск створюється, коли потік повітря потрапляє на перешкоду. Величина вітряного тиску залежить від швидкості вітру та форми перешкоди (навітряна, підвітряна сторона і т.д.).

У більшості програмних продуктів для моделювання тиску вітру використовується наступна рівність (2.55) [160, 162]:

$$\Delta P_w = \frac{\rho U_{met}^2}{2} C_h C_p(\theta) \quad (2.55)$$

ΔP_w - вітряний перепад тиску, Па;

ρ - густина навколишнього середовища, кг/м³;

U_{met} - швидкість вітру з найближчої метеостанції, м/с;

C_h - коефіцієнт тиску вітру, що враховує поверховість.

$$C_h = \frac{U_H^2}{U_{met}^2} = A_0^2 \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^{2a} \quad (2.56)$$

U_H - швидкість вітру в найвищій точці об'єкту, м/с;

A_0 - коефіцієнт, що враховує укриття від вітру для певної місцевості. (the wind shelter coefficient); [160]

H - висота розглянутого поверху будівлі від рівня землі, м;

H_{ref} - висота на якій метеостанція міряє швидкість, м;

a - експоненціальний коефіцієнт, що враховує укриття від вітру для даної місцевості [160].

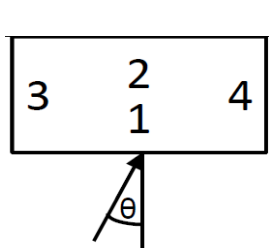
Сама особливість напрямку вітру враховано коефіцієнтом C_p . Коефіцієнт вітряного тиску для певного кута визначається за формулою (2.57).

$$C_p(\theta) = \frac{1}{2} \{ [C_p(0^\circ) + C_p(180^\circ)] \cdot (\cos^2(\theta))^{1/4} + [C_p(0^\circ) - C_p(180^\circ)] \cdot (\cos^2(\theta))^{3/4} + [C_p(90^\circ) + C_p(270^\circ)] \cdot (\sin^2(\theta))^2 + [C_p(90^\circ) - C_p(270^\circ)] \cdot (\sin^2(\theta)) \} \quad (2.57)$$

$C_p(\theta)$ - коефіцієнт тиску вітру,

θ - величина кута вітру відносно нормалі, °.

На рис. 2.6 зображено визначення величини кута відносно нормалі та обраховано значення вітряних коефіцієнтів для різних орієнтацій в залежності від напрямку вітру.



Розташування	Кут набігання вітру на поверхню відносно нормалі (θ)							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
поверхня 1	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06
поверхня 2	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	0.25	0.06	-0.35	-0.6
поверхня 3	-0.6	0.2	0.4	0.2	-0.6	-0.6	-0.3	-0.6
поверхня 4	-0.6	-0.6	-0.3	-0.6	-0.6	0.2	0.4	0.2

Рис. 2.6 – Визначення кута θ та розраховане значення коефіцієнту тиску вітру для всіх огорожень [160]

Отже, кількість повітря, що надходить в кімнату через нещільність за прийнятих умов відсутності механічної вентиляції визначається наступним співвідношенням:

$$G_{inf} = C(\Delta P_{inf})^P \quad \text{або} \quad G_{inf} = \frac{\Delta P_{inf}^P}{R_{нов.прон}} F_g \quad (2.58)$$

де G_{inf} - кількість повітря, що надходить у приміщення через нещільності, кг/год;

C, p - даний коефіцієнт та показник степеня залежить від призначення будівлі [160, 162];

$R_{пов.прон}$ - опір повітропроникності вікна, $(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па}^{2/3})/\text{кг}$ [163];

F_e - площа вікна, м^2 .

Кратність повітрообміну в приміщенні як характеристика вузла вентиляції у математичних моделях визначається за наступним співвідношенням [162]:

$$n = \frac{G_{inf}}{\rho V} \quad (2.59)$$

V - об'єм приміщення, м^3 ;

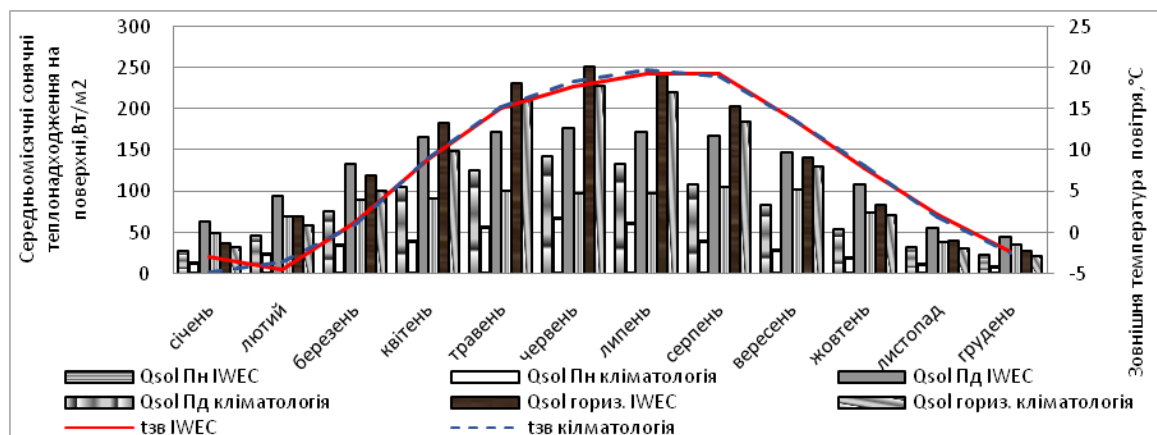
n - кратність повітрообміну, год^{-1} .

2.4 Порівняння даних кліматології IWEC і діючої в Україні кліматології

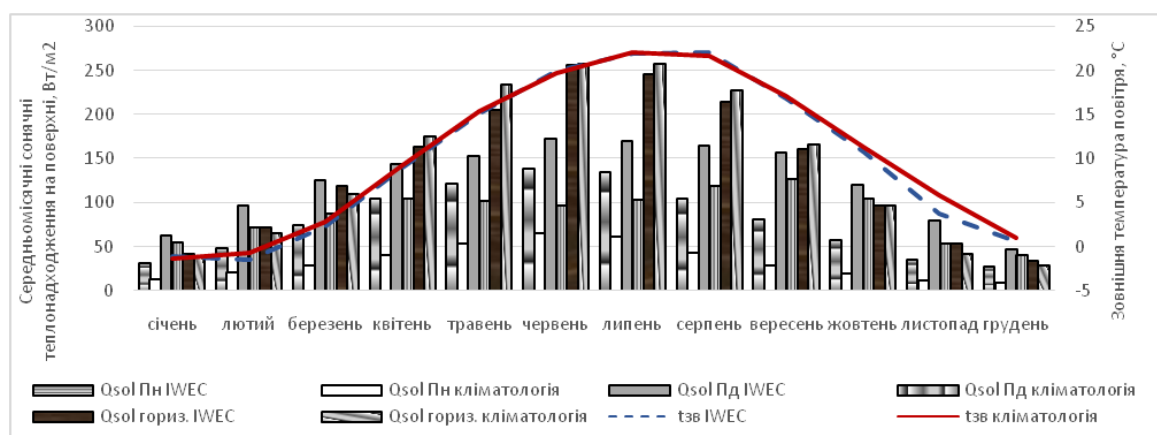
Як згадувалось у п 2.2, в залежності від математичних моделей, що використовуються для моделювання теплового комфорту будівель використовуються різні інтервали усереднення кліматичних даних. Для порівняння діючої в Україні кліматології та погодинного міжнародного кліматичного файлу IWEC, що є типовою характеристикою зміни погоди для розглянутого міста, використано наведенні вище методики перерахунку погодинних значень сумарних сонячних теплонадходжень на вертикальні поверхні. Для порівняння в роботі наведено крайні випадки сонячних теплонадходжень для Пд та Пн орієнтації. Для порівняння кліматологій встановлено середньомісячні значення зовнішньої температури і сонячних теплонадходжень (на рис. 2.7) для двох міст України (Київ та Одеса) [164].

Зовнішня температура повітря за двома кліматологічними базами майже не відрізняється. Сонячні теплонадходження суттєво відрізняються від прийнятих в

Україні величин. Відмінність становить близько 40% в зимовий період та 30% в літній для Києва. Для Одеси дана розбіжність становить до 50%. Сонячні теплонаходження на горизонтальну поверхню відрізняються на 5-10% [164].



а)



б)

Рис. 2.7 – Середньомісячні кліматичні дані з нормативних документів України (кліматологія) та Міжнародного погодного файлу (IWEC) для м. Києва (а) та м. Одеси (б) [164]

Для пояснення розбіжностей між значеннями сонячних теплонаходжень, отриманими на базі нормативних документів України (кліматологія) та Міжнародного погодного файлу (IWEC) з перерахунком на вертикальні поверхні за допомогою методики Даффі зроблено припущення про вплив на цю розбіжність неврахування в методі Даффі відбиття сонячної радіації від поверхні ґрунту. [158]

В класичній методиці перерахунку сонячних теплонадходжень на вертикальні поверхні різних орієнтацій наведених в працях Даффі [158] приймається, що вся дифузна складова сонячних теплонадходжень однаково надходить на всі поверхні та не враховується відбита сонячна радіація від поверхні ґрунту. Тому при використанні спрощеного погодинно методу 5R1C дана особливість перерахунку IWEC даних може вносити розбіжність отриманих результатів енергопотреби в опалені. [164]

На прикладі кліматичних даних для м. Києва для співставлення методик перерахунку сонячних теплонадходжень на вертикальні поверхні кліматичного файлу IWEC для опалювального періоду було використано програмний продукт E+. В створеній моделі на базі E+ використано деталізовану методику розрахунку сонячних теплонадходжень "Full interior and exterior with reflection" що враховує відбиття від поверхонь та ґрунту. Середньомісячні значення, отримані за класичною погодинною методикою розрахунку Даффі [158] та результати розрахунку в програмному продукті EnergyPlus досить близькі, середня відмінність становить 5%, максимальна розбіжність результатів у зимовий період склала 8%, у літній – до 15% (рис. 2.7). Перевірка проведена для м. Одеса дала аналогічний результат відмінності методик перерахунку. [164]

На рис. 2.8 наведено графік зміни середньомісячних значень для опалювального сезону зовнішньої температури та сонячної радіації на вертикальні поверхні, розрахована на основі значень IWEC [82] за методикою Даффі (умовне позначення: Пд IWEC, Пн IWEC) та з національної методики розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] (умовне позначення Пд кліматологія, Пн кліматологія), також наведено значення розраховані програмним продуктом E+ на базі даних IWEC (Пд E+, Пн E+). [164]

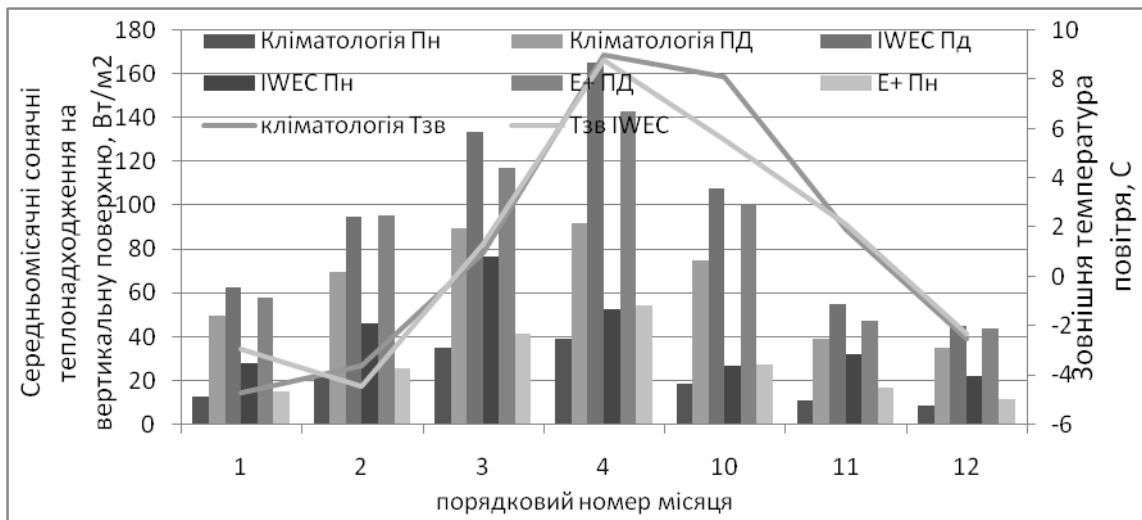
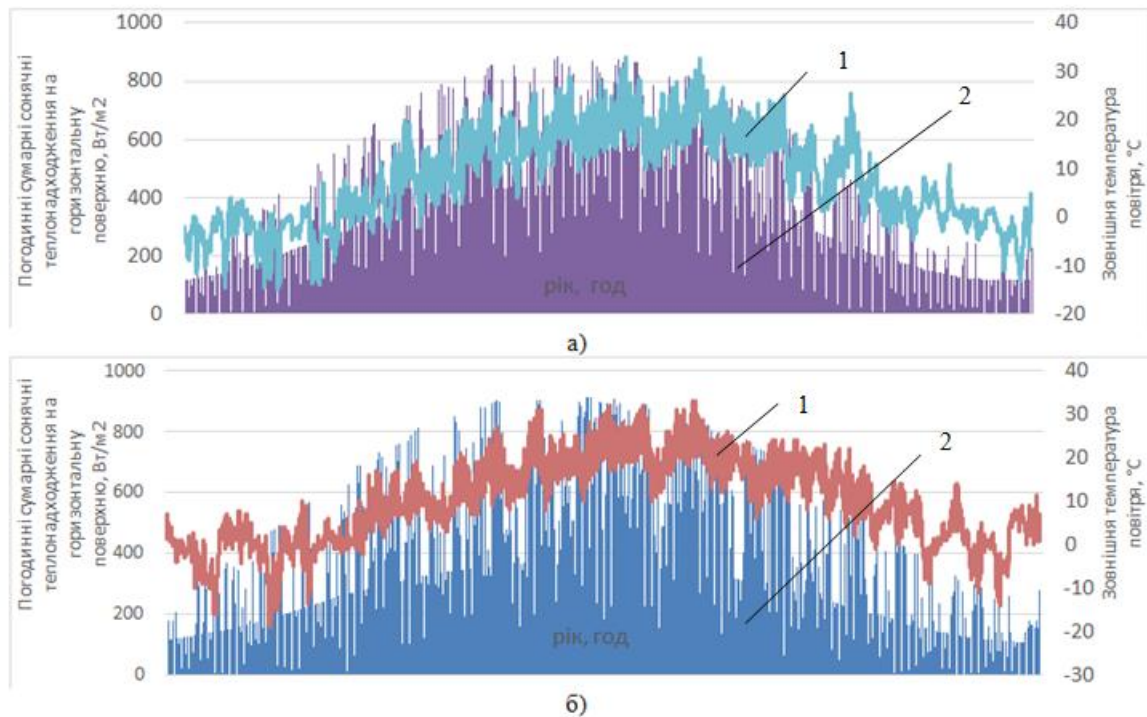


Рис. 2.8 – Середньомісячні значення зовнішньої температури та сонячні теплонадходження

Проблеми викликані не лише відмінністю вихідних кліматичних даних, але й неможливістю використання наведених кліматичних даних в Будівельній кліматології України [153] при динамічному погодинному розрахунку енергопотреби в опаленні. [164]

На рис. 2.9 наведено погодинну змінну сонячних теплонадходжень на горизонтальну поверхню та зовнішню температуру повітря для двох міст України за ІWЕС. Врахування зміни кліматичних факторів протягом доби дозволяє при відсутності місцевого регулювання уникнути перетопів у періоди максимальної сонячної активності в зимові періоди та забезпечити комфортну температуру в літній період. Влітку це робить автоматика кондиціонера [164].



1 – зовнішня температура повітря; 2 – сонячні теплонадходження на горизонтальну поверхню

Рис. 2.9 – Погодинна зміна сонячних теплонадходжень на горизонтальну поверхню (2) та зовнішньої температури повітря (1) для м. Києва (а) та м. Одеси (б) за кліматичним файлом IWEC [164]

2.5 Тестування та верифікація моделей

За ієрархічним рядом розглянутих моделей деякі з них є більш укрупненими, тому більш детальні моделі можуть слугувати як еталонні моделі для перевірки.

Виходячи з розглянутого ряду моделей та результатів досліджень закордонних авторів в статтях [68, 151, 155] еталонною моделлю для перевірки може слугувати модель побудована на основі програмного продукту EnergyPlus. Верифікацію спрощеного погодинно методу розрахунку стандарту EN 13790 [23] реалізовано на основі сіткової моделі 5R1C проведено з моделлю на основі програмного продукту EnergyPlus (рис. 2.10, умовне позначення EP).

Перевірка моделей проведена для опалювального періоду приміщення орієнтованого на Пд та розташованого в м. Києві. Погодинний розрахунок навантаження на систему опалення проведений для характеристик репрезентативних кімнати описаної в п. 2.1. для підтримання постійної температури в приміщенні 18°C. Результати моделювання наведено на рис.

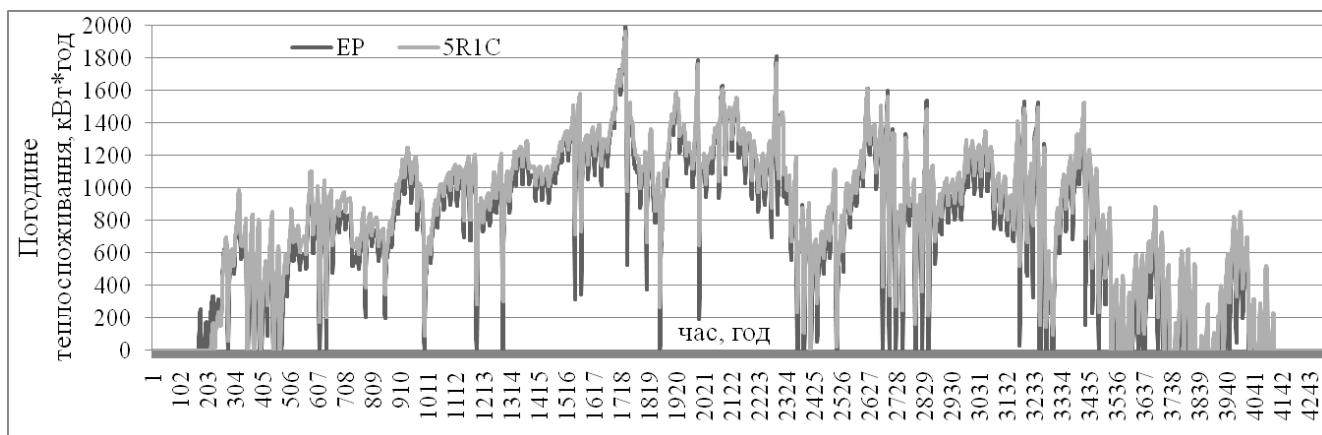


Рис. 2.10 – Навантаження на систему опалення для опалювального періоду приміщення розташованого в м. Києві за моделлю стандарту EN 13790(5R1C) та на основі програми EnergyPlus (EP)

Відмінність результатів розрахунку сітковими моделями становить менше 5%, а дещо вищі значення навантаження за моделлю 5R1C пояснюються спільним вузлом інерційності внутрішніх та зовнішніх огорожень, дана особливість моделі може давати більшу розбіжність результатів в літній період. В розглянутих моделях виконано погодинний розрахунок. Для опалювального періоду об'єкту розташованого в м. Києві розбіжність результатів двох моделей оцінка на основі скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,968$.

З точки зору регулювання або підтримання комфортної температури, дослідники близького зарубіжжя [20], проводять розрахунки орієнтуючись на внутрішню температуру в приміщенні. Для верифікації математичної моделі 5R1C проведено аналіз температурного стану приміщення з роботами авторів [20, 166], розташований в середній частині проміжного поверху житлової будівлі в м. Навої [20, 165]. Дослідження проводилося протягом однієї літньої доби. Об'єм приміщення 46,6 м³. Зовнішня стіна виконано з керамзитобетону ($\rho=1200$ кг/м³,

$\delta=0,3$ м); внутрішня - із бетону ($\rho=1200$ кг/м³, $\delta=0,14$ м); перекриття - залізобетонна плита ($\rho=2500$ кг/м³, $\delta=0,25$ м). Вікно площею 3,45 м² має одинарне застелення ($k_0=5,59$ Вт/(м²·К)) і обладнане зовнішнім сонцезахисним пристроєм з коефіцієнтом пропускання сонячної радіації 0,3. Повітрообмін приміщення з зовнішнім повітрям прийнятий однаковим протягом доби, кратність повітрообміну 15. Температура зовнішнього повітря та інтенсивність сонячної радіації нанесена на рис. 2.11 Розрахунковий крок по часу 2 год. Отримані результати авторів [20, 165] з достатньою точністю співпадають, а розбіжність в 1,2°C вважається не значною, відповідно до стверджень в роботі [165].

За відсутності впливу передісторії зміни внутрішньої температури повітря початкова точка початку моделювання має суттєвий вплив. Для нівелювання впливу стартової точки моделювання, доба, що аналізується змодельована 6 днів поспіль. Результат моделювання досить добре сходиться з двовимірною моделлю запропонованою в працях Табунщикова Ю.А. [20] та дещо більшу відмінність мають результати отримані в працях Тадлі [165]. Розбіжність результатів розрахунку за моделлю 5R1C менша 1°C (до 5%) з моделлю Табурщикова Ю.А. [165]. Модель Табурщикова Ю.А. обрана як перевірна, скоригований коефіцієнт детермінації R^2 для моделі Тадлі [165] становить 0,993, для 5R1C [23]- 0,992.

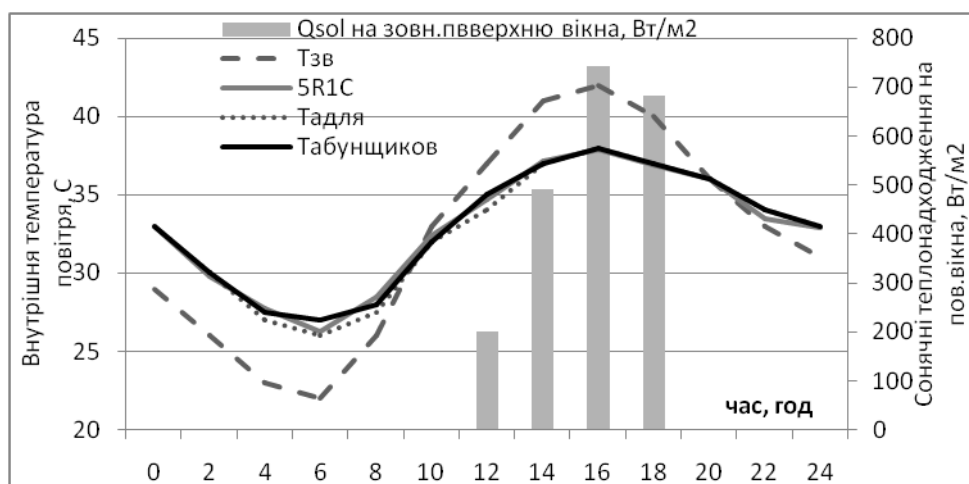


Рис.2.11 – Добова зміна температури внутрішнього повітря для літнього періоду при змін зовнішніх погодних умов

Висновки до розділу

1. Об'єктом дослідження обрано громадські будівлі різного призначення, умов експлуатації, розташування та складності. В роботі врахована особливості аналізу об'єктів дослідження обраних групи будівель та приміщень відповідно до задач, що вирішуються. Для оцінки енергозберігаючих заходів в рамках інвестиційних проектів достатнім є використовувати стаціонарні і квазістаціонарні моделі розрахунку. Для детального аналізу енергетичних характеристик будівель, що можуть бути використані як енергоефективний захід для якісного регулювання рівняння опалення в будівлі за умов пониження опалення в неробочі години, а також для задач короткострокового прогнозування потрібно використовувати деталізований погодинний розрахунок в динамічних моделях.

2. Розглянуто різні математичні моделі та їх модифікації для більш точного аналізу теплового комфорту будівель, а саме: за укрупненими нормами, метод градусо-діб, квазістаціонарний та спрощений погодинний метод за EN 13790, авторські моделі (модель на основі програмного продукту EnergyPlus та сіткова модель 8R2C).

3. В нормативних кліматологічних даних, що діють в Україні, наведено середньомісячні значення зовнішньої температури повітря та сонячних теплонадходжень на вертикальні та горизонтальну поверхні, що є достатнім при стаціонарному та квазістаціонарному методі розрахунку. При розрахунку енергетичної потреби будівель на опалення та/або охолодження динамічними методами потрібні погодинні кліматичні значення. При динамічному моделюванні на основі програмних продуктів, у більшості випадків використовуються деталізовані кліматичні дані з міжнародних баз даних відповідного формату (наприклад IWEC), що обмежує можливості використання діючої в Україні кліматології. У роботі проведено аналіз та співставлення нормативних кліматичних даних, що діють в Україні та міжнародного погодного файлу IWEC, що використовується в динамічних моделях розрахунку для

визначення потреби на опалення. Аналіз кліматичних файлів IWEC проведено для двох міст України: Київ (I кліматична зона) та Одеса (II кліматична зона), що слугують усередненою характеристикою кожної з двох температурних зон. Міжнародні кліматичні файли погоди для розглянутих міст України майже не відрізняються за середньомісячними значеннями зовнішньої температури від нормативної кліматології України. Сонячні теплонадходження, які наведені в файлі IWEC, не можуть одразу бути використані для порівняння кліматичних баз даних або розрахунку енергопотреб будівель, тому в роботі наведена методика перерахунку сонячних теплонадходжень. Сонячні теплонадходження на вертикальні та горизонтальні поверхні за даними файлу IWEC суттєво відрізняються від діючої в Україні кліматології. Середньомісячна відмінність сонячної активності на вертикальні поверхні становить близько 40%, на горизонтальні – до 10%.

В математичні моделі вентиляційна складова задається через повітрообмін, який в свою чергу залежить від ряду внутрішніх та зовнішніх факторів, які можуть бути представлені як комплексна характеристика впливу через кратність повітрообміну. В роботі наведена методика перерахунку зовнішніх кліматичних даних на кратність повітрообміну, що залежить від великого числа даних, таких як швидкість та напрям вітру, етажність, орієнтація кімнати (навітряна чи підвітряна сторона), цільність вікон тощо.

4. Перевірка адекватності моделей, що розглядаються в роботі проведена для визначення енергопотреб будівлі для холодного періоду року та для визначення внутрішньої температури повітря в приміщенні для теплого періоду року. Розбіжність розглянутих моделей з перевірочними становить менше 5%, що є адекватною оцінкою та прийнятною розбіжністю для їх застосування.

РОЗДІЛ 3 ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДО АНАЛІЗУ ЗОВНІШНІХ ТА ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СТАН БУДІВЛІ ДЛЯ РІЗНИХ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ

В даному розділі проведено порівняння методик визначення енергопотреби будівлі для різних температурних зон. Визначено особливості використання розглянутих методик та застосування різних часових інтервалів усереднення вихідних параметрів як впливовий параметр на результати дослідження.

Проведено аналіз часової зміни кліматичних даних та інших параметрів, виконано ряд імітаційних моделювань в обраному діапазоні зміни впливових параметрів. На основі імітаційного моделювання побудовані багатofакторні рівняння регресії для прогнозування внутрішньої температури повітря та/або рівня опалення.

Досліджено особливості врахування сумісного впливу сонячної радіації та власного теплового випромінювання огорожень впливу на внутрішню температуру повітря та на рівень опалення. Розвинено динамічну модель 5R1C (описану в розділі 2) в 8R2C, що дозволяє враховувати сумісний вплив сонячної радіації та власного теплового випромінювання огорожень.

3.1 Порівняння математичних моделей для визначення енергопотреби будівель

Порівняння математичних моделей для визначення енергопотреби будівлі проведено для двох міст з двох температурних зон України: м. Київ - I температурна зона, м. Одеса - II температурна зона.

За діючою кліматологією в Україні [153] енергопотреба для опалення розраховується у всіх містах, енерготреба для охолодження для цілей сертифікації розраховується лише для міст південних регіонів за умови, за зовнішня температура повітря вища 21°C. За національною методикою розрахунку ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] енергопотреба для охолодження розраховується за

умови, що температура повітря в приміщенні вище 25°C , що збігається з європейськими нормами мікроклімату, в даному стандарті [94] є уточнення внутрішньої температури повітря в залежності від призначення приміщень, для адміністративних будівель дана температура 24°C .

В аналізі об'єктом дослідження обрано репрезентативні приміщення ВНЗ, в м. Київ - КПІ ім. Ігоря Сікорського навчальний корпус № 22, в м. Одесі будівля з аналогічними експлуатаційними та теплофізичними характеристиками.

Геометричні та теплофізичні властивості об'єкту наведені в розділі 2.1 Вентиляція – природна. Кратність повітрообміну 1 год^{-1} . Проектна внутрішня температура повітря 18°C . Система опалення – повітряна. Коефіцієнт пропускання сонячних теплонадходжень світлопрозорих конструкцій в зону кімнати становить 0,56. Даний коефіцієнт розраховувався в програмному середовищі E+ відповідно до типу скління та оптичних характеристик. Опалення працює цілодобово та сім днів на тиждень протягом опалювального періоду. Кондиціонування здійснюється з 8:00 до 18:00. В зв'язку з відсутністю нормативного періоду використання кондиціонування в роботі проведено розрахунок для трьох літніх місяців. Репрезентативна кімната розглянута для орієнтацій на південь (Пд) та північ (Пн).

Енергопотреба на опалення кімнати розраховувалась за даними IWEC [82] та кліматичними даними, що діють в Україні та включала трансмісійні втрати, проектні витрати на вентиляцію та сонячних теплонадходження в зону кімнати (у всіх методиках визначення енергопотреб перерахунок сонячних теплонадходжень в зону кімнати визначався за однаковою методикою запропонованою в E+ "Full interior and exterior with reflection"). Розглянуто два крайні випадки визначення енергопотреб в опаленні для Пд та Пн орієнтації, тому що різниця кліматичних значень сонячної активності для Пд і Пн сторін значно змінюють значення енергопотреб на опалення, які отримані з енергетичних балансів приміщення з відповідною орієнтацією зовнішніх стін та світлопрозорих елементів конструкції.

Моделі розрахунку за укрупненими показниками (КТМ-204) [90], деталізований річний розрахунок за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 (метод ГД) [35] та помісячний метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] енергопотреби реалізовані в середовищі Microsoft Excel, модель на основі стандарту EN 13790 та EN 13786 [23, 138] реалізована на базі Mathcad. E+ – це програмний продукт для розрахунку енергетичних характеристик будівлі без власного графічного редактору. E+ використовує графічний редактор GoogleSketchup або DesignBuilder, що синхронізується через OpenStudio. Наведенні моделі та методики розрахунку засновані на різних часових інтервалах розрахунку, що приводить до розбіжності отриманих результатів та різних сфер/спектрів застосування і вимагає додаткових досліджень.

Порівняння застосування математичних моделей для визначення енергопотреб будівлі, розташованої в місті Києві

В роботі проведено розрахунок річної питомої потреби на опалення (КТМ-204, "метод ГД" за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007), в помісячному розрізі (національний метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015), в погодинному інтервалі (E+ та 5R1C). Питома характеристика розрахункового значення енергопотреб в тепловій енергії розглянутими методами представлено на рис. 3.1. Розглянуті методики розрахунку враховують сонячні теплонадходження в зону будівлі в залежності від орієнтації, окрім КТМ-204 в якому в опалювальній характеристиці вже враховане середнє значення сонячних теплонадходжень протягом опалювального періоду.

На рис. 3.1 проведено не лише порівняння різних методів розрахунку питомої потреби на опалення за однакових вхідних кліматичних параметрів (дані IWEC за методом перерахунку, наведеним E+), але й наведено їх відмінність при використанні нормативних кліматичних даних, що прийняті в Україні.

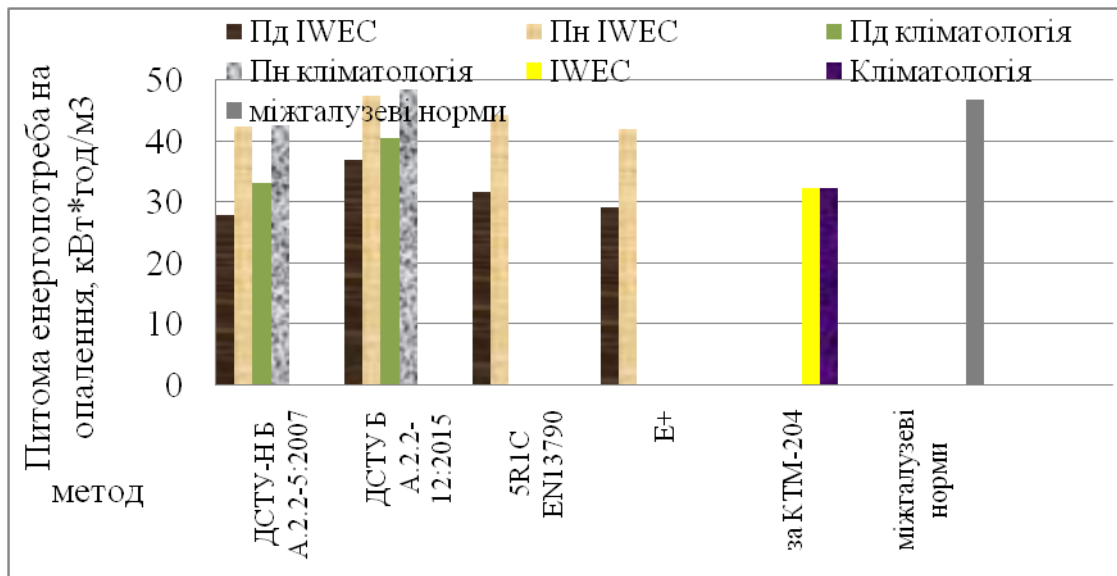


Рис. 3.1 – Річна питома енергопотреба в опаленні за різними методами та базами погодних даних [166]

Розрахунок за КТМ-204 [90] враховує сонячні теплонадходження в питомих характеристиках опалення. Дані характеристики обираються за такими показниками як об'єм, призначення будівлі та рік забудови та не враховують орієнтацію приміщень, географічне розташування об'єкта, що призводить до завищення розрахункової енергопотреби для південних регіонів та заниження для північних регіонів. [166]

За перевірочне значення енергопотреби на опалення було обрано розрахунки на основі E+ для визначення розбіжності результатів розрахунку за різними підходами. Для приміщення, орієнтованого на Пд сторону світу, розбіжність значень енергопотреби більша ніж для приміщень Пн орієнтації. КТМ-204 [90] використовує в розрахунках енергетичні характеристики будівлі, які враховують середньорічне значення сонячних теплонадходжень по Пд та Пн орієнтаціям. Міжгалузеві норми [91] приведені для великих міст та обласних центрів України. Серед приведених методів, міжгалузеві норми – дають найбільшу питому характеристику [166].

Стаціонарні методи розрахунку (за міжгалузевими нормами [91], укрупненими показниками КТМ-204 [90] та квазістаціонарний помісячний метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94]) дають найбільшу розбіжність з E+.

Розрахована питома енергопотреба за укрупненими показниками (КТМ-204 [90]) дає розбіжність біля 40%, за міжгалузевим нормами 60%, деталізований метод ГД за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 [35] має найнижче значення та розбіжність становить біля 5% на Пд, 10% - на Пн, за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] - 12% для півночі, 28% - для півдня. Динамічні методи E+[71] та 5R1C [23] дають майже однакове значення потреби в опаленні відмінність методів до 7% для всіх орієнтацій [106].

Якщо використовувати методіку перерахунку сонячних теплонадходжень на вертикальну поверхню за методікою, наведеною в розділі 2.2, річна енергопотреба за 5R1C відрізняється на 4% в порівнянні з енергопотребою за 5R1C, розрахованою для сонячних теплонадходжень за методікою E+ "Full interior and exterior with reflection" [166].

На рис. 3.2 наведено помісячну питому енергопотреби в опаленні в залежності від опалювального місяця.

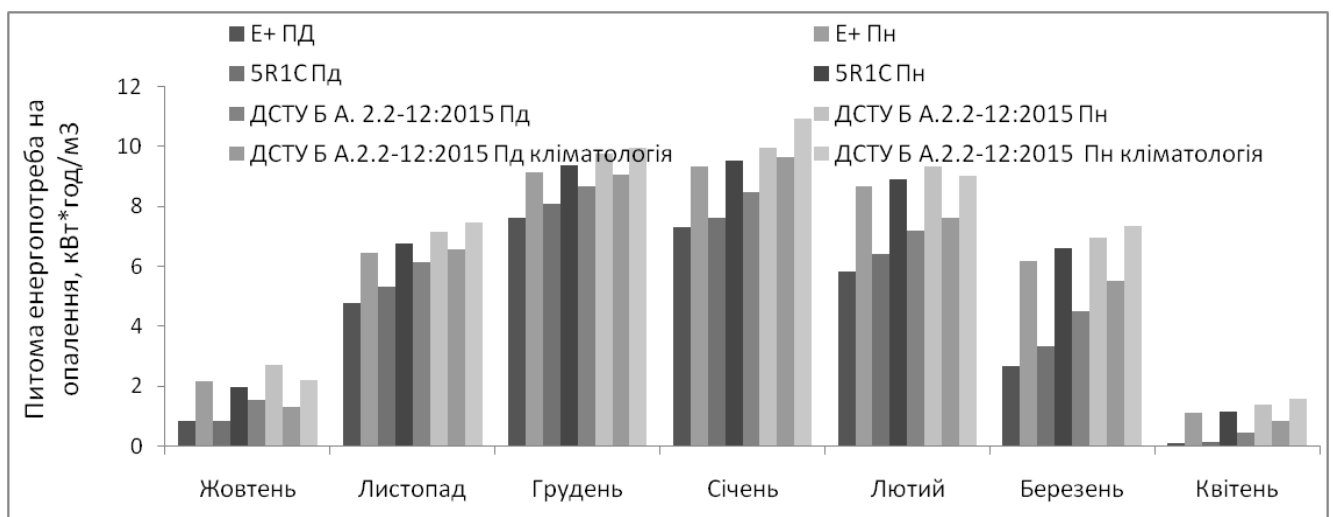
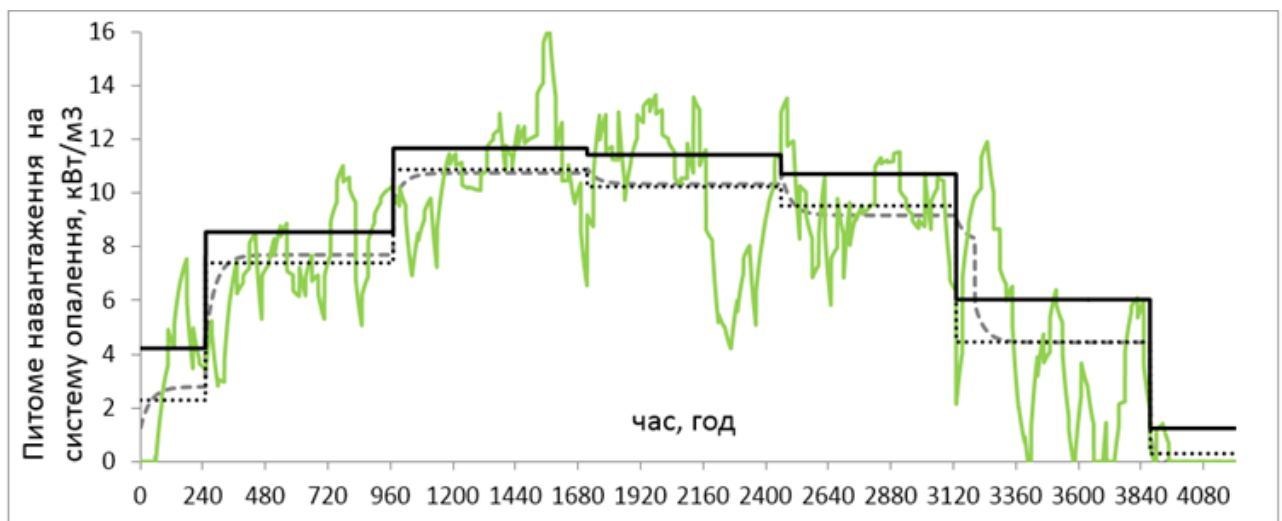


Рис. 3.2 – Графік зміни питомої енергопотреби на опалення в залежності від опалювального місяця [166]

Найнижчу характеристику зміни помісячної питомої енергопотреби в опаленні мають розрахунки на основі E+, досить близькі значення отримані на основі моделі 5R1C, середньомісячна розбіжність отриманих розрахунків складає 2 кВт·год/м³ або 5% для Пн та Пд. Середньомісячна розбіжність розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] за даними IWEC з результатами отриманими на основі моделі E+ складає 3 кВт·год/м³ (12%) на Пд та Пн. За даними з будівельної

кліматології розбіжність більша та складає 4-5 кВт·год/м³ (13%). Метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] дає найбільші значення потреби в тепловій енергії за кліматичними даними IWEC, порівняно з іншими розглянутими методами, а при використанні нормативних кліматологічних даних питомі показники ще збільшуються [166].

В роботі розглянуті дві динамічні моделі реалізовані на основі стандарту [23] 5R1C та програмного продукту E+. При погодинному аналізі динамічних розрахунків питомої енергопотребы на опалення тенденції в поведінці графіків навантаження на систему опалення в 5R1C та E+ зберігаються. На рис. 3.3 наведено дані нестационарного погодинного розрахунку питомої потреби на опалення кімнати орієнтованої на Пд для середньодобових та середньомісячних значень за моделлю 5R1C та результати отримані на основі квазістационарної методики розрахунку ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94]. [166]



- помісячний розрахунок за ДСТУ Б А.2.2-12:2015,
- Погодинний розрахунок за 5R1C:
 - по середньомісячними t_{ext} та Q_{sol} ,
 - по середньодобовими t_{ext} та Q_{sol} ,
 - по погодинними t_{ext} та Q_{sol} , усереднено за місяць.

Рис. 3.3 – Погодинна зміна питомого рівня опалення протягом опалювального періоду для приміщення орієнтованого на Пд [166]

Побудована на базі погодинного розрахунку зміни рівня опалення для середньодобових та середньомісячних значень t_{ext} та Q_{sol} , річна потреба в

опаленні та розрахована за моделлю 5R1C майже не відрізняється між собою. Результати погодинної питомої енергопотребі в опаленні по помісячним значенням погодних умов за моделлю 5R1C мають плавні зони-переходи між місяцями, що пов'язано з тепло-інерційними особливостями огорожень моделі, на відміну від розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94]. Середньомісячне споживання при погодинному розрахунку теплового навантаження на систему опалення при погодинній змінні значень t_{ext} та Q_{sol} , майже не відрізняється від погодинного розрахунку по середньо добовим і середньо місячним значенням t_{ext} , Q_{sol} , але в останній моделі немає можливості аналізувати регулювання системи опалення протягом доби.

Погодинні зміни рівня опалення суттєві та призводять до того, що в погодинному режимі регулювання системи опалення є години роботи, коли потрібно вимикати опалення. Це характерно для періоду міжсезоння, а також для аномального по кліматичним значенням лютого (найнижчі температури та найвищі значення сонячної активності для зимових місяців) [166].

На основі вище перерахованих методів розрахунку енергопотребі на опалення було встановлено середні питомі показники енергоефективності будівлі для Пд та Пн орієнтацій та порівняно їх з нормативними значеннями (табл. 3.1). При енергетичній сертифікації будівель використовуються сучасні нормативні значення, тому в табл. 3.1 наведено і сучасні нормативні значення і для будівель 70-х років [166].

Таблиця 3.1 – Показник енергопотребі теплової енергії отриманий за різними методиками розрахунку [166]

КТМ-204	ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007	ДСТУ Б А.2.2-12:2015	5R1C	E+	Для будівель збудованих після 2000 р.	Для будівель збудованих в 70-х роках
кВт·год/м ³						

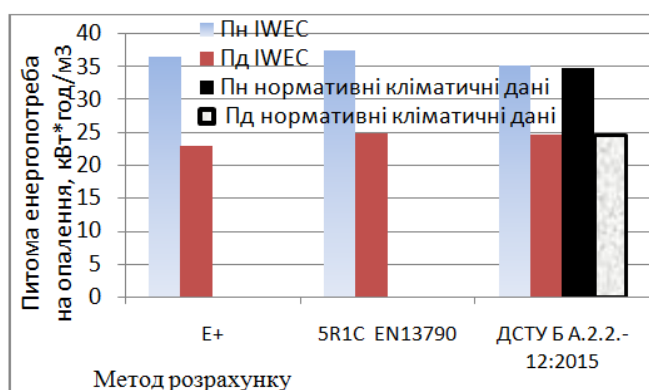
40	35	42	38	36	31	47
----	----	----	----	----	----	----

Питоме значення енергоспоживання будівлею за результатами розрахунків в цілому буде дещо більше ніж наведено в табл. 3.1, так як розрахунок проводився для приміщень, які мають одну зовнішню стіну. Тепловтрати через дах та підлогу також внесуть незначне збільшення питомих показників. Для старих будівель норми споживання теплової енергії вищі в порівнянні з сучасними нормами, що пов'язано з вимогами до теплотехнічних характеристик огорожень при будівництві/проектуванні. При розрахунку за динамічними методами показники питомого споживання дещо менші в порівнянні зі стаціонарними, за винятком методу ГД за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 [35]. [166]

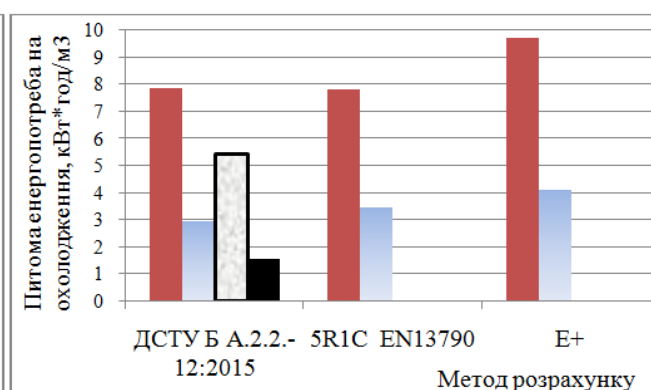
Порівняння застосування математичних моделей для визначення енергопотреби будівлі розташованої в місті Одеса

Для порівняння розглянутих методик, розрахунок енергопотреби проводився для міста Одеса з помірно континентальним кліматом, що дозволило проводити розрахунок енергопотреби на опалення та охолодження.

В роботі проведено розрахунок річної потреби на опалення та охолодження в помісячному розрізі (метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94]), в погодинному інтервалі (E+ та 5R1C). Питома характеристика розрахункового значення енергопотреби, яка отримана розглянутими методами, представлена на рис. 3.4а для опалення, а на охолодження - на рис. 3.4б [167].



а)



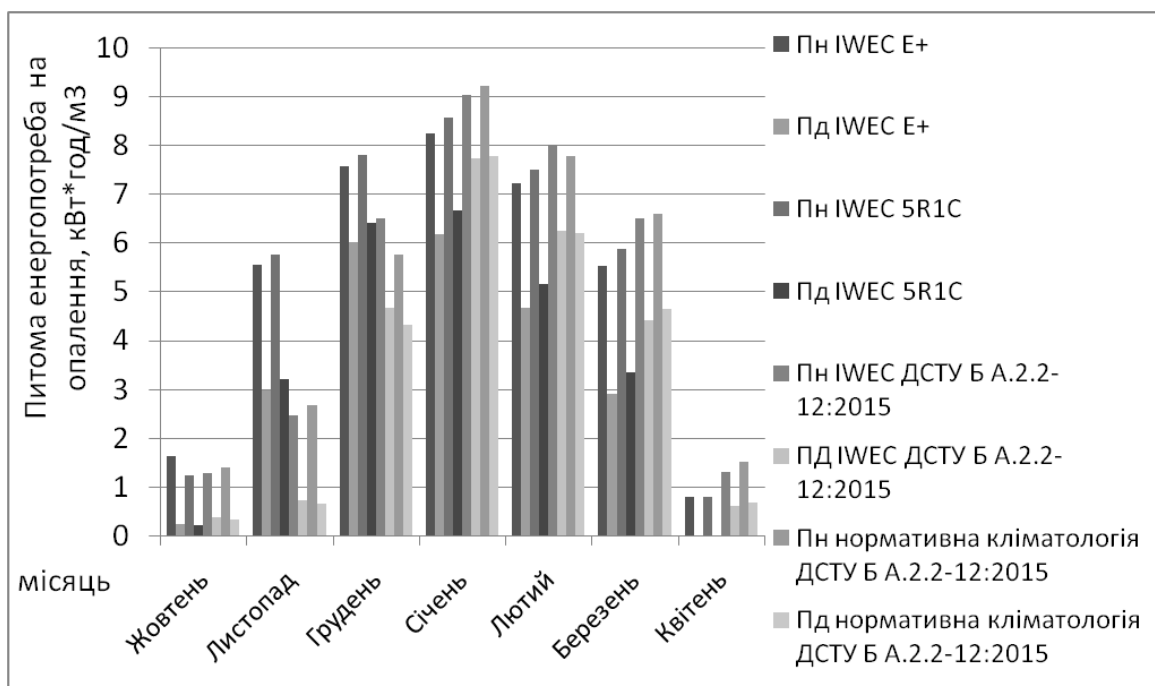
б)

Рис. 3.4 – Річна питома енергопотреба на опалення (а) та охолодження (б) для будівлі у м. Одеса за різними методами та базами погодних даних [167]

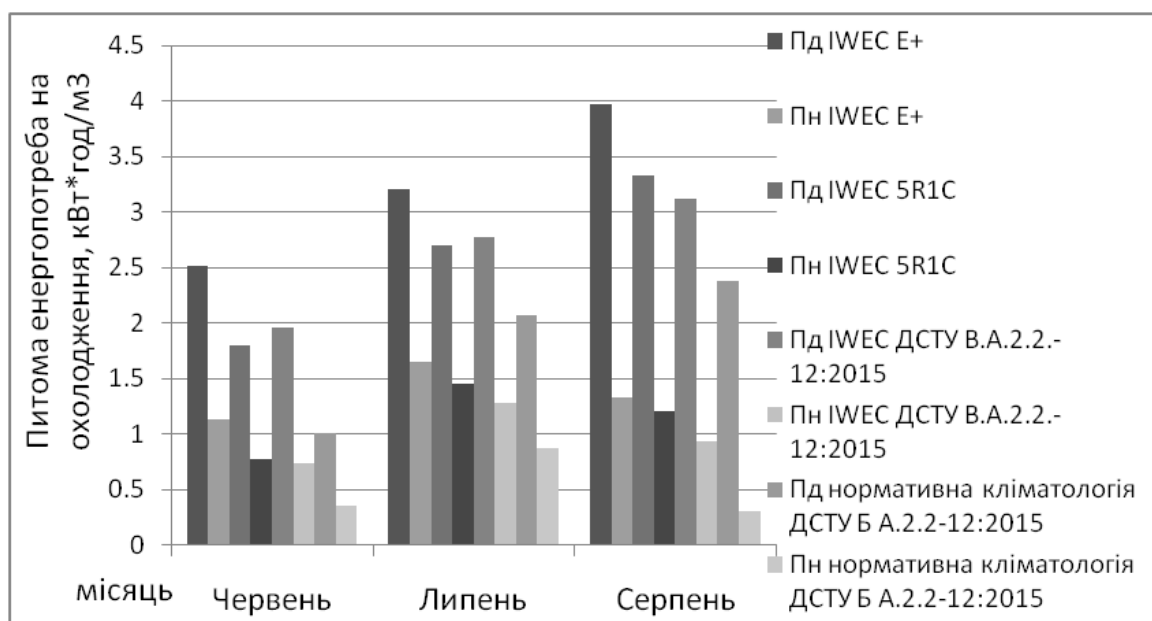
На рис. 3.4 проведено не лише порівняння різних методів розрахунку питомої потреби на опалення за однакових вхідних кліматичних параметрів (дані IWEC за методом перерахунку наведеним E+), але й наведено їх відмінність при використанні нормативних кліматичних даних, що прийняті в Україні. За перевірочне значення енергопотреби для опалення та охолодження було обрано розрахунки на основі E+ для визначення розбіжності результатів розрахунку за різними підходами. [167]

Для приміщення орієнтованого на Пд сторону світу розбіжність значень енергопотреби більша ніж для приміщень Пн орієнтації. Квазістаціонарний помісячний метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] дають розбіжність з E+ в зимовий період - 4% для півночі, 8% - для півдня. Динамічні методи E+ та 5R1C дають значення потреби в опаленні, відмінність методів до 9% для Пд, та 2%-Пн. В літній період року сонячні теплонадходження в зону будівлі складають основну частину в загальному енергобалансі. Для режиму охолодження національний метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] має також найбільшу розбіжність E+, але в сторону зменшення, що пов'язане з підходами врахування теплоаккумуляційних властивостей огорожень, розбіжність становить 18% на Пд та 28% на Пн. Динамічні методи E+ та 5R1C мають розбіжність 16-18% по всіх орієнтаціях. Модель 5R1C [23] масивність будівлі враховує через один приведений вузол внутрішніх та зовнішніх огорожень на відміну від E+, де огороження розділені. Значний відсоток розбіжності динамічних моделей свідчить про необхідність розвитку моделей розрахунку енергопотреби для охолодження [167], що діють в Україні.

На рис. 3.5 наведено аналіз енергопотреби для опалення та охолодження в помісячному розрізі.



а)



б)

Рис. 3.5 – Графік зміни питомої енергопотребы будівлі розташованої у м. Одеса для опалення (а) та охолодження (б) в залежності від місяця [167]

В цілому найнижчі значення помісячної енергопотребы для опалення мають результати на основі E+, досить близькі значення отримані на основі моделі 5R1C, середньомісячна розбіжність отриманих розрахунків складає 4-8% для Пн та Пд. Середньомісячна розбіжність розрахунку ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] за

даними IWEC [82] з результатами отриманими на основі моделі E+ складає 14% на Пн та 30% на Пд. Для даних розрахунку енергопотребі на базі будівельної кліматології розбіжність аналогічна як і для даних IWEC [82]. Національний метод розрахунку має найбільші значення потреби на опалення за кліматичними даними IWEC, порівняно з іншими розглянутими методами. [167]

В літні місяці року при визначенні потреби на охолодження розбіжність методик з E+ становить 18% на основі моделі 5R1C для Пн та Пд орієнтації; 28% (Пн) та 18% (Пн) - ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] за даними IWEC. За даними з будівельної кліматології розбіжність за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94] більша та складає 40% на Пд, 55% - Пн [167].

Потреба на охолодження в методі розрахунку [94] найнижча в порівнянні з іншими методами, що пов'язано з врахуванням теплоінерційних особливостей огорожень в кожній з методик, які були прописані вище [167].

Як перший напрям підвищення енергоефективності будівель в Україні розглядається термомодернізація будівель, вплив подібних заходів на споживання енергії на опалення будівлі визначали в річному розрізі. Наступний етапом підвищення ефективного використання енергії – є регулювання рівня опалення протягом доби, що дозволяє знизити споживання теплової енергії в неробочі години або в години пікової сонячної активності. Аналіз методів вирішення таких задач здійснюється на основі динамічних моделей. В роботі розглянуті дві динамічні моделі реалізовані на основі стандарту 5R1C [23] та програмного продукту E+ [71]. [167]

При погодинному аналізі розрахунків питомої енергопотребі на опалення тенденції в поведінці графіків навантаження на систему опалення в 5R1C та E+ зберігаються. На рис. 3.6 наведено дані погодинного розрахунку за моделлю 5R1C [23] питомої потреби на опалення кімнати орієнтованої на Пд. Порівнюються погодинні результати, отримані: на погодинних значеннях кліматичних даних з IWEC, на усередненні з цих даних по добам і на місячних інтервалах опалювального сезону, за середньомісячними кліматичними нормами, що діють в Україні.

Результати погодинної питомої енергопотребы в опаленні по помісячним значенням погодних умов мають плавні зони-переходи між місяцями, що пов'язано з тепло-інерційними особливостями огорожень будівлі. Розраховані на базі погодинних результатів значення річної та місячних потреб в опаленні для погодинних, середньо добових та середньомісячних значень t_{ext} та Q_{sol} майже не відрізняються між собою. [167]



Рис. 3.6 – Погодинна зміна питомого рівня опалення протягом опалювального періоду для приміщення орієнтованого на Пд для м. Одеса за моделлю 5R1C для різних баз кліматологій

Розрахунок за середньомісячними кліматичними даними, що діють в Україні має дещо вищі питомі показники у зв'язку з відмінністю кліматичних характеристик баз даних, які аналізувалися вище.

Модель на базі погодинних значень t_{ext} та Q_{sol} надає можливість аналізувати енергопотребу і враховувати її при регулюванні системи опалення протягом доби. Погодинні зміни рівня опалення суттєві. Так в години великого рівня сонячних надходжень опалення знижується або може вимикатися взагалі. Це характерно для періоду міжсезоння, а також для аномального по кліматичним значенням лютого (найнижчі температури та найвищі значення сонячної активності для зимових місяців) [167].

На основі розглянутих методів розрахунку енергопотреби для опалення та охолодження було встановлено середні для Пд та Пн орієнтацій питомі показники енергоефективності будівлі для літнього та зимового періоду року (табл. 3.2). При енергетичній сертифікації будівель використовуються сучасні нормативні значення, для порівняння для закладів освіти, які розташовані в II-гій кліматичній зоні нормативна величина енергопотреби становить 28 кВт·год/м³ [92]. Для існуючих старих будівель, які не пройшли термомодернізацію нормативні значення обираються для будівель 70-х років [91], дана величина становить 32 кВт·год/м³ [167].

Таблиця 3.2 – Показник енергопотреби теплової енергії, отриманий за різними методиками розрахунку [167]

Питома енергопотреба будівлі, кВт·год/м ³					
опалення			охолодження		
ДСТУ Б А.2.2-12:2015	5R1C	E+	ДСТУ Б А.2.2-12:2015	5R1C	E+
30	31	30	5.4	5.7	6.9

Як показують дані таблиці 3.2 для старих будівель норми споживання теплової енергії на опалення вищі в порівнянні з сучасними нормами, що пов'язано з вимогами до теплофізичних характеристик огорожень при будівництві/проектванні. Нормативних значень енергопотреби для охолодження в Україні не існує. При розрахунку динамічними методами 5R1C [23] та E+ [71] показники питомої енергопотреби з охолодження та опалення дещо вищі в порівнянні зі квазістаціонарним за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [94], що пояснюється спрощеннями при врахуванні теплоінерційних особливостей огорожень. [167]

Висновки. Застосування вище розглянутих методів залежить від задач, що вирішуються. В розрізі добової зміни дані по середньомісячним та середньодобовим значенням не дозволяють відслідковувати динамічні

характеристики, тому для задач прогнозування або динамічного регулювання повинні використовуватись погодинні зміни зовнішніх погодних умов.

Динамічні методи E+ та 5R1C дають майже однакове значення потреби для опалення, відмінність методів до 4-8% для всіх орієнтацій, в режимі охолодження дана розбіжність становить 16-18% по всіх орієнтаціях. Модель 5R1C масивність будівлі враховує через один приведений вузол внутрішніх та зовнішніх огорожень на відміну від E+, де вузли цих огороження розділені. Значний відсоток розбіжності результатів, отриманих за допомогою динамічних моделей, свідчить про необхідність розвитку моделей розрахунку енергопотребі для охолодження [23, 94], що діють в Україні.

3.2 Моделі сумісного впливу сонячної та теплової радіації

Основою поглибленого аналізу теплового стану приміщень є математичні моделі, які базуються на використанні знань фізичних характеристик будівлі. В діючих підходах оцінки енергетичної потреби будівлі є ряд спрощень, що обмежують якість розрахунків. В [35] приймається, що температура повітря та температура огорожувальних конструкцій однакова, а вся сонячна радіація, яка проходить в будівлю, поглинається та не враховано власний променевий теплообмін стін. Відповідно до стандарту [23] підбір опалювальних приладів здійснюється за операційною температурою, що є середньозваженим значенням середньорадіаційної та внутрішньої температури повітря, тому детальне визначення радіаційної температури дозволить врахувати умови комфортності при визначенні рівня опалення.

Вплив власного теплового випромінювання стін на температуру зовнішніх огорожувальних конструкцій вивчений недостатньо. З метою врахування даного впливу створена математична модель кімнати. Частина радіаційного випромінювання, яке потрапляє до кімнати, поглинається огороженнями, а

частина пропускається через світлопрозорі огорожувальні конструкції до атмосфери.

3.2.1 Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на температуру внутрішніх поверхонь огорожень будівлі

Розміри кімнати 5×5 м та висота 4 м. Приймається, що приміщення має одну зовнішню стіну та вікно ($F_{zc}=6,5$ м²). Розглядалися по три варіанти значень опору теплопровідності стін та вікон ($R_{zc} = \{0,8; 1,2; 1,6\}$, $R_b = \{0,2; 0,5; 0,8\}$ (м²·К)/Вт). Коефіцієнти тепловіддачі зовнішнього повітря 23 Вт/(м²К) та внутрішнього повітря 8,7 Вт/(м²К). Температура зовнішнього повітря -1°C . Кратність повітрообміну -1 год⁻¹. Теплоємність повітря -1005 Дж/(кг·К). Густина повітря $-1,225$ кг/м³. Коефіцієнт поглинання внутрішніх стін: сонячного випромінювання 0,2; теплового для стін і вікна $-0,9$. Коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання вікна 0,8. Кутові коефіцієнти відповідно до умов термодинамічної рівноваги розраховувалися з наступних співвідношень [168, 169]:

$$\varphi_{\text{во-зс}} = \frac{F_{zc}}{F_{\text{во}}} = 0,059, \quad \varphi_{\text{во-в}} = \frac{F_b}{F_{\text{во}}} = 0,123.$$

Значення сумарних внутрішніх теплових надходжень та опалення розраховувались з умов температури приміщення 18°C , рівня сонячних надходжень 35 Вт/м² та приймалися сталими.

Опис моделі наведено у розділі 2.2. Порівнювались результати розрахунків за двома моделями (з врахуванням власного теплового випромінювання огорожень та без). При різних інсоляційних надходженнях розглядали наступні варіанти зміни параметрів огорожувальних конструкцій: 1) $R_{zc}=\text{const}$, $R_b=\text{var}$; 2) $R_b=\text{const}$, $R_{zc}=\text{var}$.

На рисунку 3.7 представлено зміну внутрішньої температури повітря та температури поверхонь зовнішніх огорожувальних конструкцій з врахуванням

власного випромінювання внутрішніх стін та без нього при зміні інтенсивності інсоляційних надходжень. Значення $R_{zc}=0,8 \text{ м}^2\text{К/Вт}$, $R_B=0,5 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

На внутрішню температуру повітря власне випромінюванням огорожувальних конструкцій практично не впливає, натомість при врахуванні власного випромінювання температура поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій змінюється приблизно на 1°C – вікно та $0,5^\circ\text{C}$ – стіна.

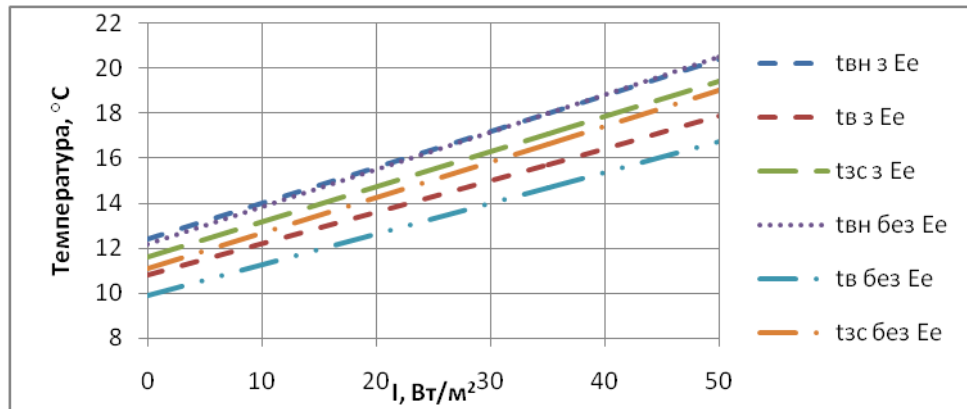


Рис. 3.7 – Зміна температури внутрішнього повітря та зовнішніх огорожувальних конструкцій в залежності від інтенсивності сонячних теплонадходжень [168]

На рис. 3.8 представлена зміна тепловтрат зовнішньої стіни в залежності від інтенсивності сонячних теплонадходжень при різних значеннях опору теплопровідності.

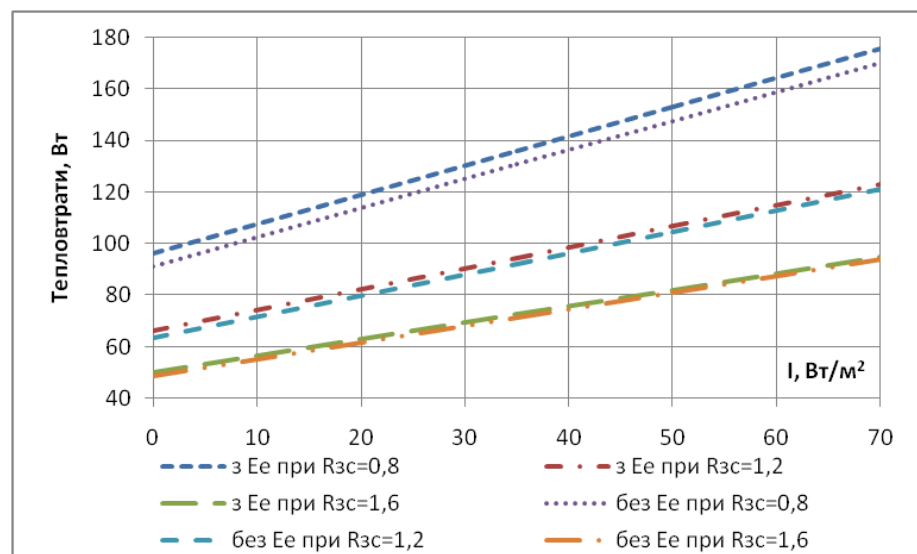


Рис. 3.8 – Зміна тепловтрат зовнішньої стіни в залежності від інтенсивності сонячних теплонадходжень [168]

З рис. 3.8 видно, що при збільшенні опору теплопередачі власне випромінювання внутрішніх стін менше впливає на тепловтрати. На рис. 3.9 наведена зміна температури поверхонь зовнішньої стіни та вікна за рахунок врахування власного випромінювання при різних опорах огорожувальних конструкцій.

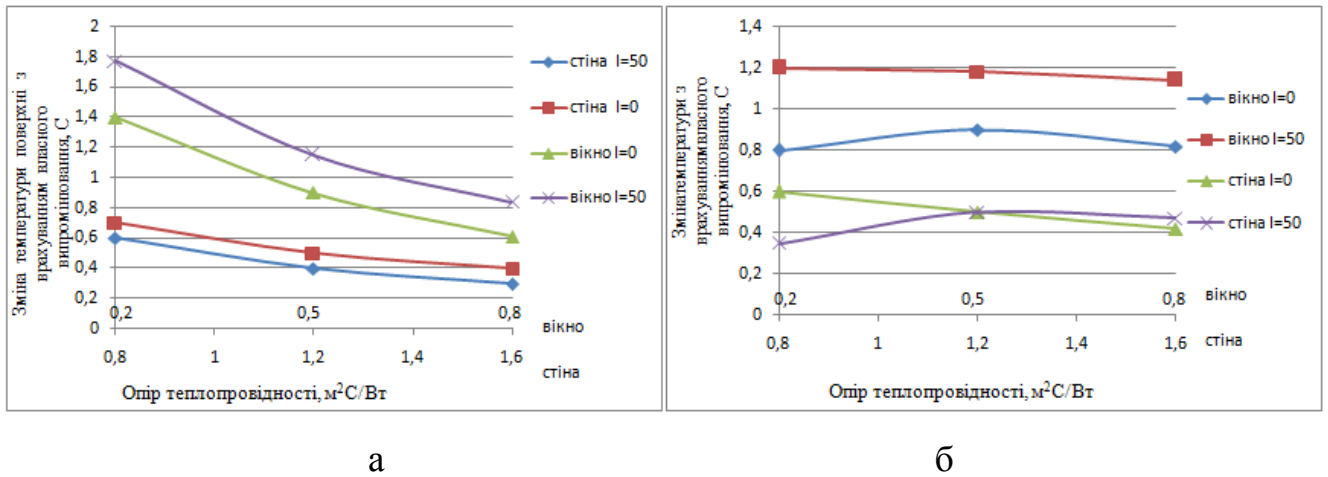


Рис.3.9 – Зміна температури внутрішніх поверхонь при врахуванні власного випромінювання. Пряма (а) та перехресна (б) залежність від опору стін та вікон при різних рівнях сонячних теплонадходжень [168]

З результатів цих розрахунків видно, що врахування власного випромінювання збільшує температуру поверхні стіни на 1–1,5°С та на 0,5–0,8°С вікна.

При моделюванні досліджено також вплив зміни опору вікна на температуру поверхні зовнішньої стіни і навпаки: стіни на вікно. Визначено, що при збільшенні інтенсивності сонячної радіації зміна температури поверхні під дією такого перехресного впливу елементів зовнішніх огорожень змінюється від лінійної на опуклу.

Результати залежності внутрішніх температур зовнішньої стіни, вікна та повітря від інтенсивності сонячного випромінювання та опору зовнішніх огорожень в розглянутому діапазоні параметрів оброблені за допомогою лінійного багатofакторного регресійного аналізу (рівняння (3.1)–(3.3)):

$$\frac{t_{вн}}{t_{вн}} = 0,662 + 0,326 \frac{I}{I} + 0,0012 \frac{R_{зс}}{R_{зс}} + 0,0104 \frac{R_{г}}{R_{г}}, R^2 = 0,986, \quad (3.1)$$

$$\frac{t_g}{t_g} = 0,497 + 0,334 \frac{I}{I} + 0,0026 \frac{R_{3c}}{R_{3c}} + 0,1665 \frac{R_g}{R_g}, R^2 = 0,967, \quad (3.2)$$

$$\frac{t_{3c}}{t_{3c}} = 0,59 + 0,336 \frac{I}{I} + 0,0638 \frac{R_{3c}}{R_{3c}} + 0,0108 \frac{R_g}{R_g}, R^2 = 0,967. \quad (3.3)$$

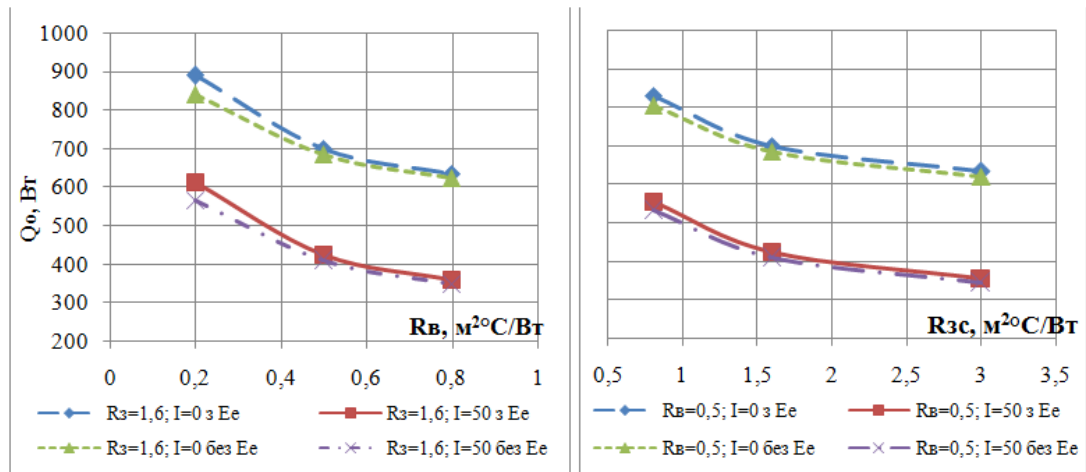
Значення приведених коефіцієнтів рівнянь регресії являються коефіцієнтами еластичності. З цих значень видно, найбільший вплив на температуру поверхонь зовнішніх огорожувальних конструкцій має інтенсивність сонячного теплонадходження, а також більший вплив має опір даної поверхні у порівнянні з перехресним впливом. Поведінка теплових потоків через зовнішні огорожувальні конструкції має аналогічний характер [168].

3.2.2 Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на рівень опалення приміщення

Опис моделі наведено у розділі 2.2. Коефіцієнт затінення вікон – 0,65, коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання – 0,75. Коефіцієнт поглинання внутрішніх стін: сонячного випромінювання 0,2; теплового для стін і вікна – 0,9. Коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання вікна 0,8. Співвідношення площі світлопрозорих огорожень до площі зовнішнього огороження змінювали ($\kappa_3 = \frac{F_g}{F_{3g}} = \{0,3; 0,5; 0,7\}$). Значення сумарних внутрішніх теплових надходжень та опалення розраховувались з умов температури приміщення 18°C, рівня сонячних надходжень $I=[0 \dots 50]$ Вт/м².

Порівнювались результати розрахунків за двома моделями (з врахуванням власного теплового випромінювання огорожень E_e та без). При різних інсоляційних надходженнях та за різною площею світлопрозорих елементів зовнішніх огорожень розглядали наступні варіанти зміни параметрів огорожувальних конструкцій: 1) $R_3=\text{const}, R_b=\text{var}$; 2) $R_b=\text{const}, R_3=\text{var}$.

На рис. 3.10 наведено залежності рівня опалення від опору огорожувальних конструкцій для сонячних теплонадходжень $I=[0 \dots 50]$ Вт/м².



а

б

Рис. 3.10 – Рівень опалення для різних рівнів сонячних тепло надходжень в залежності від опору вікна (а) зовнішньої стіни (б) [169]

Врахування сонячних теплонадходжень значно змінює рівень опалення, на рівні 50 Вт/м^2 рівень опалення знижується понад 40%, на рівні 35 Вт/м^2 – понад 15% для заданих значень термічного опору зовнішніх огорожень. Врахування власного теплового випромінювання внутрішніх стін зменшує розраховану величину рівня опалення на 5%. Вплив власного теплового випромінювання на рівень теплопостачання зменшується зі збільшенням опору вікон, зі збільшенням опору зовнішніх стін даний вплив на рівень опалення лишається не змінний незалежно від сонячних теплонадходжень.

За діючими в Україні нормами термічний опір стін будівель, що проектуються, приблизно рівний $3 \text{ м}^2\text{К/Вт}$, з відмінами залежно від температурної зони. Більшість будівель, що експлуатуються, мають термічний опір зовнішніх стін значно менший та в середньому рівний $1,6 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. На рис. 3.11 представлено залежність рівня опалення від різної площі засклення для різних сонячних теплонадходжень.

Рівень опалення прямопропорційно збільшується залежно від площі вікна, при відсутності сонячних теплонадходжень, та прямопропорційно зменшується залежно від площі вікна при сонячних теплонадходженнях 50 Вт/м^2 . Збільшення термічного опору зовнішнього огороження від $1,6$ до $3 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ дозволяє

зменшити рівень теплового навантаження на систему опалення на 50 Вт для даного приміщення [169].

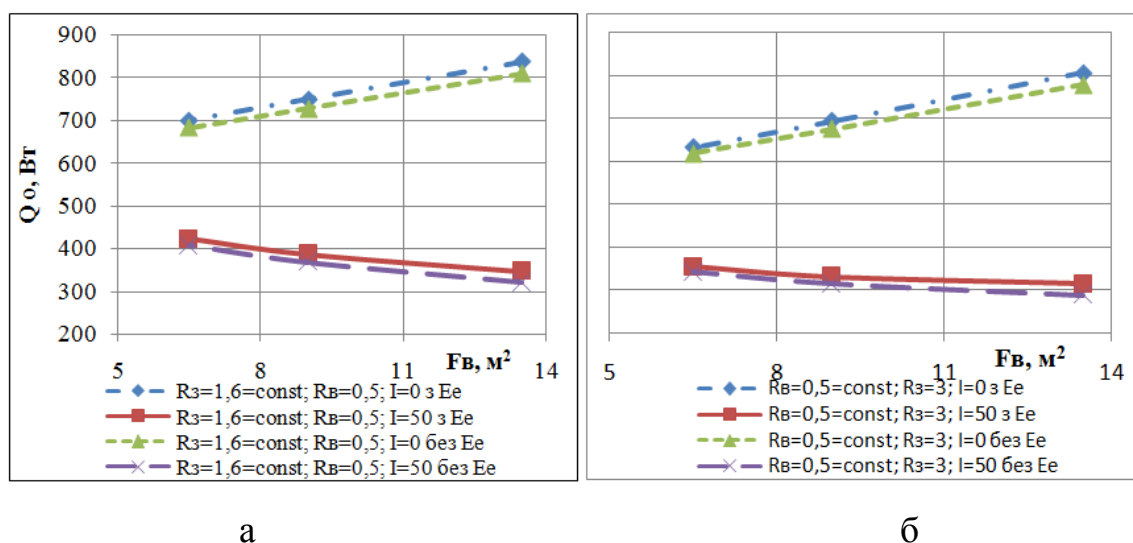


Рис. 3.11 – Рівень опалення в залежності від площі засклення для старих масових будівель типу "хрущівка", що експлуатуються (а) та для будівель збудованих за сучасними вимогами термічного опору зовнішніх огорожень (б) та [169]

На рис. 3.12 наведено залежності рівня опалення від рівня сонячних теплонадходжень для різних коефіцієнтів засклення та двох варіантів зовнішніх стін.

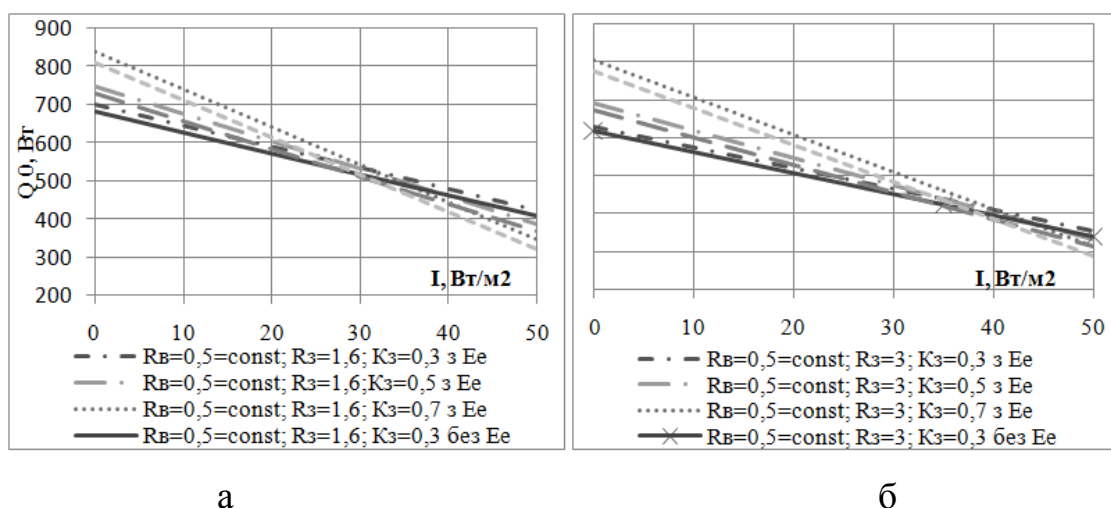


Рис. 3.12 – Залежність рівня опалення від інтенсивності сонячних теплонадходжень для різної площі засклення та опору зовнішнього огороження для будівель типу "хрущівка"(а) та, що відповідають сучасним вимогам (б) [169]

Висновки. Зі збільшенням площі застосування величина рівня опалення зростає. При сонячних теплонадходженнях біля 30 Вт/м^2 площа застосування майже не впливає на рівень опалення для опорів зовнішніх огорожень будівель типу "хрущівка". При більшому рівні сонячних рівень опалення зменшується збільшенням площі застосування. Для будівель побудованих за сучасними нормами при сонячних теплонадходженнях біля 40 Вт/м^2 на рівень опалення не впливає площа застосування.

Також, аналізувались температури поверхні зовнішньої стіни та вікна для різних рівнів сонячних надходжень та опору даних огорожень за умови, що температура в приміщенні стала та рівна 18°C .

Результати моделювання виявили також такі тенденції. Температура поверхні зовнішньої стіни зростає на $1\text{--}1,5^\circ\text{C}$ при збільшенні інтенсивності сонячних теплонадходжень, для заданого діапазону опору стіни. Температура поверхні вікна не залежить від інтенсивності сонячних надходжень, тому що в даній моделі вікна не поглинають радіаційне випромінювання. Врахування власного теплового випромінювання збільшує розрахункове значення температур поверхонь зовнішньої стіни на $1\text{--}1,5^\circ\text{C}$, вікна – на $1,5^\circ\text{C}$. Перехресний вплив зміни опору елементів зовнішніх огорожень на температуру поверхні огороження відсутній.

Зі збільшенням опору огорожувальних конструкцій вплив власного теплового випромінювання зменшується. Вплив теплового випромінювання на тепловтрати через вікно більший ніж через зовнішню стіну.

Більш детальний аналіз часової зміни впливу сонячної радіації потребує додаткових досліджень, тому розглянута стаціонарна модель сумісного впливу власного теплового випромінювання та сонячної радіації отримала місце в розвитку динамічної моделі 8R2C, що дозволило розділити внутрішні та зовнішні огороження.

3.3 Багатофакторні регресійні залежності для визначення часових змін енергетичних характеристик будівель

Як згадувалось в розділі 1.5 емпіричні методи набувають все ширшого застосування, регресійні залежності одні з них, які дозволяють вирішувати задачі прогнозування на різних рівнях. Для умов України якісне регулювання здійснюється по зовнішній температурі повітря та враховує ряд інших вагомих факторів. Авторам статей [39, 31, 33, 40, 50,54, 125, 131] створено регресійні залежності для прогнозування енергопотреби на опалення в річному [31, 39, 40, 50, 54, 125], середньодобовому [131, 38] та погодинному [131, 33, 31, 38, 125] розрізі, що включають від 6 до 17 впливових параметрів (теплофізичні, геометричні, експлуатаційні та кліматичні). Для конкретної будівлі, що експлуатується кількість впливових параметрів може значно зменшитися. В даному розділі розроблені короткострокові багатофакторні регресійні залежності для прогнозування внутрішньої температури повітря та/або рівня опалення. Внутрішня температура повітря та/або рівень опалення в приміщеннях є залежною величиною від ряду факторів.

Регресійні моделі використовуються для аналізу та прогнозу поведінки будівлі як енергетичної системи [33, 36, 125-129], які можуть будувати на основі накопичених фактичних даних або на основі даних імітаційного моделювання. В першому випадку отримані результати несуть в собі комплексний вплив ряду факторів, що ускладнює аналіз та визначення впливовості кожного фактору окремо. В другому випадку регресійна модель будується на основі ряду імітаційних результатів. Результати імітаційних моделювань і статистичної обробки результатів (сіре моделювання [134, 125, 33]) дозволяє виділити впливовість факторів та провести імітаційне моделювання для обраного діапазону збурень факторів. Інерційні особливості огорожень можуть бути враховані через врахування передісторії зміни факторів.

Прогноз температури є актуальним при визначенні забезпечення умов комфортності, має також значення при прогнозуванні режимів систем опалення

при центральному якісному регулюванні тепlopостачання та відсутності автоматичного регулювання систем опалення, що поки ще є достатньо типовим для умов України. При якісному регулюванні рівня тепlopостачання на опалення, що актуально для більшості діючих застарілих систем України, доцільно як правило використовувати середньодобові значення. Тому розглянуто побудову рівняння регресії на рівні залежності середньодобової зміни внутрішньої температури повітря від зміни середньодобового значення параметру впливу.

3.3.1 Дослідження факторів, які мають вагомий вплив на зміну внутрішньої температури повітря

В діючих європейських стандартах [23] комфортні умови визначаються на основі операційної температури, але визначення рівня опалення проводиться по внутрішній температурі повітря, тому регресійні залежності побудовані для прогнозування внутрішньої температури повітря. Велика кількість чинників впливає на рівень внутрішньої температури повітря в приміщені. Серед чинників які впливають на внутрішню температуру повітря умовно можна виділи внутрішні та зовнішні. До внутрішніх відносять рівень опалення, кратність повітрообміну, етажність, інженерні системи і т.д. Зовнішні характеризуються кліматичними даними: зовнішня температура повітря, сонячні теплонадходження, швидкість та напрям вітру і т.д. Основним серед кліматичних чинників є температура зовнішнього повітря. В Україні в більшості випадків регулювання рівня опалення здійснюється за температурним графіком подачі води в систему в залежності від зовнішньої температури. Велика кількість робіт присвячена дослідженню даного впливу як окремо так і в комплексі з іншими параметрами [34, 124]. Крім якісного регулювання рівня опалення досить важливо враховувати інерційність огорожувальних конструкцій будівлі, тому досить важливо враховувати зміни зовнішньої температури та інших впливових факторів протягом кількох попередніх діб [123].

Не менш важливим фактором є рівень сонячних теплонадходжень в зону кімнати. Вплив даного параметру є більш динамічним та майже одразу змінює внутрішню температуру повітря. Для спрощення моделі в більшості випадків приймається, що сонячні теплонадходження, які потрапили в зону кімнати набувають дифузного характеру [158, 159]. Сонячні теплонадходження залежать від ряду факторів. В першу чергу це орієнтація за сторонами світу та площа світлопрозорих елементів конструкції, оптичні характеристики вікон та наявність затінюючих пристроїв. В більшості випадків фактичні сонячні теплонадходження фіксуються для горизонтальної поверхні по двом складовим: пряма та розсіяна сонячна радіація. При перерахунку сонячних теплонадходжень на вертикальні поверхні потрібно враховувати наступні особливості: географічні координати розташування будівлі, положення сонця до горизонту відповідно до періоду року та добовий кут розташування сонця, а також затемнення та затінення [158, 159, 170]. У міжнародному кліматичному файлі International Weather for Energy Calculations (IWEC), що створений для типового року певного міста, пряма сонячна радіація представлено через поняття "direct normal radiation", розсіяна сонячна радіація – через "diffuse horizontal" [82]. Програмний продукт EnergyPlus дозволяє врахувати всі вище перераховані особливості сонячної активності та визначати рівень сонячної радіації, що надходить в зону кімнати. В програмному продукті використано кілька методів для обчислення сонячної радіації на вертикальних поверхнях та розподілу переданих сонячних тепловіддачі на внутрішні поверхні.

Ще один з показників визначення умов комфортності є повітрообмін. Якщо говорити про природну вентиляцію даний показник є найбільш складним для визначення та залежить від великого числа чинників. Існують експериментальні та розрахункові методи визначення повітрообміну, найбільш поширені з них визначають повітрообмін через різницю тисків [105, 160-162]. Існує три механізми створення різниці тисків: стак ефект, вітровий ефект та з механічною вентиляцією. Перший механізм створюється за рахунок створення різниці густин між теплим і холодним повітрям. Вітряний ефект враховує напрям та швидкість

вітру, особливості зміни профілю швидкості вітру по висоті. Найпростіший механізм для розрахунку – перепад тисків за рахунок механічної вентиляції. Профіль зміни тиску для врахування цього механізму однаковий по всій висоті будівлі. Програмний продукт EnergyPlus дозволяє враховувати природну та механічну складові вентиляції та визначає кратність повітрообміну [71]. Кратність повітрообміну є комплексний критерій ряду впливових факторів.

Крім зовнішніх факторів на температуру внутрішнього повітря впливають рівень опалення та внутрішніх тепловиділень в приміщенні. Взаємозв'язок між цими факторами можна визначати через функціональну залежність для опалення. Регулювання рівня опалення при збуренні зовнішніх та внутрішніх факторів здійснюється по внутрішній температурі повітря, тому в роботі пропонується взаємозалежність між факторами як функцію в явному вигляді для внутрішньої температури повітря. При потребі її можна представити як функціональну залежність для опалення.

Таким чином для спрощення загального вигляду регресійної залежності доцільно будувати регресійні залежності через комплексні критерії ряду впливових факторів (кратність повітрообміну, сонячні теплонадходження в зону кімнати, рівень внутрішніх теплонадходжень). Загалом виділено чотири комплексні параметри, які впливають на внутрішню температур повітря розглянутої будівлі, а саме зовнішня температура повітря, сонячні теплонадходження в зону кімнати, кратність повітрообміну, рівень опалення. Вплив та виокремлення більш впливових факторів доцільно вивчати за допомогою імітаційного моделювання. [28-32].

Проаналізовано зміну погодних умов даних IWEC [82] для опалювального сезону м. Київ. Один з основних факторів впливу на внутрішню температуру повітря є зовнішня температура. Даний фактор змінюється поступово, тривалість даної тенденції зміни триває 3-5 днів. Рис 3.21 В зимові місяці інтенсивність сонячних теплонадходжень в більшій кількості днів має незмінний рівень, в незначній кількості присутні дні з разовим високим рівнем сонячних

теплонадходжень. Рис. 3.21 Даний характер зміни сонячних теплонадходжень відмінний від характеру зміни зовнішньої температури.

Для зимових місяців середня швидкість вітру 2,7 м/с, західний напрямок. Напрямок та швидкість вітру за IWEC співпадає з діючою в Україні кліматологією. [94, 153] Напрямок швидкості вітру в значній кількості днів є незмінним та типовим для даної місцевості, в меншій кількості присутні змінні напрямки вітру, які тривають від кількох годин до кількох днів. В залежності від орієнтації приміщень, напрям вітру по різному впливатиме на величину кратності повітрообміну(навітряна, підвітряна сторона).

Як згадувалось вище, в роботі обрано чотири кінцеві фактори впливу: три фактори зовнішнього впливу (зовнішня температура, сонячні теплонадходження в зону кімнати, кратність повітрообміну) та фактор внутрішнього впливу (рівень опалення) [123].

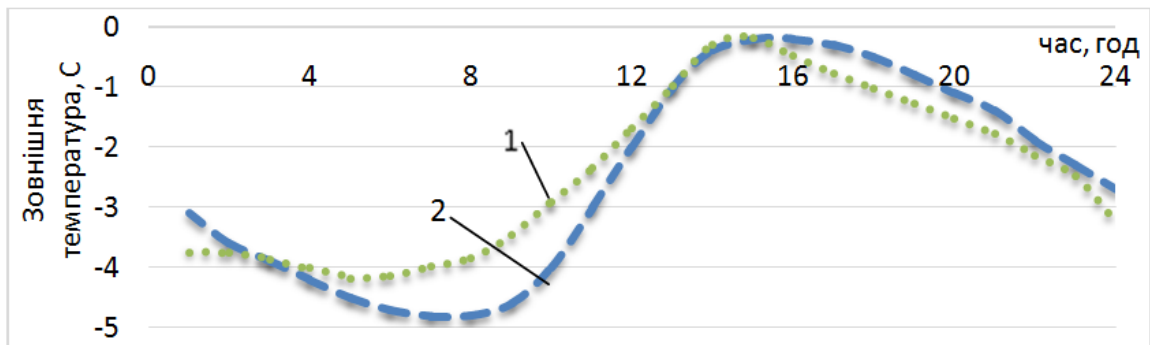
Завданням імітаційного моделювання було визначення зміни температури повітря в приміщенні при збуренні кожного з обраних факторів та їх сукупності в заданому діапазоні. В імітаційній моделі розрахунок всіх внутрішніх параметрів проводився з десяти хвилинним кроком. В умовах стабілізації добової зміни температурних умов в приміщенні задавали зміну одного з вхідних параметрів і визначали його вплив на внутрішню температуру.

Для визначення вагомості факторів по чергово досліджуємо кожен з них. За результатами моделювання приміщення з розглянутими теплофізичними властивостями огорожувальних конструкцій при старті з стаціонарного розподілу виходить на усталений режим в середньому протягом 20 днів за умови незмінних добових коливань зовнішніх та внутрішніх параметрів.

Загалом для зимового періоду м.Києва максимальні міждобові зміни зовнішньої температури становлять 6...10 °С. В середньому між добові зміни температури становлять 3-4°С [82]. Амплітуди добових коливань зовнішньої температури в м. Києві для грудня лежать в діапазоні $t_{36}^{дoбoвe} = [0 \dots - 4]$.

В якості базових умов обрані погодні умови для типового дня грудневого місяця відповідно до кліматичних даних з типового року IWEC для міста Києва.

Температурні умови обраного дня близькі до нормативних даних [94] (рис. 3.13). Добові коливання амплітуди зовнішньої температури в м. Києві для грудня лежать в діапазоні $t_{36}^{додове} = [0 \dots -5]$ [94], дана зміна обрана за базову. Тому при дослідженні зміни температури повітря в приміщенні приймалося, збурення добових коливань зовнішньої температури відповідали зміні середньодобової температури в діапазоні $\Delta t_{36} = [-3 \dots 3]$. Амплітуда коливань залишалась як базисному дні. [82]



1 – доба з IWEC файлу[82]; 2 – типовий день з [94]

Рис. 3.13 – Добова зміна температури зовнішнього повітря для грудневого типового дня [123]

Амплітуда сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню 115 Вт/м^2 (типовий похмурий день для грудня) [82]. Відповідно до [94] рівень середньодобової сонячної радіації на горизонтальну поверхню для грудня становить 22 Вт/м^2 . Прийняті для базових умов значення дифузної та прямої нормальної сонячної радіації забезпечували величину зміни сонячних теплонадходжень в приміщення при орієнтації зовнішніх огорожень на південну та північну сторону наведеної на рівні $0 \dots 600 \text{ Вт}$ (рис. 3.15). Збурення сонячних теплонадходжень, що надходять в зону кімнати (рис. 3.15) задавалися через зміну добових коливань прямої сонячної радіації що надходять на горизонтальну поверхню, залишаючи поведінку добової характеристики такою ж. Рівень добових коливань розсіяної сонячної радіації знаходиться в діапазоні $0 \dots 100 \text{ Вт/м}^2$ (diffuse) та не збурювався. [123]

Швидкість вітру становила $2,7 \text{ м/с}$ з переважним західним напрямом вітру [153]. Кратність повітрообміну для базового варіанту приймалася рівною 1 год^{-1} .

Рівень опалення для базових зовнішніх умов підбирався з врахуванням орієнтації кімнати (південна або північна) та становив відповідно 1300 і 1365 Вт, що становить, відповідно, 62 та 65% від проектного рівня 2100 Вт. Задані вхідні дані забезпечували значення середньої температури в приміщенні на рівні 18°C в режимі стабілізації.

Базові дані були введені в модифікований файл IWEC. Попередні розрахунки показали, що стабілізація коливань внутрішньої температури повітря досягалася на двадцятий день при незмінних середньодобових базових умовах. На основі модифікації IWEC файлу з погодними даними почергово змінювали вплив кожного з факторів. Збурення забезпечувалося зміною амплітуди характерного добового графіка для відповідного параметра.

Усереднені за добу дані збурення зовнішньої температури наведені на рис. 3.14а, збурення вносилось на початку доби. Враховуючи поведінку зміни сонячної радіації відповідно до погодних умов опалювального сезону, збурення Q_{sol} тривало одну добу, рис. 3.14б.

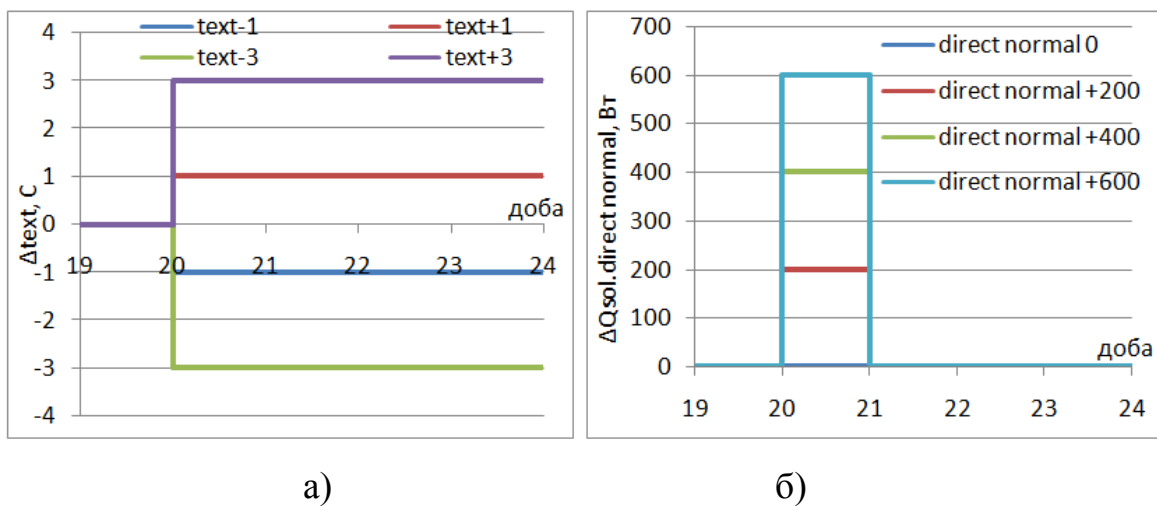
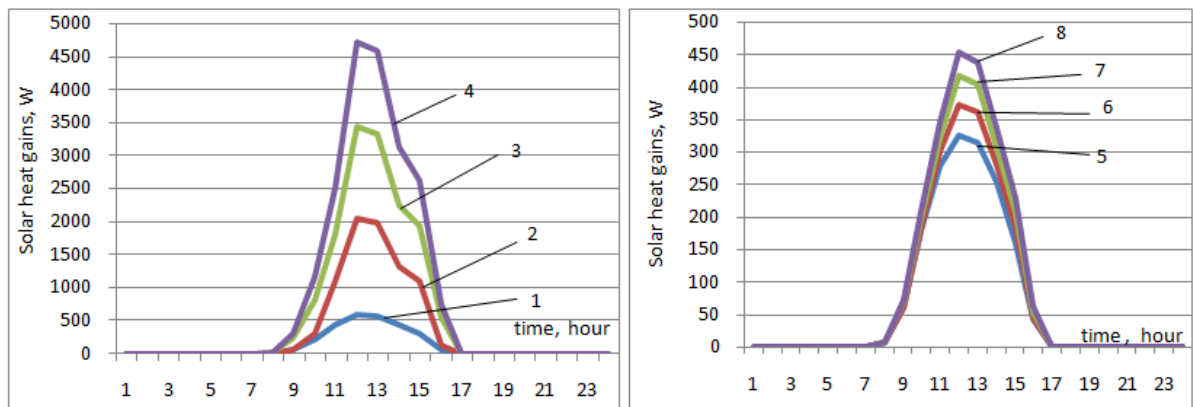


Рис. 3.14 – Характер середньодобових значень при збуренні: зовнішньої температури повітря (а) та сонячної радіації (б)

Збурення сонячних теплонадходжень (рис. 3.15) задавалися через зміну добових коливань прямої сонячної радіації. EnergyPlus враховує величину прямих

сонячних теплонадходжень через величину direct normal radiation. Максимальні добові коливання direct normal radiation збурювали в діапазоні 0...600 Вт/м² з кроком 200 Вт/м², залишаючи поведінку добової характеристики такою ж. Цей діапазон зміни відповідає умовам опалювального періоду та охоплює для умов України від не сонячних днів холодного періоду року до сонячних днів періоду міжсезоння. Рівень добових коливань розсіяної сонячної радіації знаходиться в діапазоні 0...100 Вт/м² (diffuse) та не збурювався. Збурення сонячної активності моделювали для тривалості одного дня (типова зміна для зимових місяців м. Києва) та трьох [123].



1 – середньодобові сонячні надходження 119 Вт (базовий), 2 – 344 Вт, 3 – 608 Вт, 4 – 827 Вт, 5– 67 Вт (базовий), 6 – 73 Вт, 7 – 81 Вт, 8 – 87 Вт

а)

б)

Рис. 3.15 – Сонячні теплонадходження в кімнату через вікно південної (а) і північної (б) сторони будівлі [123]

Для кратності повітрообміну та рівня опалення також обраний характерний тип збурень "сходінка" як і для зовнішньої температури повітря. Діапазон збурень зміни кратності повітрообміну в приміщенні розглядався нарівні 0,5...1,5год⁻¹. Діапазон цих значень обраний з врахуванням оцінки впливу різниці внутрішньої та зовнішньої температури, етажності будівлі та швидкості та напрямку вітру [123].

Збурення величини рівня опалення приймалися на рівні $-15...+15\%$ від проектного навантаження на систему опалення для базового дня [123].

Характерні довготривалі зміни внутрішніх та зовнішніх факторів у цьому наближенні визначаються як послідовне приєднання збурень, а температура внутрішнього повітря - як накладання результатів цих збурень.

Моделювались значення зміни обраних параметрів. Розрахунок в програмному середовищі EnergyPlus проводився з 10-ти хвилинним кроком.

3.3.2 Дослідження впливу зміни температури внутрішнього повітря під впливом різних факторів

Імітаційне моделювання проводилось для репрезентативних приміщень ВНЗ в м. Києві, що орієнтовані на Пн та Пд сторону та розташовані на 1-6 поверсі (геометричні та теплофізичні характеристики розглянутого об'єкту наведені в розділі 2.1).

Алгоритм схему проведення досліджень та створення багатофакторної регресійної моделі на базі імітаційного моделювання наведено на рис. 3.16 [171].

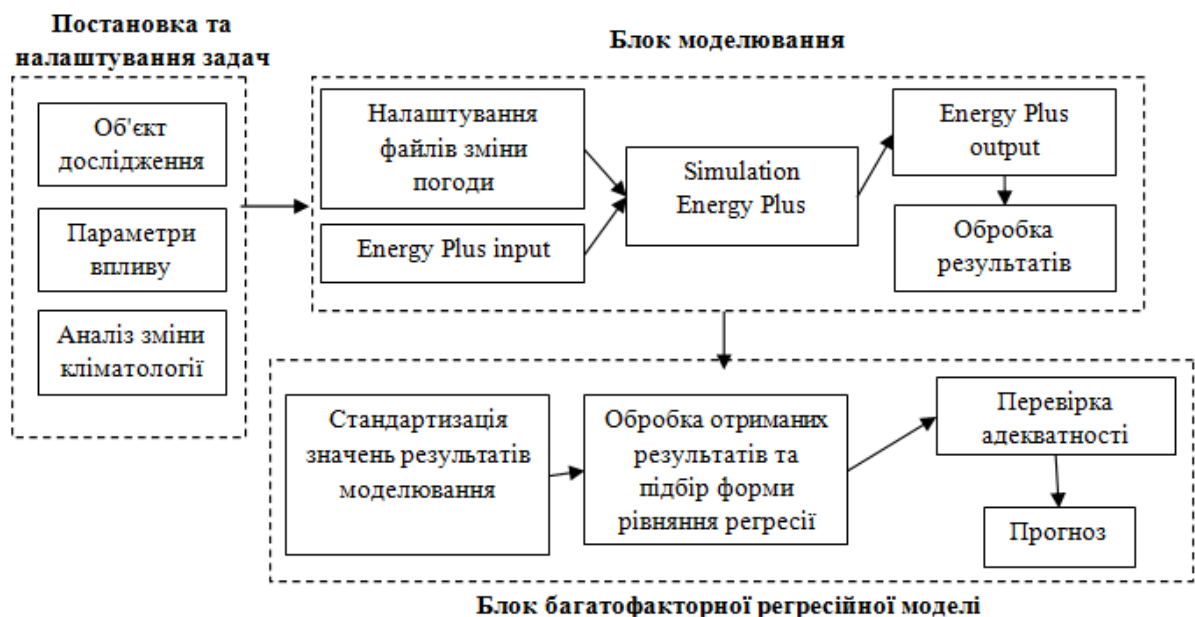


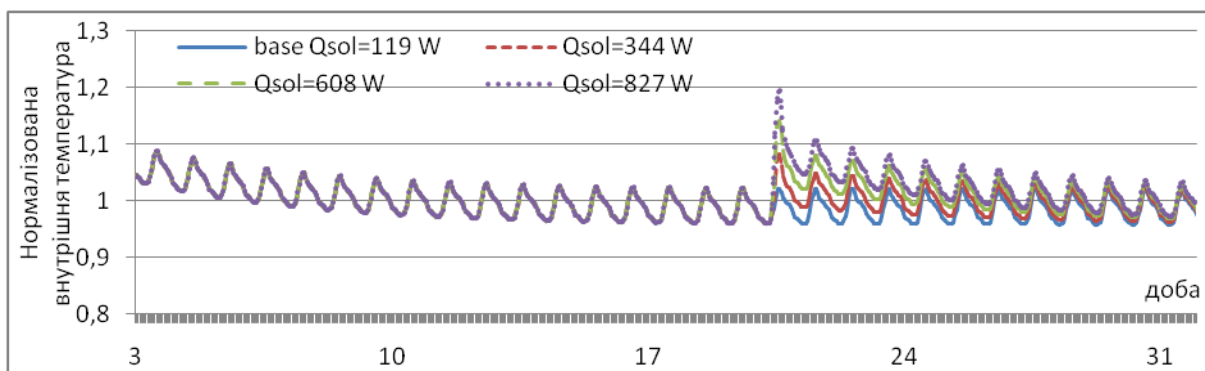
Рис. 3.16 – Схема аналізу та створення багатофакторної регресійної моделі та визначення нормалізованих коефіцієнтів рівняння регресії [171]

Для визначення впливовості факторів проводиться параметричний аналіз та встановлюється діапазон зміни кожного з них. На базі імітаційної моделі будівлі, що розглядається проводиться ряд моделювань кожного з обраних факторів в заданому діапазоні зміни величин. За результатами моделювань обирався вид регресійної залежності та величина тривалості впливу збурення.

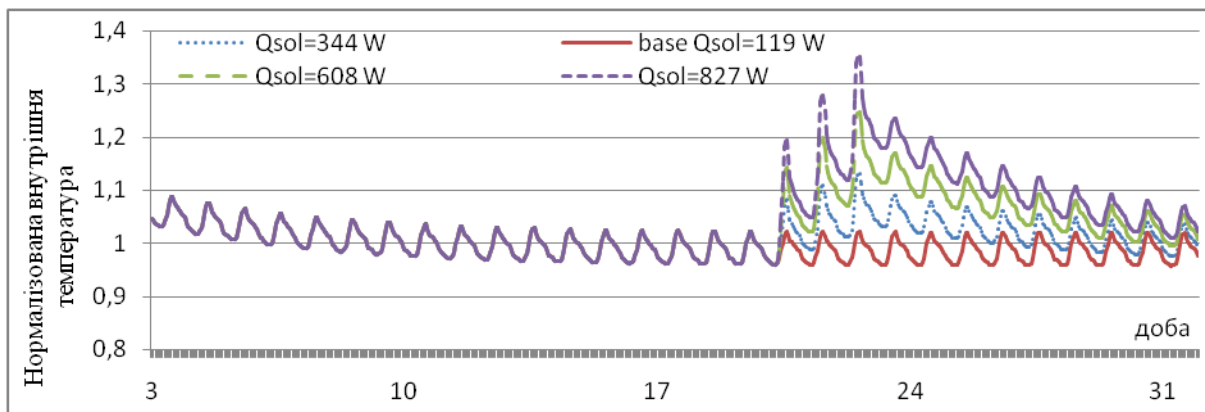
Приміщення з розглянутими теплофізичними властивостями огорожувальних конструкцій виходить на стаціонарний режим в середньому протягом 20 днів за умови незмінних зовнішніх та внутрішніх параметрів (рис. 3.17-3.19). Тому на 20 день вносимо збурення та розглядаємо поведінку зміни внутрішньої температури повітря. За сукупним впливом зовнішніх факторів на внутрішню температуру повітря складно визначити вагомість/впливовість кожного з обраних факторів, а також передбачити поведінку будівлі як системи при інших комбінаціях збурень. Для визначення вагомості факторів по чергово досліджуємо кожен з них.

При одноденному та триденному збуренні сонячної радіації зміна добових коливань внутрішньої температури показана для південної орієнтації зовнішнього огороження на рис.3.17. При цьому добова максимальна температура повітря збільшилася на 2-6°C в залежності від рівня збурення. Для приміщення орієнтованого на північну сторону добові коливання внутрішньої температури повітря майже не змінилися. Зростання внутрішньої температури повітря пов'язане з акумуляцією теплоти в непрозорих елементах конструкцій. Тривалість ефекту одноденного збурення розповсюджується на 5-6 діб, при триденному становить біля 10 діб.

Нормалізацію середньодобових значень для побудови рівнянь регресії проводили в діапазоні зміни відповідно до діапазону, в якому проведено моделювання: внутрішня температура $t_{int} = [12...24]^{\circ}\text{C}$, зовнішня температура $t_{out} = [-10...3]^{\circ}\text{C}$, кратність повітрообміну $n = [0..1,5]$ год⁻¹, рівень опалення $Q = [1100...2000]$ Вт, середньодобові сонячні теплонадходження до кімнати $Q_{sol} = [0...1000]$ Вт (відповідають погодинним значенням при моделюванні наведеним на рис. 3.17).



а)



б)

Рис. 3.17 – Добові коливання температури внутрішнього повітря приміщення орієнтованого на південь при збуренні сонячних теплонадходжень тривалістю одна (а) та три доби (б) [123]

Враховуючи прийняті спрощення аналізу впливу збурення в термінах добових інтервалів отримані результати усереднювалися в межах доби. Отримані результати впливу збурень зовнішньої температури, кратності повітрообміну та рівня опалення представлені на рис. 3.18-3.19 для середньодобових значень внутрішньої температури повітря. На відміну від сонячної радіації маємо інший характер збурення, після збурення величина цих факторів не поверталася до базового рівня. Вплив збурення залежить від його величини і стабілізується до 10 діб.

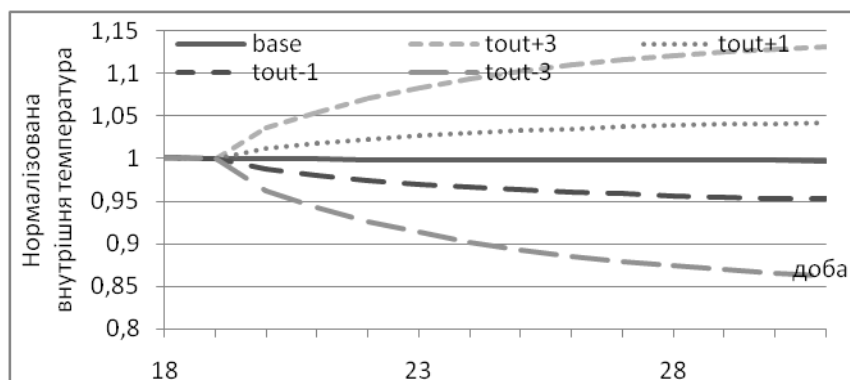


Рис. 3.18 – Середньодобова внутрішня температура повітря при різних збуреннях зовнішньої температури [123]

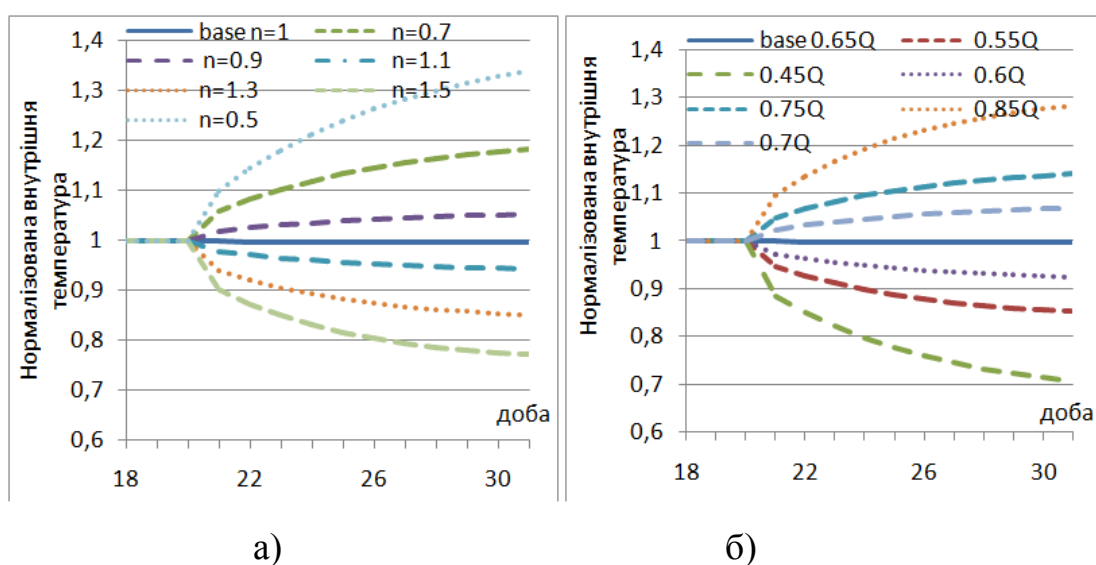


Рис. 3.19 – Середньодобова температура внутрішнього повітря для різних збурень кратності повітрообміну (а) та рівня опалення (б) [123]

Слід відзначити, що відносно базової лінії середньодобової температури повітря характеристики кривих внутрішньої температури при симетричних збуреннях кратності повітрообміну ведуть себе не симетрично.

3.4 Побудова регресійних моделей

На базі отриманих результатів імітаційного моделювання, обраних факторів впливу для заданого діапазону зміни, в роботі розроблені багатфакторні

регресійні залежності для прогнозування внутрішньої температури повітря та рівня опалення.

3.4.1 Лінійна багатофакторна регресійна залежність для прогнозування внутрішньої температури повітря

Аналіз отриманих результатів показує, що для коректного визначення внутрішньої температури повітря потрібно враховувати передісторію збурення факторів.

Для побудови залежності внутрішньої температури від факторів впливу обрано багатофакторну лінійну регресію, що побудована на базі методу найменших квадратів. Нелінійність часового впливу враховано представленням залежності від зміни факторів для різних діб. Нормалізацію значень для рівнянь регресії проводили в діапазоні зміни: зовнішня температура $\Delta t_{\text{out}} = 13 \text{ }^\circ\text{C}$, внутрішня температура $\Delta t_{\text{int}} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, кратність повітрообміну $\Delta n = 1,5 \text{ год}^{-1}$, рівень опалення $\Delta Q = 900 \text{ Вт}$, сонячні теплонадходження до кімнати $\Delta Q_{\text{sol}} = 1000 \text{ Вт}$ [123].

На прикладі зміни зовнішньої температури приведено аналіз особливостей врахування кількості попередніх діб. Розглянуті варіанти від до 1 до 5 діб. Регресійна залежність побудована для різниці зовнішніх температур між сусідніми днями. Збільшення врахування кількості діб передісторії збільшує точність прогнозу, зі зменшенням кількості діб передісторії до однієї регресійна залежність більш суттєво відхиляється від кривої отриманої на базі імітаційного моделювання (1-2 $^\circ\text{C}$). Регресійна залежність, що враховує вплив зміни фактору за попередні три дні досить точно описує імітаційні дані. На рис. 3.19 наведено прогнозні значення внутрішньої температури повітря в залежності від збурень зовнішньої температури повітря, що враховує передісторію зміни зовнішньої температури за три дні. Результати перевірено на основі моделювання даних для грудня типового року. Дані регресійні залежності можуть використовуватись при прогнозі значень внутрішньої температури на декілька днів. На рис. 3.20 наведено

середньодобові прогнози значення внутрішньої температури повітря на три дні при зміні зовнішньої температури повітря.

В результаті аналізу урахування тривалості передісторії впливу для побудови регресійних залежностей обрано передісторію зміни факторів впливу за три дні та внутрішню температуру повітря за попередню добу.

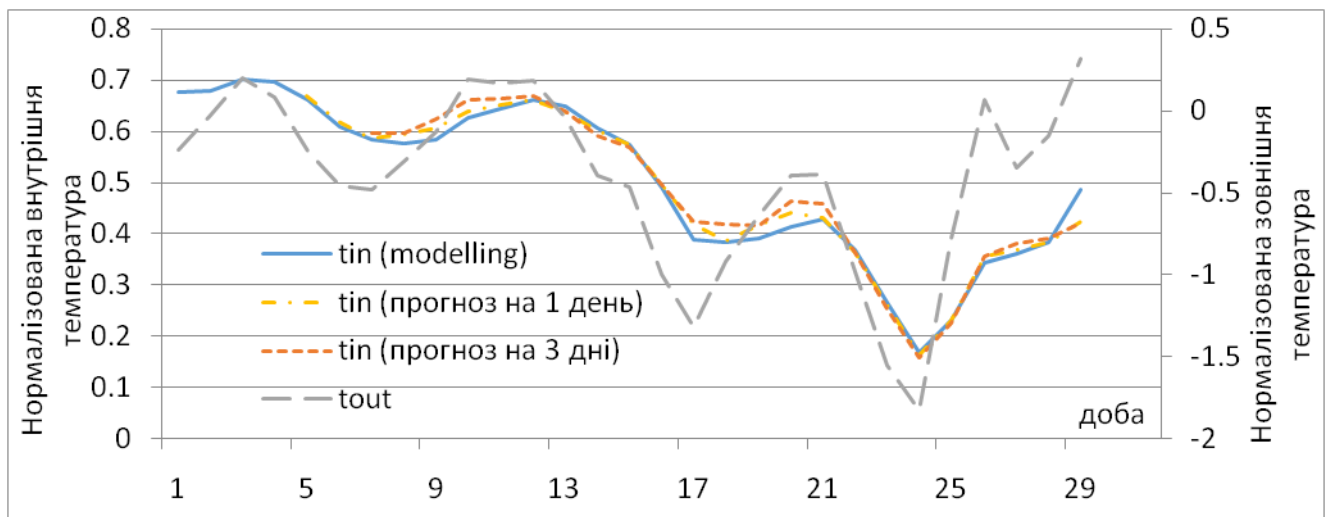


Рис. 3.20 – Прогнозування внутрішньої температури повітря в залежності від зовнішньої температури для грудня [123]

Отримані регресійної залежності наведені нижче [123]:

- від зовнішньої температури

$$\tilde{t}_{int,i} = -0,032 + 1,057\tilde{t}_{int,i-1} + 0,252(\tilde{t}_{out,i} - \tilde{t}_{out,i-1}) + 0,116(\tilde{t}_{out,i-1} - \tilde{t}_{out,i-2}) + 0,083(\tilde{t}_{out,i-2} - \tilde{t}_{out,i-3}), R^2_{norm} = 0,999, \quad (3.4)$$

- від сонячних теплонадходжень

$$\tilde{t}_{int,i} = -0,044 + 1,075\tilde{t}_{int,i-1} + 0,122(\tilde{Q}_{sol,i} - \tilde{Q}_{sol,i-1}) + 0,144(\tilde{Q}_{sol,i-1} - \tilde{Q}_{sol,i-2}) + 0,091(\tilde{Q}_{sol,i-2} - \tilde{Q}_{sol,i-3}), R^2_{norm} = 0,961, \quad (3.5)$$

- від кратності повітрообміну

$$\tilde{t}_{int,i} = -0,027 + 1,058\tilde{t}_{int,i-1} - 0,41(\tilde{n}_i - \tilde{n}_{i-1}) - 0,165(\tilde{n}_{i-1} - \tilde{n}_{i-2}) - 0,102(\tilde{n}_{i-2} - \tilde{n}_{i-3}), R^2_{norm} = 0,967, \quad (3.6)$$

- від рівня опалення

$$\tilde{t}_{int,i} = -0,056 + 1,106\tilde{t}_{int,i-1} + 0,341(\tilde{Q}_i - \tilde{Q}_{i-1}) + 0,085(\tilde{Q}_{i-1} - \tilde{Q}_{i-2}) + 0,049(\tilde{Q}_{i-2} - \tilde{Q}_{i-3}), R^2_{norm} = 0,999, \quad (3.7)$$

де i - порядковий номер доби,

\tilde{t}_{int} - середньодобова внутрішня температура повітря,

\tilde{t}_{out} - середньодобова зовнішня температура повітря,

\tilde{Q}_{sol} - сонячні теплонадходження до кімнати,

\tilde{Q} - рівень опалення,

\tilde{n} - кратність повітрообміну.

Загальна регресійна модель, що враховує вплив всіх вище перерахованих факторів має наступний вигляд [123]:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{int,i} = & -0,031 + 1,059\tilde{t}_{int,i-1} + 0,251(\tilde{t}_{out,i} - \tilde{t}_{out,i-1}) + \\ & + 0,116(\tilde{t}_{out,i-1} - \tilde{t}_{out,i-2}) + 0,083(\tilde{t}_{out,i-2} - \tilde{t}_{out,i-3}) - \\ & - 0,41(\tilde{n}_i - \tilde{n}_{i-1}) - 0,164(\tilde{n}_{i-1} - \tilde{n}_{i-2}) - 0,101(\tilde{n}_{i-2} - \tilde{n}_{i-3}) + \\ & + 0,119(\tilde{Q}_{sol,i} - \tilde{Q}_{sol,i-1}) + 0,142 + + 0,09(\tilde{Q}_{sol,i-2} - \tilde{Q}_{sol,i-3}) + \\ & + 0,341(\tilde{Q}_i - \tilde{Q}_{i-1}) + 0,102(\tilde{Q}_{i-1} - \tilde{Q}_{i-2}) + 0,071(\tilde{Q}_{sol,i-1} - \tilde{Q}_{sol,i-2}) + \\ & + 0,091(\tilde{Q}_{sol,i-2} - \tilde{Q}_{sol,i-3}), R_{норм}^2 = 0,994, \end{aligned} \quad (3.8)$$

Адекватність отриманих регресійних моделей перевірено та встановлено, що середня розбіжність значень моделювання з значеннями отриманими з рівняння регресії не перевищує 0,6 °С, а максимальна розбіжність результатів до 1,7°С, середньоквадратична похибка становить 0,013, середня апроксимаційна помилка $\bar{\varepsilon} = 0,45\%$, F-критерій $F = 4112$ [123].

На рис. 3.21 наведено прогнозовану внутрішню температуру повітря отриману на базі запропонованої регресійної моделі та внутрішню температуру повітря отриману з імітаційного моделювання типових кліматичних даних для грудня [123].

Результати імітаційного моделювання достатньо описуються кривою лінією отриманою на базі рівняння регресії. При прогнозі на три дні, результати мають більшу відмінність. Застосування нелінійних регресійних залежностей може збільшити точність розрахунків та зменшити число коефіцієнтів в рівнянні регресії (на відмінну від лінійної) [123].

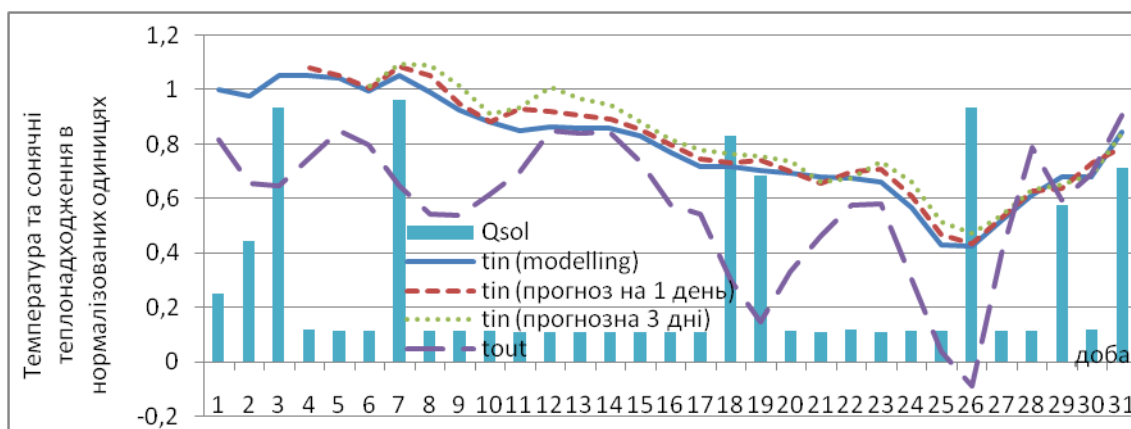


Рис. 3.21 – Прогнозне значення внутрішньої температури повітря для грудня [123]

3.4.2 Нелінійна багатофакторна регресійна залежність для прогнозування внутрішньої температури повітря

Регресійні нелінійні залежності досліджені мало через складність аналізу та мають більшу точність прогнозу.

Методологія

Методологія побудови регресійного рівняння, яке враховує передісторію зміни впливових факторів, побудована на визначенні та об'єднанні впливів від локальних збурень окремих факторів. На рис. 3.22 а наведено разове збурення аргументу X та поведінку ординати Y під його впливом (рис. 3.22 б) [171].

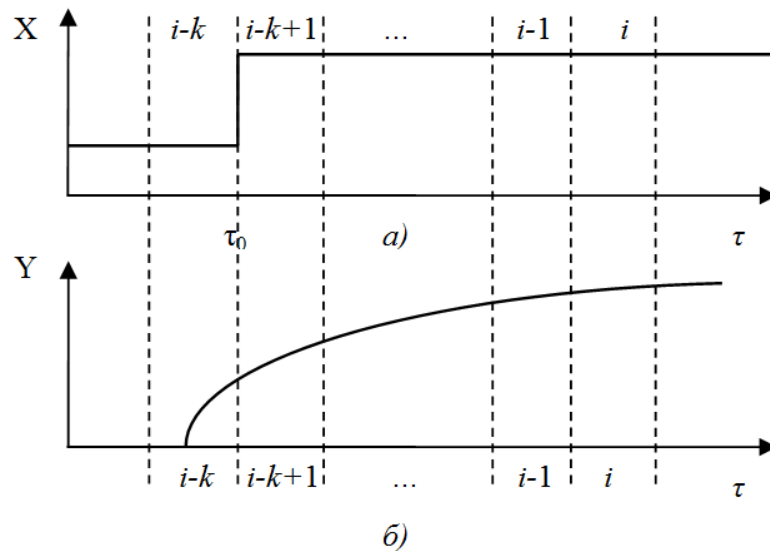


Рис. 3.22 – Графік збурення X (а) та поведінка графіку зміни Y (б) під впливом збурень [171]

Для опису інерції впливу у часі на функцію $Y = f(X)$ зміни X , яка має місце в околицях $\tau = \tau_0$ використовуємо функцію [171]:

$$Y = Y_0 + A \frac{dX}{d\tau} f(\tau), \quad (3.9)$$

Якщо прийняти, що функція $f(\tau)$ має логарифмічний характер, тоді у сітковому вигляді $f(\tau) = \Delta\tau \ln(k)$, де $\tau = \Delta\tau k$, а $\Delta\tau$ – інтервал часу.

Прогнозована величина Y_i від збурення X в $(i-k)$ - інтервал часу визначається за формулою 3.10 [171]:

$$Y_i = Y_{i-k} + A(X_{i-k+1} - X_{i-k}) \ln(i - (i - k) + 1), \quad (3.10)$$

Запишемо аналогічне рівняння для $(i-1)$ інтервалу часу (формула 3):

$$Y_{i-1} = Y_{i-k} + A(X_{i-k+1} - X_{i-k}) \ln(i - 1 - (i - k) + 1), \quad (3.11)$$

Величину Y_i при збуренні аргументу X в $(i-k)$ - інтервал часу прогнозуємо через значення Y_{i-1} в попередній інтервал часу $(i-1)$:

$$Y_i = Y_{i-1} + A(X_{i-k+1} - X_{i-k}) \ln \frac{i - (i-k) + 1}{i-1 - (i-k) + 1}, \quad (3.12)$$

Коли характер залежності X від τ відповідає зміні X в межах часу від τ_0 до τ , інтегральний вплив зміни X на Y може визначатися функцією.

$$Y = Y_0 + \frac{A}{\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{dX}{dt} f(\tau - t) dt, \quad (3.13)$$

На основі функції (3.13) у сітковому вигляді запишемо рівняння (3.10-3.12) у вигляді (3.14-3.16) при наявності збурень на кожному дискретному інтервалі часу $1 \leq k \leq n$, де n - кількість інтервалів часу передісторії [171].

$$Y_i = Y_{i-k} + A \sum_{k=1}^n (X_{i-k+1} - X_{i-k}) \ln(i - (i - k) + 1), \quad (3.14)$$

$$Y_{i-1} = Y_{i-k} + A \sum_{k=2}^n (X_{i-k+1} - X_{i-k}) \ln(i - 1 - (i - k) + 1), \quad (3.15)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + A \left((X_i - X_{i-1}) \ln(i - (i - 1) + 1) + \sum_{i=1}^n (X_{i-k+1} - X_{i-k}) \ln \frac{i - (i - k) + 1}{i - 1 - (i - k) + 1} \right), \quad (3.16)$$

Коли $Y = f(X_1, \dots, X_i, \dots, X_m)$, m - кількість змінних впливу, зміна Y з урахуванням інерційності у часі розглядається як сума впливу X_i , а для побудови регресійної залежності потрібно визначити коефіцієнти A_i відповідно до конкретних характеристик моделі будівлі.

В якості функції Y при побудові регресійної моделі обрано температуру внутрішнього повітря. Це відповідає логіці побудови динамічних моделей [23], де ця температура виступає як залежний від зовнішніх збурень фізичний параметр моделі [171].

Нижче наведений аналіз впливу зміни зовнішньої температури на внутрішню температуру повітря. Аналогічний характер впливу на внутрішню температуру повітря має і кратність повітрообміну та зміна рівня опалення.

На рисунку 3.23 наведено залежність зміни середньодобових значень внутрішньої температури повітря в нормалізованих одиницях від логарифму натурального номеру доби після внесення різних збурень зовнішньої температури.

Ці дані показують, що характер зміни внутрішньої температури повітря у часі при збуренні зовнішньої температури є близьким до логарифмічного. Тому така залежність використана при побудові регресійної моделі. В розділі 3.4.1 розглянуто лінійну регресію, яка потребує визначення різних коефіцієнтів для врахування затухання впливу збурення при збільшенні відстані від доби спостереження до доби збурення. У логарифмічній регресійній моделі даний

коефіцієнт однаковий для кожної доби збурення, що зменшує кількість коефіцієнтів та підвищує точність рівняння регресії (рис.3.24).

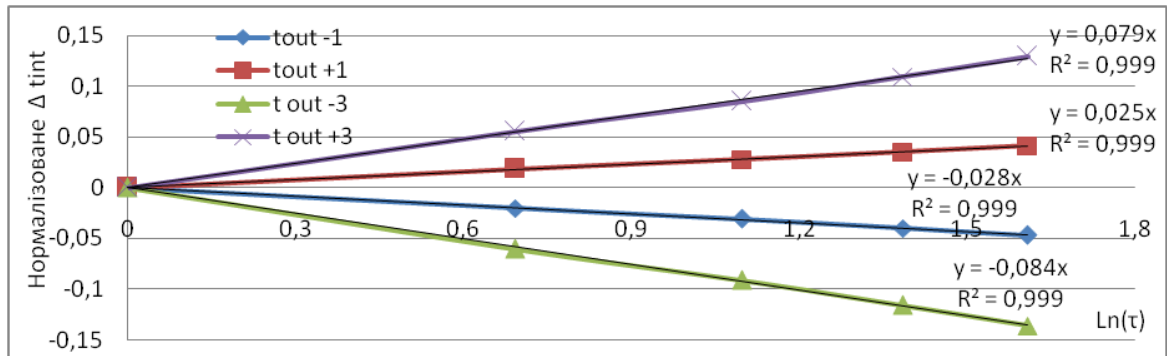


Рис. 3.23 – Нормалізована зміна внутрішньої температури повітря в логарифмічних координатах [171]

Результати обробки чисельних експериментів для всього діапазону розглянутих значень збурення середньодобових зовнішніх температур дозволили визначити значення єдиного сталого коефіцієнта $A_{\text{tout}}=0,356$, яке враховано в рівнянні регресії (рис. 3.24). [171]

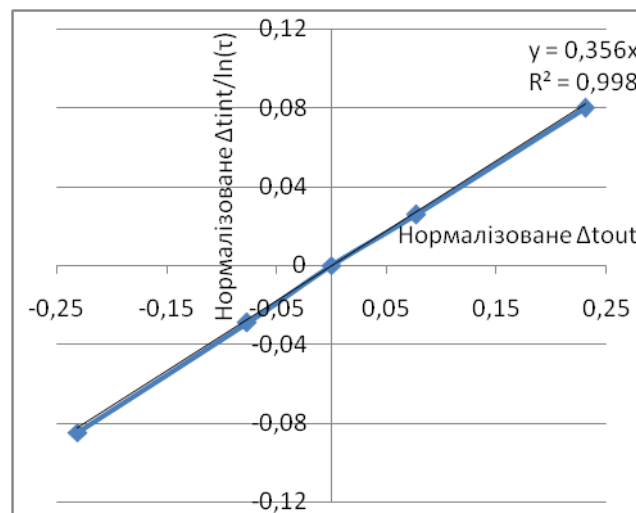


Рис. 3.24 – Залежність між відношенням зміни внутрішньої температури повітря в нормалізованих одиницях до логарифму натурального порядкового номеру доби збурення та нормалізованим значенням зміни зовнішньої температури [171]

Отже рівняння регресії для температури внутрішнього повітря для логарифмічної зміни в часі при лінійній залежності від зміни температури зовнішнього повітря матиме наступний вигляд [171]:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{int.i} = & \tilde{t}_{int.i-1} + A_{tout} \{(\tilde{t}_{out.i} - \tilde{t}_{out.i-1}) \ln(2) + \\ & + \sum_{i=1, j=i-k, k=2}^n (\tilde{t}_{out.j} - \tilde{t}_{out.j-1}) \ln \frac{i-j+1}{(i-1)-j+1}\}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

де i - порядковий номер доби для якої проводяться розрахунки,

j - порядковий номер доби передісторії,

k - номер доби передісторії,

\tilde{t}_{int} - середньодобова внутрішня температура повітря,

\tilde{t}_{out} - середньодобова зовнішня температура повітря.

На прикладі довільної зміни зовнішньої температури для січня приведено аналіз особливостей врахування кількості попередніх днів передісторії впливу, рис. 3.25. Розглянуті варіанти від до 1 до 5 днів. В регресію закладались нормалізована різниці зовнішніх температур між сусідніми днями [171].

При врахуванні в регресійній моделі передісторії попередніх п'яти днів, регресійна модель найбільш точно описує значення отримані на базі імітаційного моделювання. Середня розбіжність отриманих результатів моделювання в програмному середовищі E+ та розраховані за рівнянням регресії $0,1$ °C, а максимальне значення розбіжності отриманих результатів не перевищує $0,5$ °C по модулю. Зі зменшенням кількості днів передісторії до однієї регресійна залежність більш суттєво відхиляється від кривої отриманої на базі імітаційного моделювання (до $1-2$ °C) [171].

Аналогічно визначено сталі коефіцієнти для збурення рівня опалення та кратності повітрообміну, що відповідно становлять $A_Q=0,418$ та $A_n=-0,541$. Знак "-" при коефіцієнті A_n пов'язаний з негативним впливом зміни величини кратності повітрообміну на рівень температури в приміщенні [171].

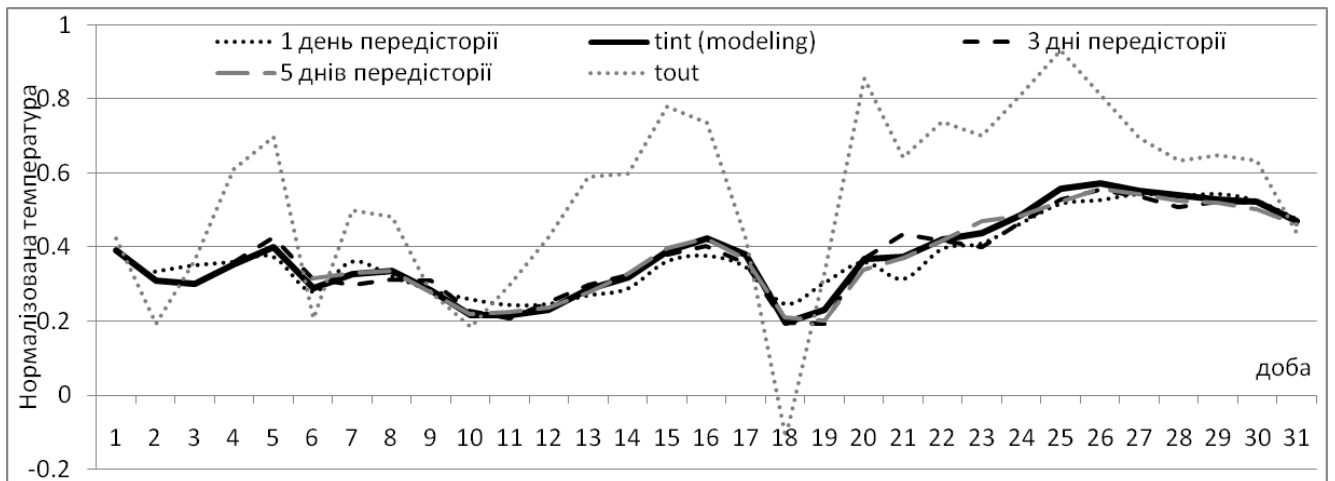


Рис. 3.25 – Прогнозування внутрішньої температури повітря в залежності від зовнішньої температури в нормалізованих одиницях при урахуванні різної глибини передісторії впливу [171]

Збурення сонячної активності моделювали для тривалості одного дня. Як раніше згадувалось, поведінка сонячної активності суттєво відрізняється від інших вище розглянутих параметрів та моделювались як одноденні пікові збурення сонячної активності, що характерні для зимових місяців розглянутого регіону. На рисунку 3.15 наведена добова погодинна зміна сонячних теплонадходень в зону кімнати для південної та північної сторони, а також показано відповідні середньодобові сонячні надходження, що знаходяться в діапазоні 67-820 Вт та відповідають кривим 1-8 [171].

На рис. 3.26 наведено залежність середньодобової внутрішньої температури повітря від номеру доби для різного рівня сонячних теплонадходжень та орієнтацій. Для північної сторони сонячні теплонадходження майже не залежать від збурень прямої сонячної радіації [171].

З рис. 3.26 слідує, що при одноденному збуренні сонячної активності поведінку внутрішньої температури повітря слід розбивати на аналіз впливу в перші три дні та послідувачі. Проведемо аналогічний аналіз результатів моделювання та визначимо коефіцієнти, що описують даний характер поведінки. На рис. 3.27 наведено лінійні залежності для визначення сталих коефіцієнтів [171].

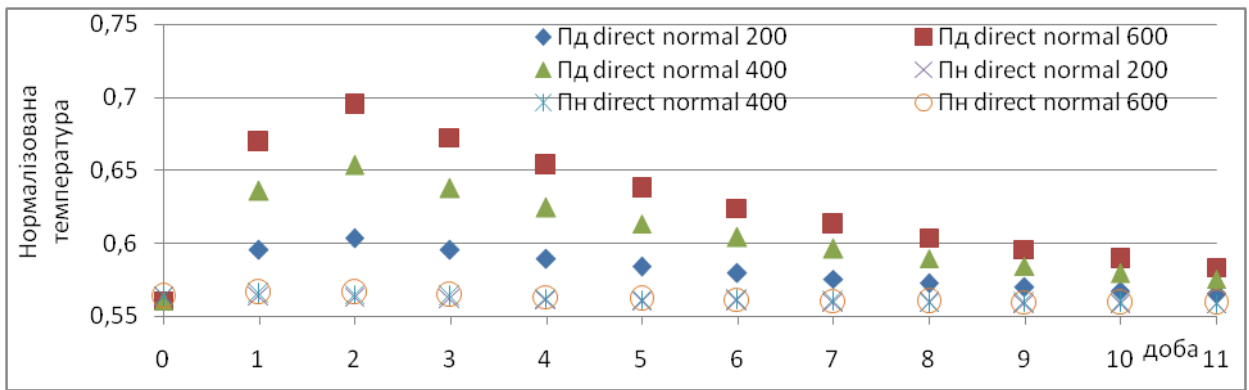


Рис. 3.26 – Середньодобова зміна внутрішньої температури повітря в нормалізованих одиницях при різному рівні сонячних надходжень для північної та південної орієнтації [171]

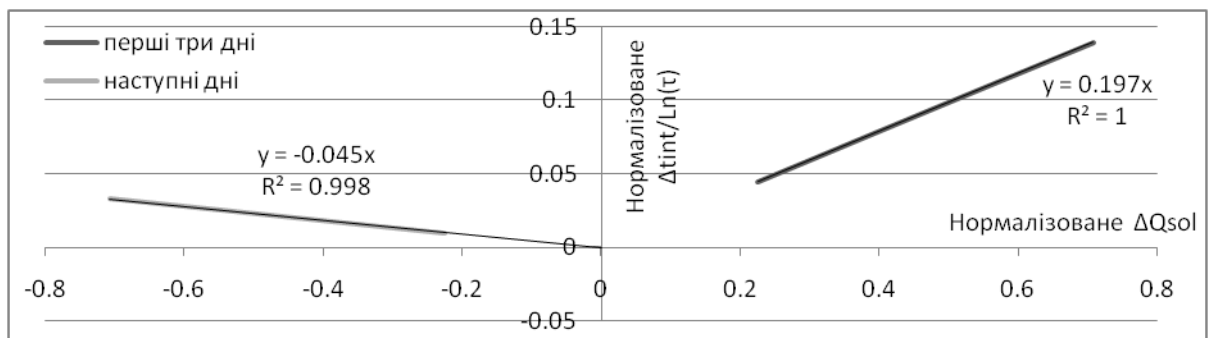


Рис. 3.27 – Залежність між відношенням зміни внутрішньої температури повітря в нормалізованих одиницях до логарифму натурального порядкового номеру доби збурення в залежності та нормалізованим значенням зміни сонячних теплонадходжень [171]

Як видно з отриманих результатів, що поведінка зміни внутрішньої температури при збуренні сонячних теплонадходжень в зону кімнати, описується логарифмічною залежністю. Для перших трьох днів сталий коефіцієнт постійний та додатній ($A_{Q_{sol1}}=0,197$), тобто при зміні сонячних теплонадходжень тривалістю один день зростання внутрішньої температури триває до трьох днів, для наступних днів внутрішня температура зменшується, що пояснює знаком "-" при коефіцієнті $A_{Q_{sol2}}=-0,045$. От же рівняння регресії зміни внутрішньої температури в залежності від сонячних теплонадходжень набуває вигляд [171]:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{int.i} = & \tilde{t}_{int.i-1} + A_{Qsol1} \{ (\tilde{Q}_{sol.i} - \tilde{Q}_{sol.i-1}) \ln 2 + (\tilde{Q}_{sol.i-1} - \tilde{Q}_{sol.i-2}) \ln \frac{i}{i-1} \} + \\ & + A_{Qsol2} \sum_{j=i-k, k=3}^n (\tilde{Q}_{sol.j} - \tilde{Q}_{sol.j-1}) \ln \frac{i-j+1}{(i-1)-j+1}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

де \tilde{Q}_{sol} - середньодобові нормалізовані сонячні теплонадходження до кімнати.

Побудова узагальненої регресійної моделі. Отримані сталі коефіцієнти та рівняння регресії (3.9-3.10) були використані при побудові узагальненої багатofакторної нелінійної регресії, яка має наступний вигляд [171]:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{int.i} = & \tilde{t}_{int.i-1} + A_{tout} \{ (\tilde{t}_{out.i} - \tilde{t}_{out.i-1}) \ln 2 + \sum_{j=i-k, k=2}^n (\tilde{t}_{out.j} - \tilde{t}_{out.j-1}) \ln \frac{i-j+1}{(i-1)-j+1} \} + \\ & + A_Q \{ (\tilde{Q}_i - \tilde{Q}_{i-1}) \ln 2 + \sum_{j=i-k, k=2}^n (\tilde{Q}_j - \tilde{Q}_{j-1}) \ln \frac{i-j+1}{(i-1)-j+1} \} + A_n \{ (\tilde{n}_i - \tilde{n}_{i-1}) \ln 2 + \\ & + \sum_{j=i-k, k=2}^n (\tilde{n}_j - \tilde{n}_{j-1}) \ln \frac{i-j+1}{(i-1)-j+1} \} + A_{Qsol1} \{ (\tilde{Q}_{sol.i} - \tilde{Q}_{sol.i-1}) \ln 2 + (\tilde{Q}_{sol.i-1} - \tilde{Q}_{sol.i-2}) \ln \frac{i}{i-1} \} + \\ & + A_{Qsol2} \sum_{j=i-k, k=3}^n (\tilde{Q}_{sol.j} - \tilde{Q}_{sol.j-1}) \ln \frac{i-j+1}{(i-1)-j+1} = \tilde{t}_{int.i-1} + A_{tout} f_1(\tilde{t}_{out}) + A_Q (\tilde{Q}_i - \tilde{Q}_{i-1}) \ln 2 + \\ & + A_Q f_2(\tilde{Q}) + A_n f_3(\tilde{n}) + A_{Qsol1} \{ (\tilde{Q}_{sol.i} - \tilde{Q}_{sol.i-1}) \ln 2 + (\tilde{Q}_{sol.i-1} - \tilde{Q}_{sol.i-2}) \ln \frac{i}{i-1} \} + \\ & + A_{Qsol2} f_4(\tilde{Q}_{sol}), \end{aligned} \quad (3.19)$$

де \tilde{Q} - рівень опалення,

\tilde{n} - кратність повітрообміну,

f - функціональні комплекси розглянутих факторів з урахуванням мінливості передісторії впливу.

Для розглянутої будівлі, що характерна для масової забудови 70-х років України, значення сталих коефіцієнтів наведені в табл. 3.3. Для іншої будівлі загальний вигляд регресійної моделі та підходи аналізу по визначенню сталих коефіцієнтів залишаються такими ж.

Таблиця 3.3 - Значення сталих коефіцієнтів рівняння регресії

A_{tout}	A_Q	A_n	A_{Qsol1}	A_{Qsol2}
0,356	0,418	-0,541	0,197	-0,045

Адекватність отриманої регресійної моделі оцінюється скорегованим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,981$) та критерієм Фішера ($F = 1324,3$), що вказує на високу точність отриманої багатофакторної нелінійної регресії [171].

Отриману регресійну модель перевірено для довільних збурень типового січневого місяця для міста Київ за даними IWEC. Моделювання для перевірки проводилось на базі створеної імітаційної моделі в EnergyPlus. На рис. 3.28 наведено прогнозне середньодобове значення внутрішньої температури повітря отримане на базі запропонованої регресійної моделі в залежності від зовнішньої температури та сонячних теплонадходжень в зону кімнати в нормалізованих одиницях та нормалізовану середньодобову внутрішню температуру повітря отриману з імітаційного моделювання для січневих кліматичних значень типового року.

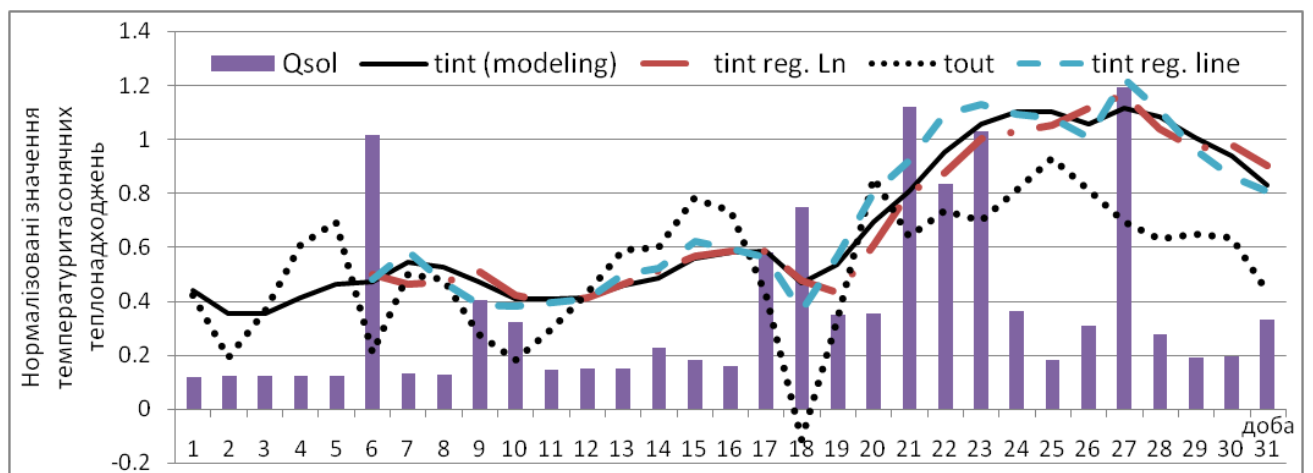


Рис. 3.28 – Прогнозне значення внутрішньої температури повітря в залежності від зовнішньої температури та сонячних теплонадходжень в зону кімнати в нормалізованих одиницях для січневих даних IWEC файлу [171]

Для січневих кліматичних даних файлу IWEC скоригований коефіцієнт детермінації становить $R^2 = 0,966$. Середнє квадратичне відхилення отриманих значень для нелінійної багатофакторної регресії складає 0,006. Середнє арифметичне відхилення внутрішньої температури повітря складає $0,4^{\circ}\text{C}$ з отриманим на базі імітаційного, а максимальна розбіжність результатів до 1°C . При використанні лінійної багатофакторної моделі, середнє значення відхилення

складає $0,6^{\circ}\text{C}$, а максимальне $1,7^{\circ}\text{C}$ в порівнянні з імітаційним моделюванням. На рисунку 3.29 наведено порівняння змодельованої (з програмному продукті EnergyPlus) та прогнозованої (за рівнянням регресії) середньодобовій температурі повітря [171].

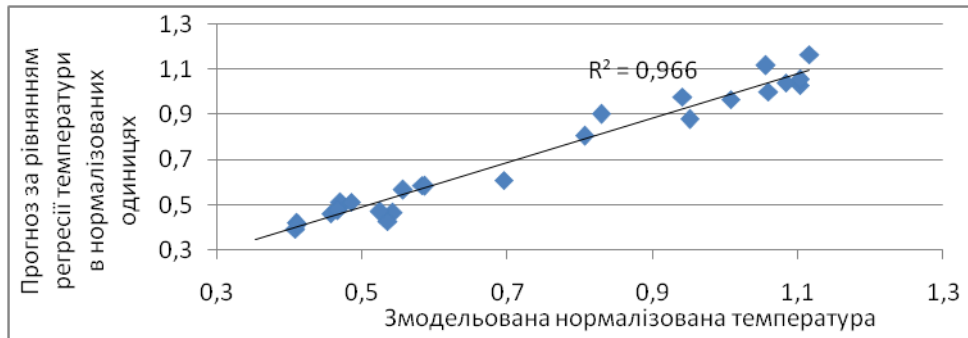


Рис. 3.29 – Порівняння середньодобової температури внутрішнього повітря прогнозованої за рівнянням регресії та змодельоване на основі імітаційної моделі для січня з файлу IWEC [171]

3.4.3 Нелінійна багатофакторна регресійна залежність для прогнозування рівня опалення

При якісному регулювання рівня опалення, для умов функціонування будівель України, регресійні залежності повинні орієнтуватися на прогнозування рівня опалення, що більш типове для міжнародної практики [131, 33, 31, 38, 125]. Нелінійна багатофакторна регресійна модель для прогнозування внутрішньої температури повітря може бути трансформована та використана для прогнозування рівня опалення (формула 3.20) [171]:

$$\tilde{Q}_i = \tilde{Q}_{i-1} - \frac{1}{\ln 2} f_2(\tilde{Q}) + \frac{1}{A_Q \ln 2} (\tilde{t}_{int.i} - \tilde{t}_{int.i-1}) - \frac{A_{tout}}{A_Q \ln 2} f_1(\tilde{t}_{out}) - \frac{A_n}{A_Q \ln 2} f_3(\tilde{n}) -$$

$$A_{Qsol1} A_Q \ln 2 (Q_{sol.i} - Q_{sol.i-1} \ln 2 + (Q_{sol.i-1} - Q_{sol.i-2}) \ln_{i-1}) + A_{Qsol2} A_Q \ln 2$$

$$f_4(Q_{sol}) = Q_{i-1} - 1.44 f_2 Q + 3.45 (t_{int.i} - t_{int.i-1}) - 1.23 f_1 (t_{out}) + 1.87 f_3 n - 0.6$$

$$8 \left\{ (\tilde{Q}_{sol.i} - \tilde{Q}_{sol.i-1}) \ln 2 + (\tilde{Q}_{sol.i-1} - \tilde{Q}_{sol.i-2}) \ln_{i-1} \right\} + 0.16 f_4(\tilde{Q}_{sol}). \quad (3.20)$$

Перетворену регресійну модель перевірено для довільних збурень типового січневого місяця для міста Київ за даними IWEC з результатами моделювання в EnergyPlus. На рис. 3.30 наведено прогнозний середньодобовий рівень опалення отриманий на базі запропонованої регресійної моделі в залежності від зовнішньої температури та сонячних теплонадходжень в зону кімнати в нормалізованих одиницях та нормалізований середньодобовий рівень опалення з імітаційного моделювання для січневих кліматичних значень типового року [82] та внутрішньої температури повітря 18°C.

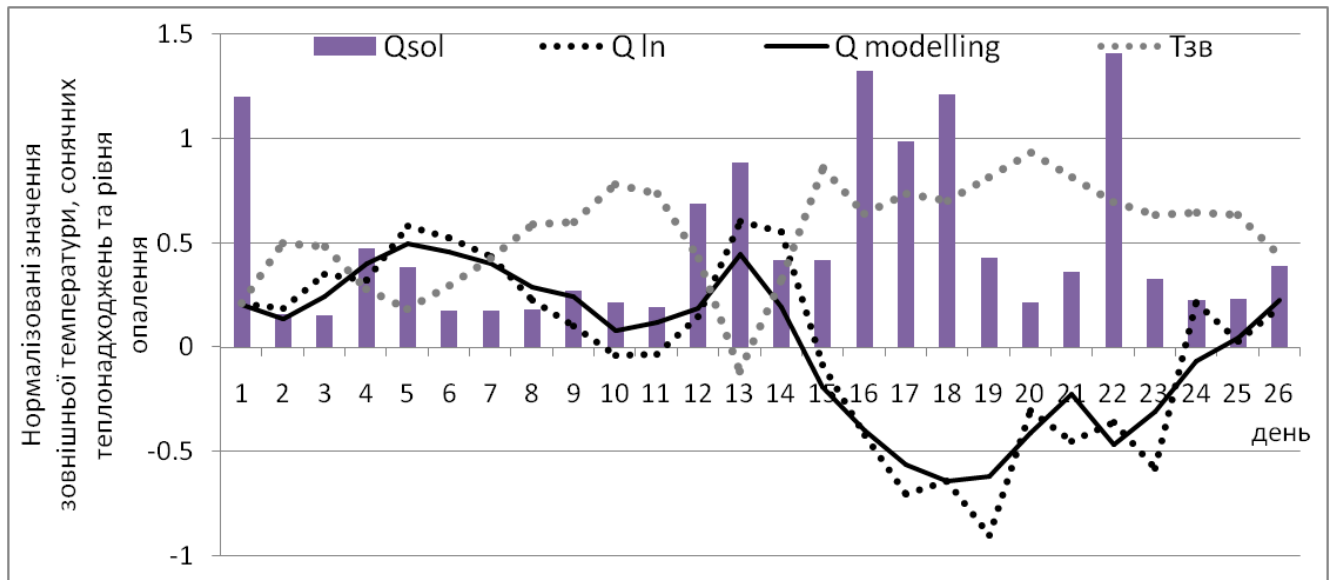


Рис. 3.30 – Прогнозне значення рівня опалення в залежності від зовнішньої температури та сонячних теплонадходжень в зону кімнати в нормалізованих одиницях для січневих даних IWEC файлу

Перевірка використання регресійного рівняння (3.20) для прогнозу рівня опалення при тих же умовах і дотриманні температури внутрішнього повітря на рівні 18°C забезпечує скоригований коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.88$ (рис. 3.31).

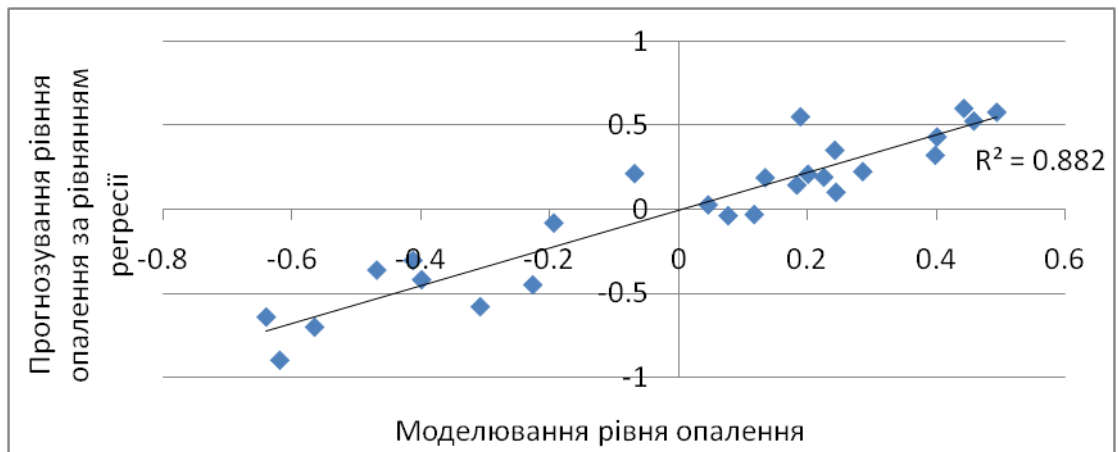


Рис. 3.31 – Порівняння середньодобового рівня опалення прогнозованого за рівнянням регресії та змодельоване на основі імітаційної моделі для даних січня з файлу IWEC

Висновки до розділу

1. На відміну від експериментальних методів, розрахункові методи дозволяють не лише в комплексі оцінити ряд впливових факторів, але й оцінити окремо їх вплив на значення потреби в опаленні. В роботі порівняно п'ять методів розрахунку від укрупнених річних показників до деталізованих погодинних методів розрахунку. Стаціонарні методи розрахунку значно збільшують річний показник потреби в опаленні та не дозволяють проводити аналіз в добовому розрізі. Розрахунок за національним методом має найбільшу відмінність з нестационарними методами розрахунку. Розрахована питома енергопотреба за укрупненими показниками (КТМ-204) дає розбіжність біля 40%, за міжгалузевим нормами 60%, деталізований метод ГД за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 має найнижче значення та розбіжність становить біля 5% на Пд, 10% - на Пн, за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 - 12% для півночі, 28% - для півдня. Динамічні методи EnergyPlus та 5R1C дають майже однакове значення потреби в опаленні відмінність методів до 7% для всіх орієнтацій.

Модель на базі стандартів 5R1C легко адаптивна до нових вихідних параметрів (геометричні розміри, теплотехнічні характеристики огорожень,

кліматичні дані) на відміну від програмного продукту EnergyPlus. Програмний продукт E+ дозволяє аналізувати більший спектр параметрів: розглядати окремо акумуляцію внутрішніх і зовнішніх стін, враховувати перетоки між зонами, інерційність системи опалення. E+ використовує кліматичні дані типового року, тому при моделюванні поточних ситуацій файл IWEC повинен бути адаптований до фактичних кліматичних умов, що надає додаткові труднощі при реалізації на базі представленої інформації на метеосайтах. Динамічні методи розрахунку дозволяють проводити погодинний, добовий аналіз енергопотреб в опаленні та можуть бути використані при прогнозуванні рівня опалення та/або в режимі переривчастого опалення.

2. В роботі проведено аналіз погодних кліматичні даних з будівельної кліматології та типового року IWEC файлу. Встановлено величину та тривалість зміни початкових кліматичних факторів. Розроблена математична модель на базі програмного продукту EnergyPlus для аналізу зміни у часі факторів впливу на тепловий стан будівлі. Імітаційна модель та погодні умови IWEC були пристосовані для аналізу впливу окремих факторів або їх сукупності на внутрішню температуру повітря в часі. На базі результатів імітаційного моделювання було проведено аналіз та обрано структуру лінійної та нелінійної багатофакторної регресійних залежностей, що враховує впливу передісторії зміни факторів на внутрішню температуру повітря. В роботі обрано чотири основні кінцеві фактори впливу: рівень опалення, сонячні теплонадходження в зону кімнати, кратність повітрообміну, зовнішня температура повітря. Адекватність отриманих регресійних моделей перевірено та встановлено, що середня розбіжність значень моделювання зі значеннями отриманими з рівняння регресії не перевищує $0,4^{\circ}\text{C}$ для нелінійної та $0,6^{\circ}\text{C}$ - для лінійної, а середньоквадратична похибка становить $0,006$ для нелінійної та $0,013$ - для лінійної.

Адекватність отриманої нелінійної регресійної моделі оцінюється скорегованим коефіцієнтом детермінації ($R^2=0,981$) та критерієм Фішера ($F=1324,3$), що вказує на високу точність отриманої багатофакторної нелінійної

регресії. Лінійна регресія має наступні аналогічні характеристики адекватності $R^2 = 0,994$ та критерієм Фішера $F = 4112,1$.

Коефіцієнти в рівнянні регресії показують вагомість впливу факторів. В розглянутому діапазоні зміни параметрів їх вплив на температуру внутрішнього повітря зменшується в ряду: кратність повітрообміну, рівень опалення, зовнішня температура, сонячні теплонадходження.

Нелінійна регресійна залежність може бути використана для прогнозування рівня опалення, оцінка адекватності моделі при тих же умовах і дотриманні температури внутрішнього повітря на рівні 18°C забезпечує скоригований коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.88$.

Створена регресійна модель дозволяє прогнозувати внутрішню температуру повітря в приміщеннях та спростити ряд перетворень, модифікацій IWEC файлу до фактичних кліматичних даних з метеостанцій для подальших розрахунків в програмному середовищі EnergyPlus. Створення аналогічних регресійних залежностей для конкретних будівель дозволить уникнути складних щоденних розрахунків та скоротить час прийняття рішень пов'язаних з регулюванням рівня опалення.

РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

В розділі 4 розглянуто моделювання переривчастих режимів опалення будівлі ВНЗ розташованої в м. Києві. Встановлено економію від провадження регулювання та особливості функціонування будівлі як енергетичної системи з переривчастим опаленням. Для цього ж об'єкту проведено експериментально-розрахункове визначення інтегральних та розосереджених характеристик теплового та енергетичного стану будівлі.

Для групи громадських будівель проведено аналіз енергетичної ефективності та виходячи з особливостей розташування та функціонування запропоновані підходи до енергетичної сертифікації та побудови шкал.

Для навчального корпусу СумДУ розроблену ряд динамічних моделей для оцінки теплового стану та прогнозування рівня опалення для постійних та переривчастих режимів.

4.1 Моделювання теплового стану енергетичної системи будівлі при переривчастому опаленні

Регулювання температури приміщень являється найбільш маловитратним заходом підвищення енергоефективності будівель, але широке застосування даного напрямку має ряд проблем. В основі переривчастого опалення гродських будівель лежить зниження температури повітря в неробочі години та вихідні дні, потім у визначений момент система опалення вмикається або збільшує теплове навантаження для прогріву повітря до комфортної температури до моменту приходу людей в приміщення. Такі процеси в будівлі мають розглядатися як складні динамічні процеси тепломасообміну в умовах впливу великого числа фізичних і конструкційних параметрів, а також зовнішніх кліматичних факторів. В стаціонарному режимі потенціал економії вивчений детально [90, 713]. Велика

кількість робіт присвячена нестационарному режиму [173, 174], але в стандартах України не регламентовано допустимої величини пониження температури, що призводить до різних оцінок економії енергії. В європейському стандарті [13] розглянуто допустимі величини рівня опалення, що є обґрунтованим з точки зору технічної та економічної можливості реалізації даного заходу з енергозбереження.

Дослідження переривчастого опалення будівлі в роботі проведено на базі динамічної моделі теплового стану кімнати ВНЗ, розташованої в м. Києві створеної на базі програмного продукту EnergyPlus. Дана модель дозволила розглядати будівлю як складну енергетичну систему, тобто дозволяє відслідковувати температурні залежності від зміни кліматичних умов та конструкції приміщення, а також вплив зміни графіка рівня опалення на внутрішню температуру приміщення [174].

4.1.1 Зниження температури в неробочі години

Аналіз по середньодобовим значенням внутрішньої температури нівелює добові зміни внутрішньої температури особливо при використанні переривчастого опалення. За допомогою створеної моделі в EnergyPlus проаналізуємо більш детально поведінку добових коливань внутрішньої температури для різних графіків теплового навантаження.

Для дослідження переривчастого опалення моделювались теплові режими кімнати при різних значеннях рівня опалення у нічні години та розігріву перед початком робочого періоду. В розділі 2.1 наведені геометричні та теплофізичні параметри репрезентативного приміщення корпусу 22 КПП ім. Ігоря Сікорського.

Розглянуто випадок, коли система працює без регулювання, та починають вводити переривчасте опалення. Рівень опалення в неробочі години (20:00 – 6:00) понижували. На рис. 4.1 наведена температура внутрішнього повітря для різних рівнів опалення.

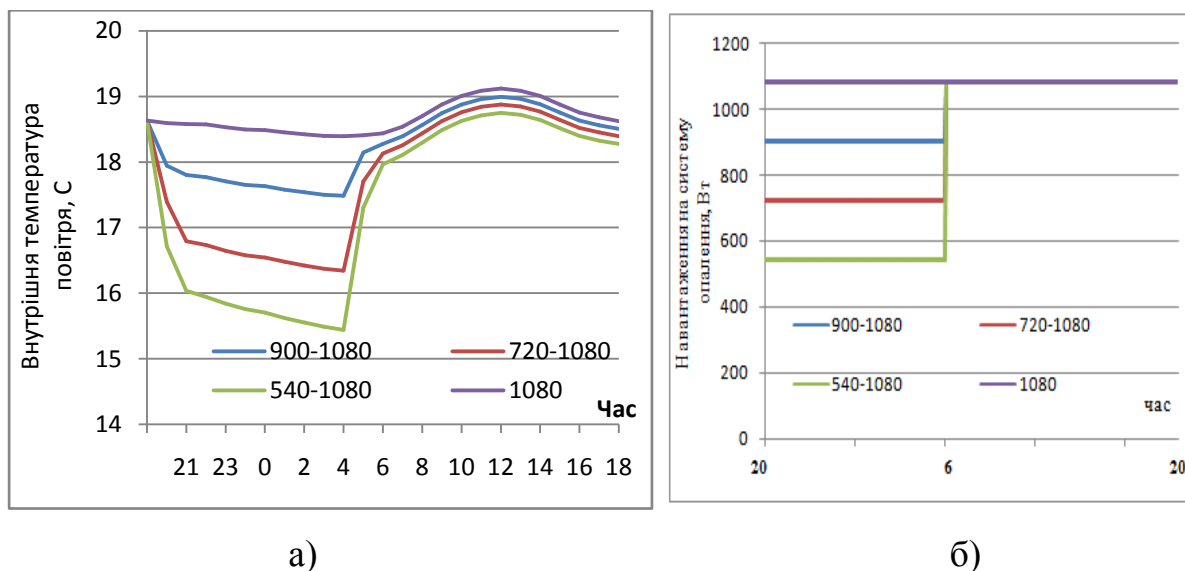


Рис. 4.1 – Добова зміна температури внутрішнього повітря на початку регулювання (а) для різних графіків зниження опалення (б) [174]

На рис. 4.2 наведено залежності внутрішньої температури від різної глибини провалу для точок, де температура стрімко змінює свої значення. Проаналізовано точки: початок підвищення рівень опалення після нічного провалу (6:00); після першої години підвищення рівня опалення, коли температура в приміщенні стрімко змінюється (7:00); коли внутрішня температура в робочі години не суттєво залежить від величини провалу (12:00) [174].

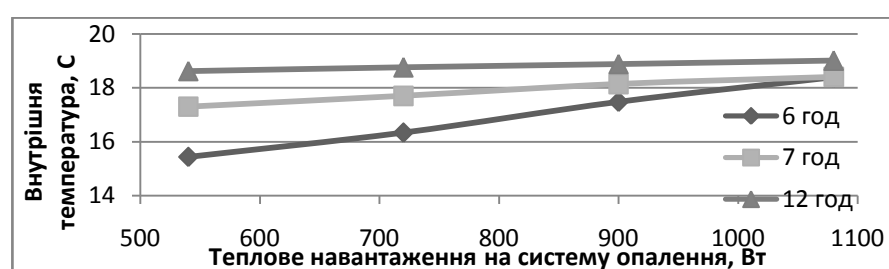


Рис. 4.2 – Залежність внутрішньої температури повітря від величини рівня пониженого опалення [174]

При потужності системи опалення 1080 Вт (без регулювання) температура в 7:00 та 6:00 співпадає, що пов'язане з відсутністю сонячних теплонадходжень та однаковим рівнем опалення. За відсутності регулювання та додаткових теплонадходжень з 20:00 до 7:00 внутрішня температура майже не змінюється, що

видно з рис. 4.1,а. Сонячні теплонадходження змінюють рівень температурив в приміщенні в 12:00 на 1°C.

Зі збільшенням глибини провалу в неробочі години, температура внутрішнього повітря в робочі години не встигає догрітися до рівня температури без регулювання. За умови однакової добової зміни внутрішніх та зовнішніх чинників, що впливають на рівень температури в приміщенні, тривале використання графіку зміни переривчастого опалення призведе до просідання графіка зміни та зменшення середнього значення внутрішньої температури повітря у робочі години [174].

Для розглянутого типу конструкцій та зовнішніх умов стабілізація графіка зміни внутрішньої температури повітря досягається на 6-8 день, для розглянутого діапазону пониження рівня опаленням в неробочі години, при цьому знижується внутрішньої температура повітря на 1,5–2 °С.

На рис. 4.3 наведено зміну середньодобової температури внутрішнього повітря після введення різних рівнів зниження опалення [174].

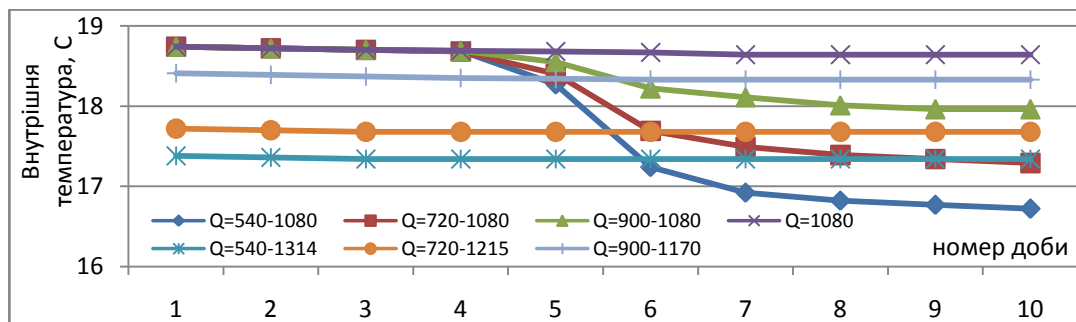


Рис. 4.3 – Середньодобова внутрішня температура повітря в робочі години для різних графіків навантаження на систему опалення[174]

На рис. 4.4 наведено добові коливання температури для випадків без регулювання (1080), коли регулювання рівня опалення почали вводити (540-1080) та при постійному регулюванні (540-1314) для графіка зі зниженням рівня опалення в неробочі години до 540 Вт. При постійному регулюванні підбір рівня опалення обирався відповідно до рівня температури в робочі години для базисного варіанту розрахунку (постійні внутрішні теплонадходження 1080 Вт) [174].

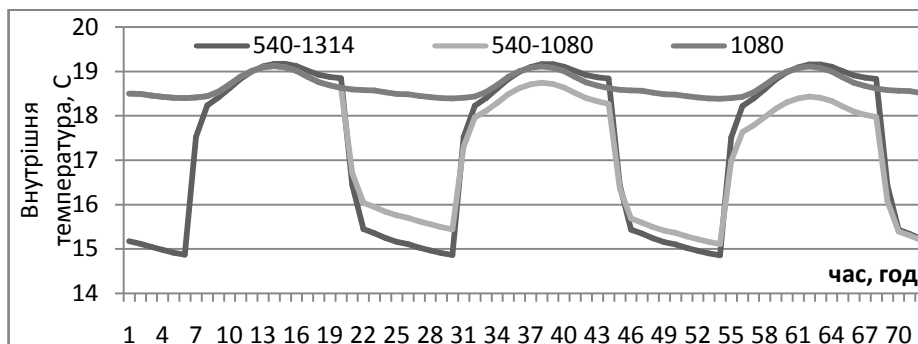


Рис. 4.4 – Добові коливання внутрішньої температури повітря [174]

Компенсація зменшення температури в приміщенні в робочі години при постійному використанні переривчастого опалення досягається за рахунок відповідного збільшення базового рівня опалення. На рис. 4.5 наведено рівень опалення та внутрішню температуру повітря для різної глибини провалу в неробочі години, за умови, що в робочі години температура в приміщенні буде така ж як без регулювання, що досягається підбором відповідного збільшення рівня базового опалення, а саме з 1080 до 1314 Вт при опаленні в нічному провалі 540 Вт, до 1224 Вт при 720 та 1179 при 900 Вт [174].

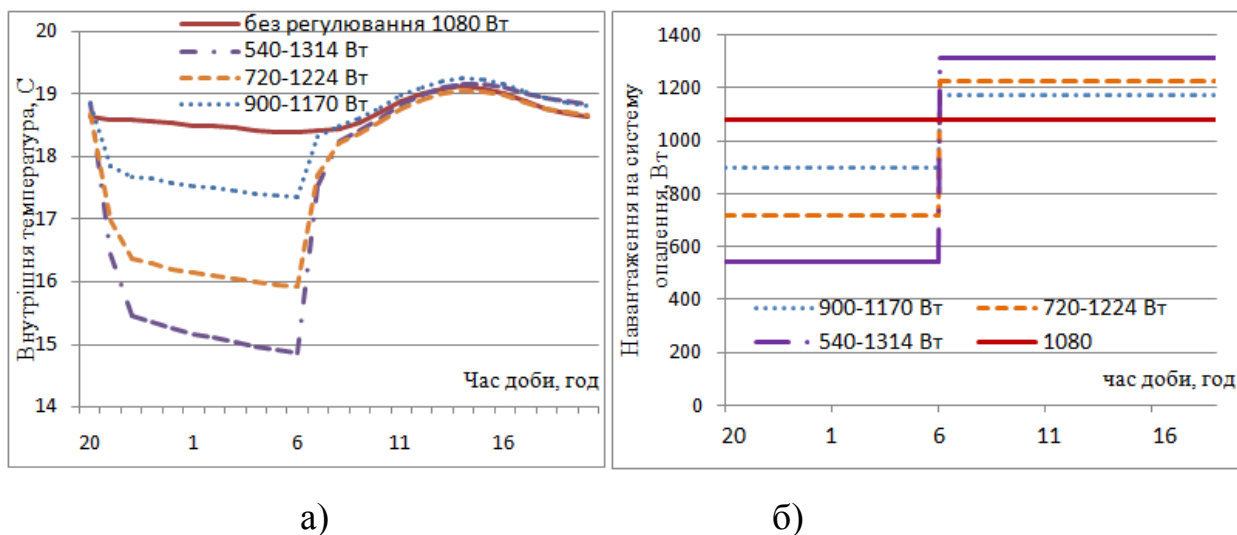


Рис. 4.5 – Добра зміна температури внутрішнього повітря (а) для різних графіків опалення (б) з постійним зниженням температури в нічні години [174]

4.1.2 Введення форсування системи опалення перед початком робочих годин

При прийнятому графіку теплового навантаження в неробочій період комфортний рівень температури в робочі години досягається з запізненням (див. рис. 4.1). Для забезпечення комфортного рівня температури в робочі години вводили форсування системи опалення. На рис. 4.6 наведено внутрішню температуру повітря з наявністю форсування системи опалення. Перед поверненням до базового рівня опалення 1080 Вт після нічного провалу досліджувалися різні варіанти короткочасного збільшення потужності рівня опалення до 1800 Вт тривалістю відповідно 1, 2, 3 год [174].

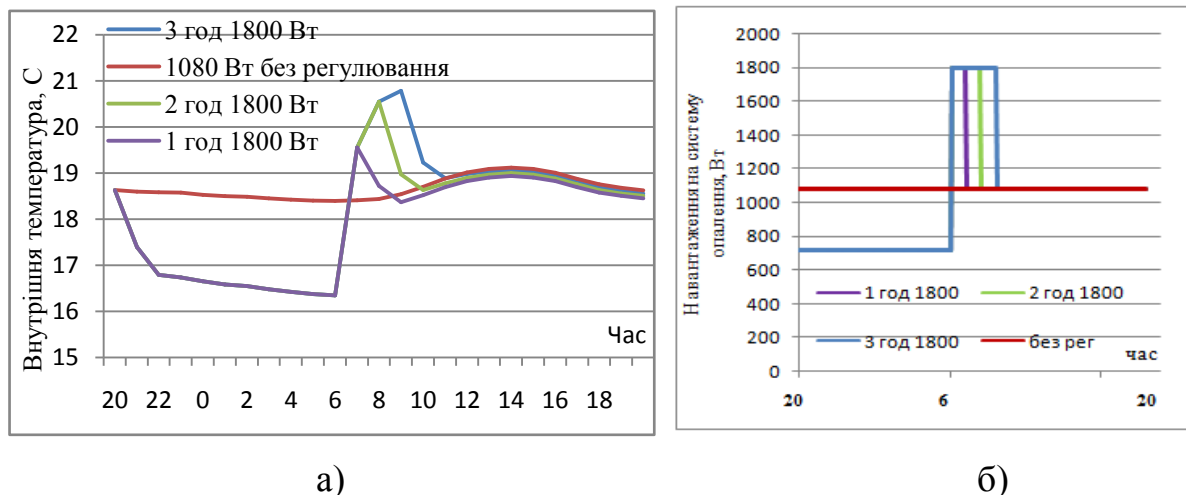


Рис. 4.6 – Добова зміна температури внутрішнього повітря (а) для різних графіків опалення (б) з форсуванням системи опалення [174]

З рис. 4.6а видно, що внутрішня температура повітря під час форсування системи опалення має явно виражену максимальну та мінімальну температуру.

Різниця відхилення внутрішньої температури в робочі години з введенням регулювання від базового графіку без регулювання незначна. Форсування системи опалення дозволяє швидше вийти на потрібну температуру в робочі години. Збільшення тривалості періоду форсування дозволяє знизити просідання графіку зміни внутрішньої температури в подальші дні при умові постійного регулювання [174].

На рис. 4.7 розглянуті варіанти для форсування системи опалення тривалістю 3 та 4 год, коли кількість теплоти підведена за форсування системи опалення однакова [174].

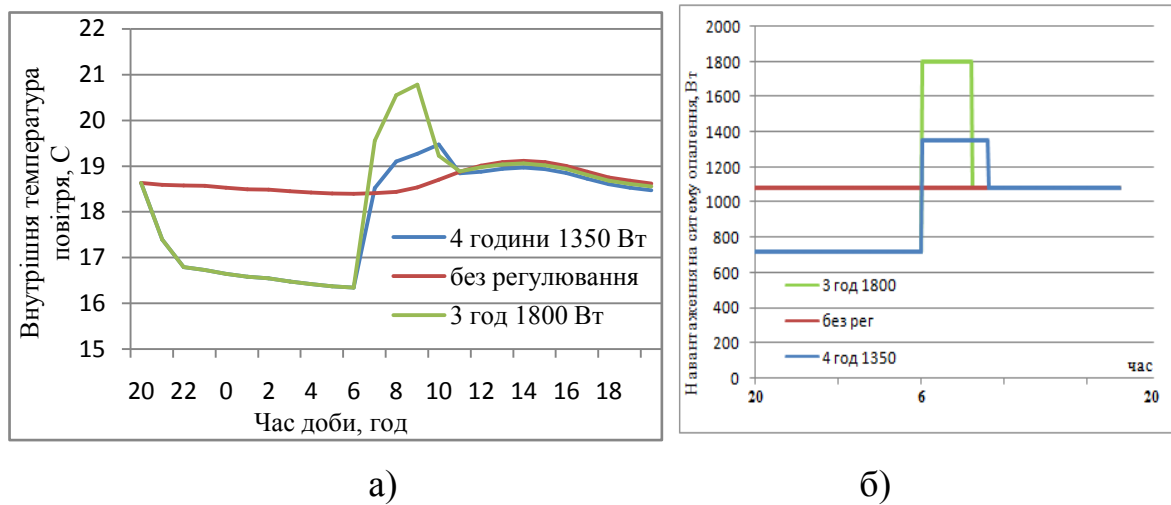


Рис. 4.7 – Вплив різних форм форсування системи опалення (б) на внутрішню температур повітря (а) [174]

В обох випадках при форсуванні системи опалення було спожито 5,4 кВт·год теплової енергії. При розігріві системи опалення 4 години з потужністю 1350 Вт досягнуто меншого зростання температури внутрішнього повітря під час форсування [174].

4.1.3 Визначення економії теплової енергії від регулювання рівня теплонаджоджень

При сталих значеннях зміни внутрішньої температури та переривчастого режиму опалення з параметрами зниження рівня опалення в неробочі години до 540, 720, 900 Вт та однаковими зовнішніми умовами визначено економію теплової енергії визначено відповідно до даних наведених на рис. 4.5 б [174].

При зниженні рівня опалення з 20:00 до 6:00 економія теплової енергії становитиме: 2% для графіка 900-1170 Вт; 6% – для 720-1224 Вт; 8,2% – для 540-1314 Вт [174].

Аналогічні розрахунки економії теплової енергії проведено за наявності форсування та підбору графіків зміни навантаження на систему опалення для стабілізації температури внутрішнього повітря в робочі години (рис. 4.8).

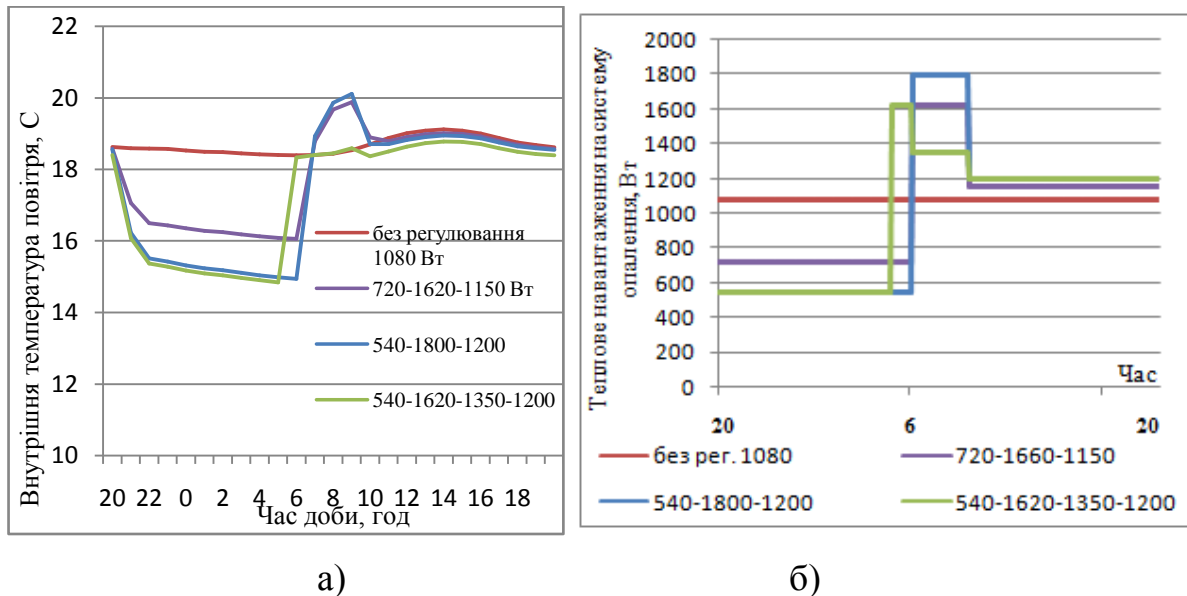


Рис. 4.8 – Добова зміна температури внутрішнього повітря (а) для різних графіків опалення (б) з постійним зниженням температури в нічні години та розігрівом системи опалення [174]

Економія теплової енергії від зниження температури в нічні години та форсування системи перед робочими годин становить: 4,6% для графіку 720-1620-1150 Вт; 7,2% – для 540-1800-1200 Вт; 8,2% – для 540-1620-1350-1200 Вт.

Висновок. З проведеного аналізу та визначення ефекту різних графіків переривчастого опалення при урахуванні інерційних характеристик будівлі, коливань погодних умов (зовнішня температура та сонячні теплонадходження) та графіків експлуатації встановлено, шляхом використання переривчастого опалення можливо досягти економії до 9% [174]. Отримані результати дещо нижче результатів отриманих в статті [172], що пов'язано з великою глибиною провалу, відмінною від європейських підходів [13].

4.2 Експериментально-розрахункове визначення інтегральних та розосереджених характеристик енергетичного стану та енергетичної ефективності будівлі навчального корпусу ВНЗ

На основі експериментальних даних контрольних замірів температури в приміщеннях та поверхонь радіаторів розділено методом групування кімнати в залежності від призначення та визначено в кожній групі репрезентативні приміщення. Для репрезентативних груп приміщень проведено експериментальне погодинне дослідження локальних характеристик зміни температури. Отримані експериментальні дані використані для визначення розосередженого навантаження на систему опалення та визначення кратності повітрообміну на основі експериментальних даних та рівняння регресії отриманого в п. 3.4.1.

4.2.1 Опис експериментальної методики визначення температурних показників будівлі

Об'єктом дослідження - навчальний корпус ВНЗ розташований у місті Київ (навчальний корпус 22 КПІ ім. Ігоря Сікорського). Для визначення репрезентативних приміщень проводились вимірювання для побудови температурних карт. Репрезентативні приміщення, відповідно до підходів [10, 105, 51], використовували для динамічного моделювання (п. 3.1) та детального аналізу на базі експериментальних даних.

Температурна карта будівлі – це таблиця значень температур приміщень, отриманих у визначений інтервал часу (наприклад, на протязі робочих годин одного дня). Температурні карти будувались для кожного поверху по окремим приміщенням. Інформація збиралась за допомогою безконтактних інфрачервоних пірометрів. Вимірювались температури внутрішніх та зовнішніх стін, стелі, підлоги, вікна. Середня температура приміщення визначалась як середня температура стін, що не є суміжними з неопалювальними приміщеннями,

враховуючи рекомендації [173, 175]. Отримані таким чином температури приміщень добре узгоджуються з вимірами температури повітря приладом VelocityCal, але процедура вимірювань температури повітря займає набагато менше часу. Температурні карти з фіксуванням температури радіаторів отримували періодично, 1-2 рази за опалювальний період (ОП). В роботі використано для аналізу вже накоплені дані 2003 - 2010 рр. та проведено аналогічні виміри в 2014-2017 рр.

Температурні карти дають середнє значення температурив приміщені у робочі години, тому для визначення добових коливань температури в певних (репрезентативних) приміщеннях навчального корпусу були встановлені автономні електронні накопичувачі-реєстратори температури ТЕРМОХРОН DS1921 або DS1922 (контактні температурні реєстри корпусного виконання MicroCAN з автономним живленням від літєвої батареї) [176]. Датчики DS 1921 мають дискретність $0,5^{\circ}\text{C}$, DS1922 відрізняється поліпшеною дискретністю вимірів температури до $0,0625^{\circ}\text{C}$. Температурні датчики були запрограмовані на фіксування значень температур з інтервалом одну годину. Інформація з датчиків зчитувалася за допомогою спеціального програмного забезпечення, зберігалася та оброблялася на комп'ютері. Термохронні датчики в кількості 10 одиниць перевірялася на однаковість показів термостатичним методом. Похибка визначення температури в приміщення за допомогою вищенаведених методів не перевищувала $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, зміни температури за допомогою DS1922 - $0,1^{\circ}\text{C}$.

4.2.2 Результати обробки температурних карт

Число виміряних температурних точок за весь час вимірювань складає біля 1300. На рис. 4.9 представлено частку охоплення приміщень вимірами. Отримані дані охоплюють понад 40% приміщень[136].

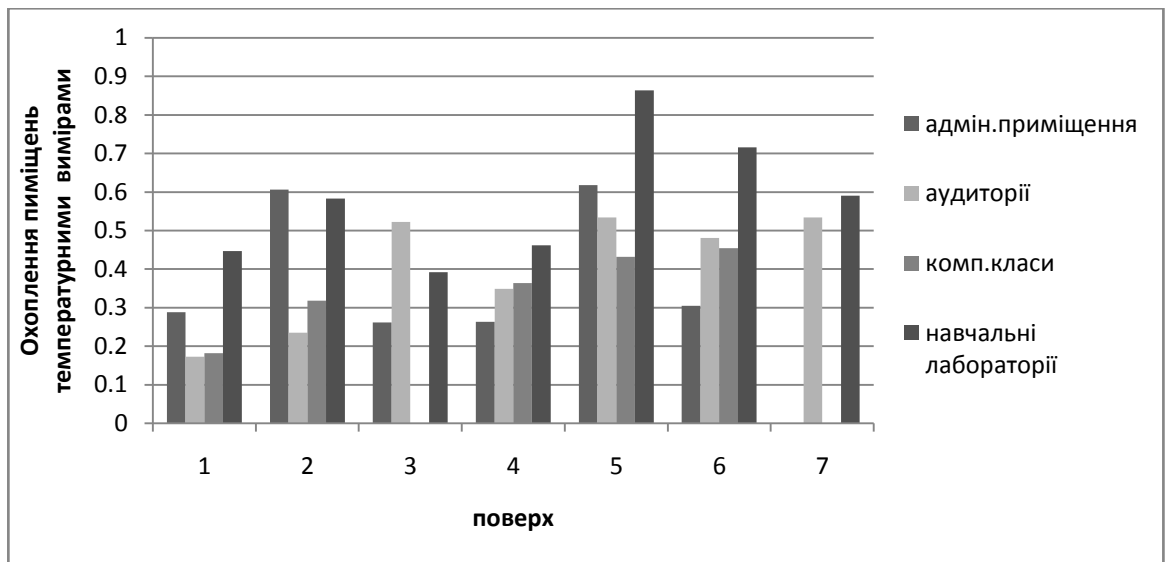
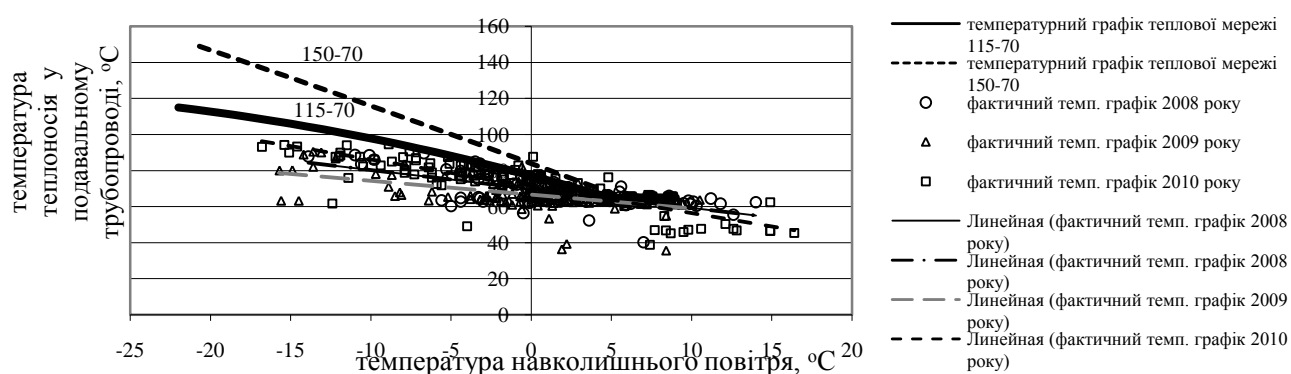


Рис. 4.9 – Охоплення груп приміщень температурними вимірами [136]

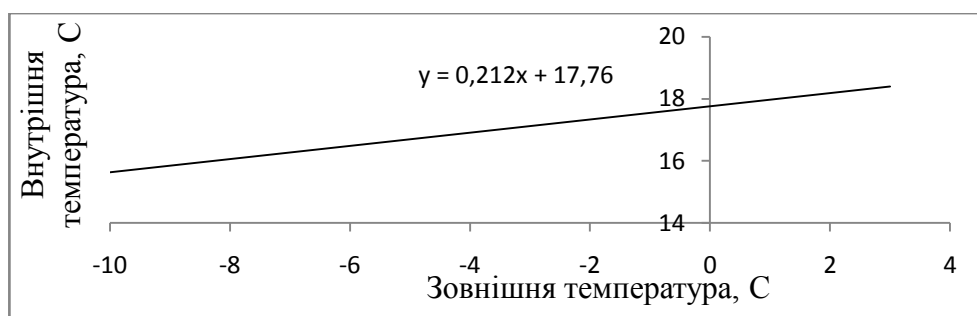
Середня температура повітря в робочі години в навчальному корпусі становила 15-17°C. На різницю температур приміщень будівлі впливають відмінність в режимах експлуатації, рівні сонячних теплонадходжень, режимах роботи, додаткові теплонадходження, кратність повітрообміну і т.п. Тому враховуючи режими роботи та експлуатації всі приміщення були розділені на чотири основні групи: адміністративні приміщення, навчальні аудиторії, науково-дослідницькі лабораторії та комп'ютерні класи (метод групування). В окрему групу були об'єднані допоміжні та технічні приміщення. Діапазон значень внутрішньої температури по групам приміщень має наступний вигляд: адміністративні приміщення – 17-22°C; навчальні класи – 15-18°C; лабораторно-дослідницькі аудиторії – 13-16 °C; комп'ютерні класи – 14-16°C [136].

Як раніше згадувалось, система опалення навчального корпус з верхньою вертикальною розводкою, тому в умовах недостатнього опалення на розподіл температур відчутно впливає номер поверху. З пониженням поверху температура в приміщенні знижується на 0,5°C. Приміщення, що розташовані з південної сторони будівлі, порівняно з приміщенням розташованими на північній стороні отримують значно більший рівень інсоляційних надходжень. Таким чином температура приміщень розташованих з південної сторони більша на 2-3 °C. [136]

За відсутності системи регулювання температурних режимів на зміну температурних умов суттєво впливають погодні фактори. Зазвичай найбільш вагомим фактором, який впливає на тепловий стан будівлі при невиконанні температурного графіка (рис. 4.10,а) [104], є зміна зовнішньої температури (рис. 4.10,б). Залежність зміни середньої внутрішньої температури будівлі від зовнішньої отримана з використанням даних температурних карт представлена рис. 4.10,б [136]. З 2014 року в КПІ ім. Ігоря Сікорського введено ручне регулювання в навчальних корпусах, що вносило зміни в поведінку внутрішньої температури повітря, тому в аналізі використано вибірку до 2014 року.



а)



б)

Рис. 4.10 – Порівняння стандартних та фактичних температурних графіків подачі теплоносія (а) [104] та зміни внутрішньої температури від зовнішньої в робочі години (б) [136]

Для усунення впливу прямої сонячної радіації розглянуто приміщення розташовані з північної сторони будівлі. На рис. 4.11 наведено аналіз близько 700 значень даних температур приміщень з північної сторони при виключенні впливу радіації. Для нормалізації даних по розподілу температур на рис. 4.11 вводимо

співвідношення $\frac{t_{i,n}}{t_{сер,n}}$, де $t_{i,n}$ – температура i -го приміщення північної сторони n -й день вимірювання; $t_{сер,n}$ – середня температура всіх приміщень, розташованих з північної сторони в n -й день вимірювань [136].

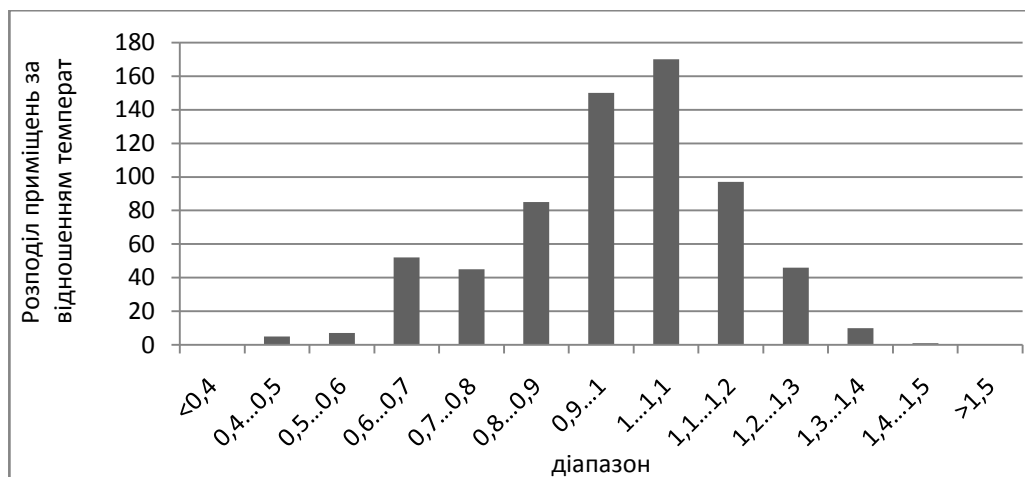


Рис. 4.11 – Розподіл відношення температур приміщень, розташованих з північної сторони будівлі [136]

Розкид температур приміщень від середніх значень становить до 30%. [136]

Розподіл відхилень температур приміщень від середнього значення аналізувався для всіх приміщень північної сторони (див. рис. 4.11) та окремо по вище перерахованих групах приміщень. Форма розподілу найбільш близька до нормальної в приміщеннях адміністративного призначення (рис. 4.12), при тому розкид внутрішніх температур менший та завдяки більшому рівню температур приміщень цієї групи зміщений в сторону зростання. [136]

Відхилення розподілу від нормального закону (див. рис. 4.12) вносять в основній мірі комп'ютерні та лабораторні класи, а також навчальні аудиторії. В комп'ютерних та лабораторно-навчальних класах розподіл відношення температур відхиляється від середнього в сторону зменшення. [136]

Таким чином, аналіз даних температурних карт, побудованих на базі проведених у робочі години вимірів, дозволив показати вплив зовнішньої температури на середню внутрішню температуру будівлі, залежність температур

приміщень від поверху розміщення, обґрунтувати розподіл приміщень на групи та визначити характер відмінності температур приміщень від середніх значень. [136]

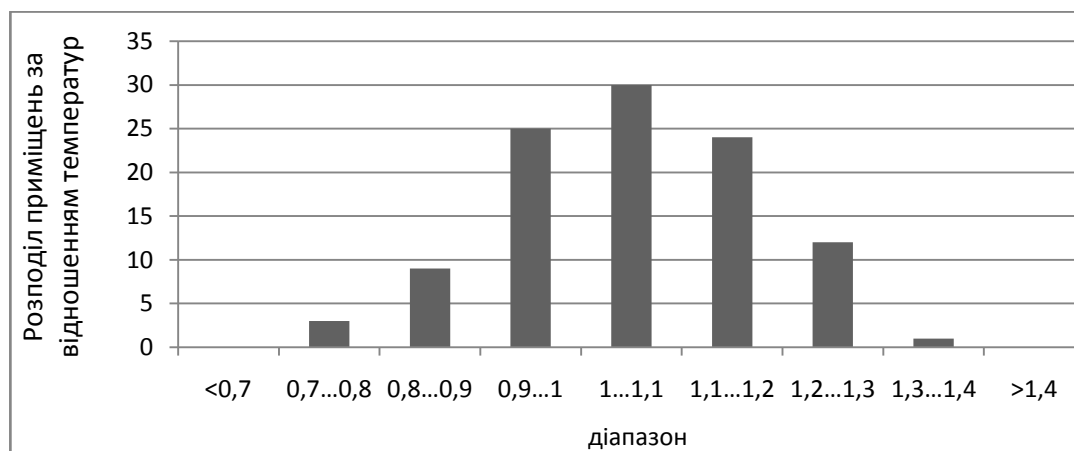


Рис. 4.12 – Розподіл відношення температур для адміністративних приміщень північної сторони будівлі [136]

4.2.3 Результати вимірювання часових температурних характеристик репрезентативних приміщень

З попереднього групування було виділено основні групи приміщень. В кожній групі були виділені контрольні приміщення розташовані на північній та південній стороні будівлі та проводились цілодобове погодинне фіксування внутрішньої температури. Температурні датчики встановлювались відповідно до рекомендацій [177]. Виміри змін температур контрольних приміщень, які були проведенні в жовтні-листопаді 2014 року, дозволили проаналізувати вплив на зміну температури в часі таких чинників, як режим використання приміщень різних груп в робочі та вихідні дні, опалення, сонячні надходження, а також напрям та сила вітру. [136]

Для визначення впливу опалення на рис. 4.13, 4.14 наведений приклад розподілу температур в приміщеннях протягом дня для приблизно однакових погодних умов за відсутності опалення та з опаленням (до початку опалювального сезону та після початку опалення). Окремо розглядалися робочі та вихідні дні.

Для усереднення збиралась інформація з двох приміщень одного призначення за 2-4 дні з приблизно однаковими погодними умовами(сонячні дні з середньоденною зовнішньою температурою $+6...+8^{\circ}\text{C}$) [136].

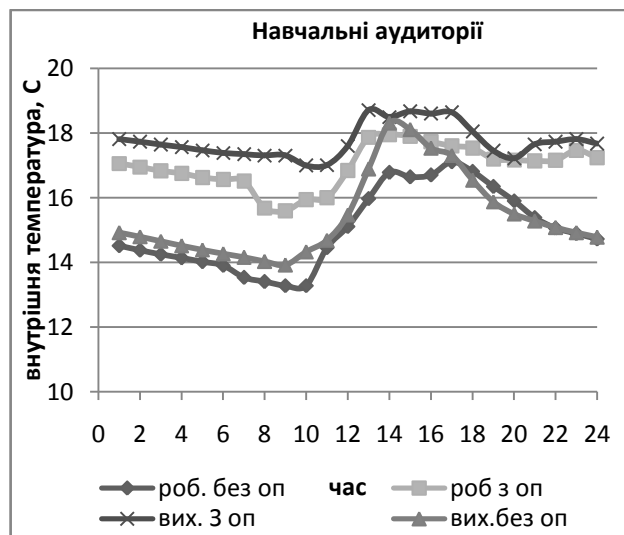


Рис. 4.13 – Динаміка зміни температури в навчальних аудиторіях без та з опаленням у вихідні та робочі дні з південної сторони будівлі [136]

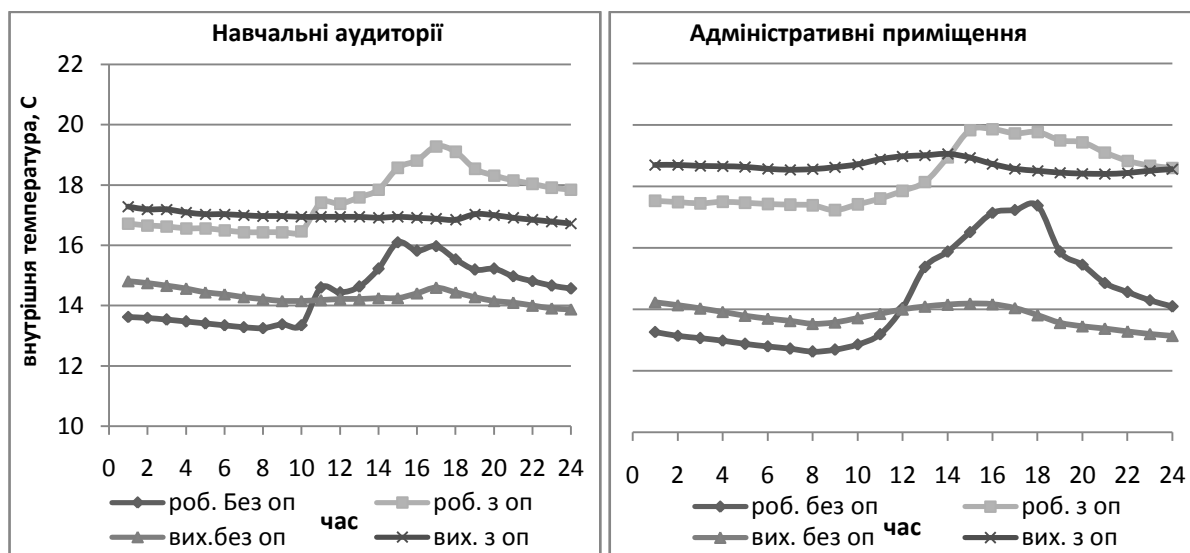


Рис. 4.14 – Динаміка зміни внутрішньої температури в групах приміщень без та з опаленням у вихідні та робочі дні з північної сторони будівлі [136]

За ввімкненої системи опалення температура в приміщеннях змінюється на $3...4^{\circ}\text{C}$. В приміщеннях розташованих з південної сторони будівлі внутрішня температура підвищується на 4°C в робочі години, що пояснюється додатковими

інсоляційними теплонадходженнями. В цілому спостерігається тенденція, що в приміщеннях розташованих з північної сторони у вихідні дні температура на протязі доби майже не змінюється, а робочі години має місце збільшення 1,5...2°C за рахунок додаткових теплонадходжень. В адміністративних приміщеннях в робочі години температура на 1°C більша в порівнянні з навчальними аудиторіями за рахунок метаболічних теплонадходжень та додаткових нагрівачів; у вихідні дні – за відсутності опалення температура в цих групах приміщень температура приблизно однакова. Вища температура контрольного адміністративного приміщення за наявності опалення пояснюється кращим опаленням (більша питома площа опалювальних приладів) [136].

Для аналізу впливу сонячних теплонадходжень на рис. 4.15 наведена зміна відхилення внутрішньої температури адміністративних приміщень відносно нормативної температури для робочого дня для різних орієнтацій та різних умов хмарності при наявності опалення. В таблиці 4.1 наведено погодні умови даних днів [136].

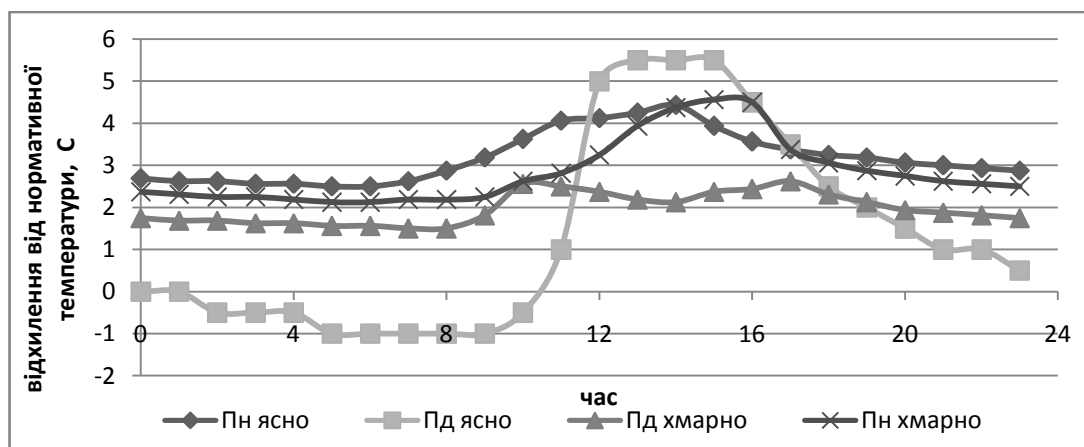


Рис. 4.15 – Відхилення внутрішньої температури в адміністративних приміщеннях від нормативної для робочого дня при різних умовах хмарності [136]

Спостерігається температурний пік з південної сторони приміщень в ясний день. Треба також відзначити, що в робочі години даний пік більш протяжний в порівнянні до вихідних днів. Це пояснюється тим, що в робочі дні крім сонячних теплонадходжень присутні додаткові теплонадходження. В нічні години

адміністративні приміщення розташовані з південної сторони будівлі охолоджуються на 2...3°C більше ніж за аналогічних умов приміщення північної сторони будівлі, що пояснюється Пд та ПдСх напрямком вітру. В похмурий день характер зміни температури виявився приблизно однаковим, якщо не приймати до уваги впливу різного рівня тепло надходжень в робочі години [136].

В навчальних аудиторіях як і в адміністративних приміщеннях в години сонячної активності схожа поведінка. Мають схожу протяжність піку в робочі години; у вихідні дні пікова температура триває лише кілька годин. У нічні години розташовані з південної сторони будівлі навчальні аудиторії також охолоджуються суттєвіше. Проведено аналіз температури приміщень на фоні сукупної дії розглянутих впливових факторів. Більш точне виокремлення їх впливу надає математичне моделювання [136].

Таблиця 4.1 – Погодні фактори та їх величина [136]

		Ясний день (30.10.2014 р.)																										
		Вітер		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
		М/с	Нап.	Сх	Сх	Сх	ПнСх	Сх	Сх	Сх	Сх	Сх	Сх	Сх	Сх	Сх	Сх	ПдСх	ПдСх	ПдСх	ПдСх	ПдСх	ПдСх	ПдСх	ПдСх	ПдСх	ПдСх	
		Сон. рад., Вт/м ²		Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	Пд	Пн	
		Тзов, С		-1	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	4	8	10	11	12	11	10	4	2	0	0	0	-2	-2	-2	
		Похмурий день (13.11.2014р.)																										
		Вітер		3х	3х	Пд	3х	3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	3х	3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пд	3х	Пн3х	
		М/с	Нап.	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	2	1	2	3
		Сон. рад., Вт/м ²		0	0	0	0	0	0	0	0	1,3	5,4	9,7	11	8,8	5,8	4,7	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Пд	Пн	0	0	0	0	0	0	0	0	2,6	5,7	9,4	11	8,7	4,9	4,8	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Тзов, С		5	5	6	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	3	3	3	3	3	2	3	2	-1	-2	-2	

4.2.4 Добові зміни зовнішньої температури та аналіз

Зазвичай, при аналізі впливу зовнішніх погодних умов на тепловий стан будівлі використовують метеорологічні дані. Разом з тим локально виміряні

характеристики зовнішніх умов та їх вплив на температурний стан можуть суттєво відрізнятися [176]. Тому поряд з добовими змінами температур контрольних приміщень вимірювались також температури зовнішнього повітря з південної та північної сторони будівлі з використанням термохонних датчиків, захищених від впливу прямих сонячних променів та дощу. На рис. 4.16 наведено приклад зміни зовнішньої температури та сонячної радіації за різних умов хмарності [136].

За отриманими результатами видно, що температура виміряна з північної та південної сторони будівлі за рахунок теплового впливу оболонки будівлі вища ніж зовнішня температура метеоданих, при однаковому характері добової зміни температури в часі. Пік сонячних теплонадходжень та зовнішньої температури мають зміщення в часі, що пов'язане з прогрівом повітря від зовнішньої поверхні стін [136].

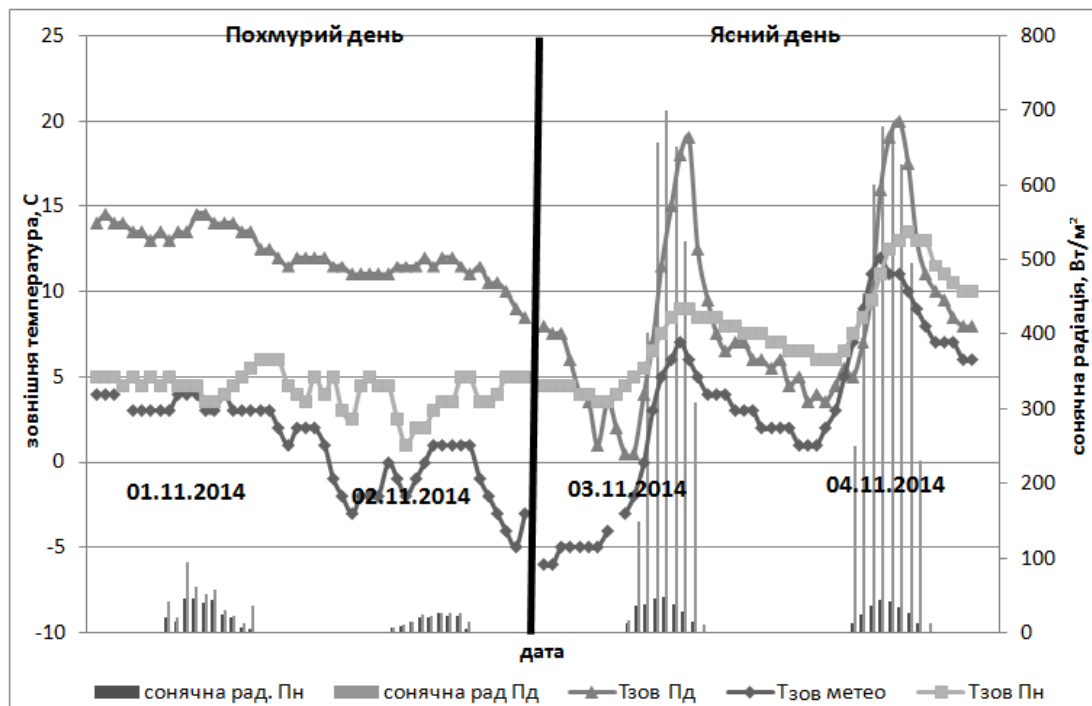


Рис. 4.16 – Динаміка зміни виміряних та метеоданих зовнішньої температури та сонячної радіації [136]

4.2.5 Розосередження теплонадходження системи опалення будівлі

Облік теплової енергії в будівлі навчального корпусу 22 КПІ ім. Ігоря Сікорського ведеться на вході, схема підключення незалежна через пластинчатий теплообмінник. Система опалення однотрубна з вертикальною верхньою розводкою. Для аналізу експериментально отриманих локальних характеристик температур повітря в приміщеннях потрібно мати локальні характеристики розподілу теплонадходжень від системи опалення [182].

Основою поглибленого аналізу теплового стану та нестационарних енергетичних балансів будівель є математичне моделювання. Один з підходів полягає у використанні моделей на базі теплофізичних та геометричних характеристик будівлі. Основна увага приділяється побудові моделей енергетичного споживання будівель, вплив різних факторів на зміну та характеристики розподілу внутрішньої температури в приміщеннях вивчається мало. Другий - у використанні вимірних значень параметрів теплових режимів будівлі. Вони дозволяють аналізувати та передбачати різні аспекти поведінки будівлі як енергетичної системи [34, 69, 177]. Перший підхід потребує побудови моделі для проведення розрахунків (імітаційного моделювання, білі моделі). Другий - великого числа накопичених експериментальних даних (чорні моделі). Експериментально отримані дані можуть містити комплексний вплив, що ускладнює їх аналіз та зменшує точність отриманих результатів. Поєднання двох вище названих підходів отримало свій розвиток у використанні сірих моделей. Поєднання зазначених підходів для визначення енергетичних характеристик будівлі дозволить поєднати їх переваги та максимально близько прогнозувати температурні режими приміщень в реальних умовах. Сірі моделі дозволяють уточнити характеристики розрахункової моделі на базі фактичних даних, виокремити фактичний вплив окремих вихідних даних за допомогою розрахункових моделей [28-32].

В розділі 3.3.1 виділено п'ять найбільш впливових факторів на внутрішню температуру повітря: зовнішня температура, сонячні теплонадходження,

внутрішні теплонадходження, швидкість та напрям вітру (представлені через кратність повітрообміну), опалення [182].

На базі даних температурних карт запропоновано підхід для розподілу теплового споживання будівлі між кімнатами. Інтегральна характеристика температурного розподілу в будівлі в залежності від орієнтації та поверху отримана на базі температурних карт. При вимірах температурних карт фіксувалась температура зовнішнього повітря та температура поверхонь радіаторів. З показів лічильника отримано температуру подачі та зворотки в гарячому контурі та кількість відпущеної теплоти. Нормалізацію значень для рівнянь регресії проводили в діапазоні зміни: зовнішня температура $\Delta t_{зв} = 25$ °С, внутрішня температура $\Delta t_{вн} = 8$ °С, рівень опалення $\Delta Q = 1200$ Вт, $\Delta(t' - t'') = 40$ °С. Створена регресійна модель для визначення температури поверхні радіатора в нормалізованому вигляді в залежності від зовнішньої температури, поверху та різниці температур в первинному контурі в нормалізованих одиницях наведена нижче [182].

$$t_{рад,m} = 0,278 + 0,297t_{зв} - 0,221m + 0,156(t'_1 - t''_1), \quad (4.1)$$

де $t_{рад}$ – температура радіатора на m – му поверсі;

$t_{зв}$ – зовнішня температура повітря;

m – номер поверху;

t'_1, t''_1 – температура теплоносія в первинному контурі у подавальному та зворотному трубопроводі системи опалення.

Отримані значення середньої температури поверхонь радіаторів з нормалізованих значень приводились до абсолютних значень.

Отримані значення температури радіатора на відповідному поверсі використано при розподілі теплоспоживання навчального корпусу. Визначену площу радіаторів у кожному приміщенні та по поверхам використано при перерахунку загального теплового навантаження будівлі. Теплове навантаження приміщень визначається за формулою 4.2:

$$Q_j = \frac{k_j(t_{\text{рад},m} - t_{\text{вн},j})}{\sum_{m=1}^7 (k_{\text{Пд},m}(t_{\text{рад},m} - t_{\text{вн},m}^{\text{Пд}}) + k_{\text{Пн},m}(t_{\text{рад},m} - t_{\text{вн},m}^{\text{Пн}}))} Q_{\text{заг}}, \quad (4.2)$$

де Q_j – середньодобове значення теплового потоку від радіаторів в j -тій кімнаті, Вт;

k_j – площа радіатора в j -тій кімнаті, м²;

$t_{\text{рад},m}$ – температура радіатора на m -му поверсі, °С;

$t_{\text{вн},j}$ – внутрішня температура повітря в j -тій кімнаті, °С;

$k_{\text{Пд},m}, k_{\text{Пн},m}$ – площа радіаторів на m -му поверсі відповідної орієнтації, м²;

$Q_{\text{заг}}$ – загальне середньодобове теплове навантаження будівлі, Вт.

Розроблена модель дозволяє розділити загальну кількість теплоти між кімнатами з врахуванням зниження температури теплоносія з висотою через конструкційні особливості однотрубних систем опалення [182].

4.2.6 Визначення кратності повітрообміну

Як згадувалось вище, сіре моделювання дозволяє проводити аналіз шляхом поєднання розрахункових та експериментальних даних. Кратність повітрообміну параметр, який складно визначати експериментально, тому на основі створеної багатофакторної регресійної моделі та фактичних значень внутрішньої температури, рівня опалення, сонячних теплонадходжень можна уточнювати кратність повітрообміну [182].

При аналізі просторово-часових розподілів температур приміщень будівлі були використані метеодані по температурах зовнішнього повітря, напряму та швидкості вітру [136, 178, 179], а також дані інтенсивності сонячної радіації вимірянні створеним в Інституті технічної теплофізики НАН України пристроєм піранометром «СР-У1», що належить до актинометричної групи приладів і служить для вирішення завдань, пов'язаних з довгостроковим безперервним моніторингом радіаційних властивостей атмосфери і накопиченням даних

вимірювань надходження сонячної радіації на похилу поверхню. Він вимірює густину сумарної сонячної радіації у $\text{Вт}/\text{м}^2$, що надходить на площину з кутом нахилу до горизонту від 0° до 90° з кроком в 10° [180, 181].

Загалом для зимового періоду м. Києва максимальні міждобові зміни зовнішньої температури становлять $6\text{...}10^\circ\text{C}$. В середньому між добові зміни температури становлять $3\text{--}4^\circ\text{C}$ [82]. Швидкість вітру для опалювального періоду в середньому становила $2,7$ м/с з переважним західним та північно-західним напрямом вітру [153]. [182]

Метеорологічні дані відмінні від типового нормативного року. Зазвичай, при аналізі впливу зовнішніх погодних умов на тепловий стан будівлі використовують фактичні метеорологічні дані. Методані щодо швидкості та напрямку вітру, зовнішньої температури були взяті з метеосайтів [178, 179].

Зовнішня температура знаходилась в діапазоні $-3\text{...}+7^\circ\text{C}$. Середньодобові значення сонячних теплонадходжень, які потрапляють в кімнату через світлопрозорі елементи конструкції знаходились в діапазоні від $15 \text{ Вт}/\text{м}^2$, для орієнтації вікон на північну сторону, до $200 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в залежності від умов хмарності для південної орієнтації [182].

Накопичені фактичні дані внутрішньої температури повітря несуть в собі одночасний вплив ряду факторів, що не дозволяє відокремити вплив кожного фактору окремо при побудові регресійної моделі. Для дослідження рівня температури внутрішнього повітря була створена динамічна модель кімнати за допомогою програмного продукту EnergyPlus, яка дозволяє моделювати зміну температури повітря в приміщенні в залежності від кліматичних умов, рівня опалення та теплотехнічних характеристик приміщення, щоб визначити почерговий вплив виділених факторів [71]. Репрезентативне приміщення моделювалось для південної та північної орієнтації на різних поверхах, за винятком приміщень першого та останнього поверху. На базі значень імітаційного моделювання створена багатофакторна регресійна модель. Лінійна багатофакторна регресійна модель наведена в розділі 3.4.1, формула 3.8 [182].

Дана регресійна залежність враховує середньодобові зміни опалення, зовнішньої температури повітря, сонячної активності, швидкість та напрям вітру (виражена через кратність повітрообміну).

Значення приведених коефіцієнтів рівняння регресії в нормалізованому вигляді являються коефіцієнтами еластичності [182].

$$E_{ze} = 0,251, E_n = -0,41, E_{Q_{sol}} = 0,142, E_Q = 0,341.$$

З цих даних видно, найбільший вплив на нормалізовану температуру повітря в кімнаті має кратність повітрообміну [182].

Багатофакторна лінійна регресійна модель кімнати може бути використана для оцінки кратності повітрообміну, так як даний показник найбільш складно експериментально визначати. На базі отриманих експериментальних значень внутрішньої температури приміщень, рівня опалення та зовнішніх погодних умов визначено фактичний повітрообмін обраних приміщень. [182]

Уточнення кратності повітрообміну проводились для осіннього періоду (жовтень-листопад 2014 р.), коли опалення ще не було ввімкнене, та при наявності централізованого опалення [182].

Розрахунок кратності повітрообміну проводився для репрезентативних кімнат різного призначення (рівень природної вентиляції яких залежить від їх розташування, призначення, стану вікон і таке інше): адміністративні, навчальні лабораторні та комп'ютерні аудиторії. Добові погодинні значення внутрішньої температури повітря з термохронів усереднювались. Аналогічно визначались середньодобові значення для погодних умов (температура, швидкість, напрям вітру, сонячна радіація) [182].

В умовах невизначеності початкового значення кратності повітрообміну за попередні дні приймалось в першому наближенні нормативне значення. Для обраного розрахункового діапазону повторювали розрахунки з уточненням початкового значення кратності повітрообміну для середнього значення. Даний підхід коригував отримані значення кратності після першої ітерації на $0,2-0,3 \text{ год}^{-1}$. Для розглянутого інтервалу часу кратність повітрообміну знаходилась в діапазоні $0,2 \dots 2 \text{ год}^{-1}$ для обраних приміщень. Для прикладу на рис. 4.17 наведено

розраховану за допомогою регресійного рівняння зміну кратності повітрообміну в залежності від кліматичних умов в нормалізованих одиницях для навчальних приміщень південної та північної орієнтації розташовані на середніх поверхах будівлі (3 та 4 поверх) [182].

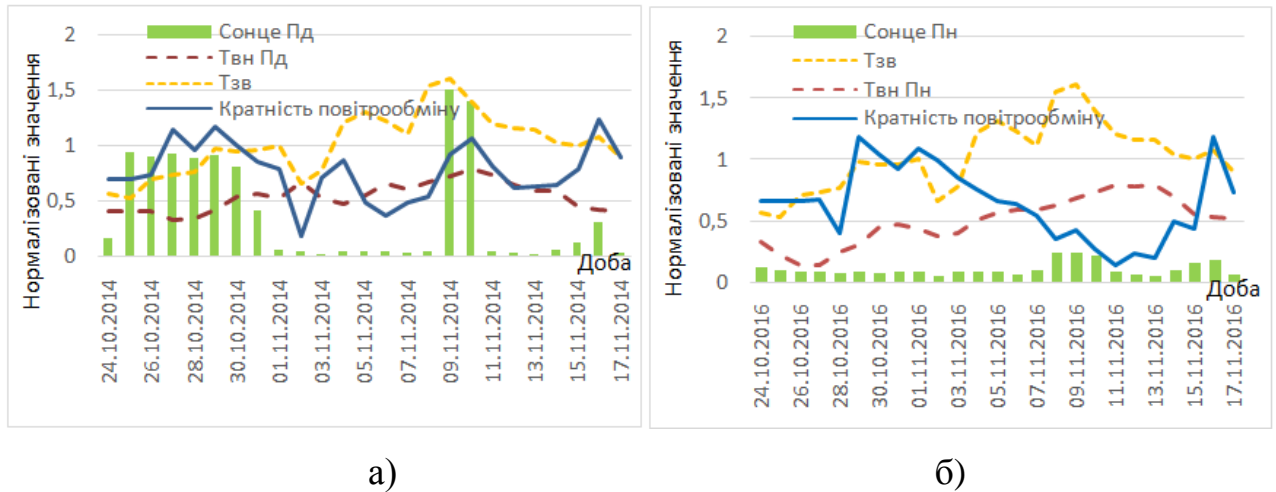


Рис. 4.17 – Розрахункове нормалізоване значення кратності повітрообміну для навчальних аудиторій розташованих на південній (а) та північній (б) стороні будівлі в залежності від кліматичних умов [182]

Розглянуті кімнати орієнтовані на південну та північну сторону та знаходяться на середньому поверсі в середині будівлі. Зважаючи на те, що швидкості вітру вздовж зовнішньої огорожувальної поверхні збільшується з збільшенням висоти будівлі (поверху) дана особливість при розрахунках простежувалась при аналізі всіх репрезентативних приміщень. На рис. 4.18 наведена середньодобова зміна кратності повітрообміну в порівнянні зі зміною характеру вітру та температурного перепаду [182].

Як раніше згадувалось, типова швидкість вітру для розглянутої місцевості становить 2,7 м/с. За фактичними показниками швидкість вітру знаходилась в діапазоні 0-4 м/с. За умови навітряної зовнішньої стінки та швидкості вітру біля 4 м/с кратність повітрообміну становить 2 год⁻¹ (рис. 4.18). Невизначеність початкового значення кратності повітрообміну вносить свій вплив на наступні три дні розрахунку, далі цей вплив затухає [182].

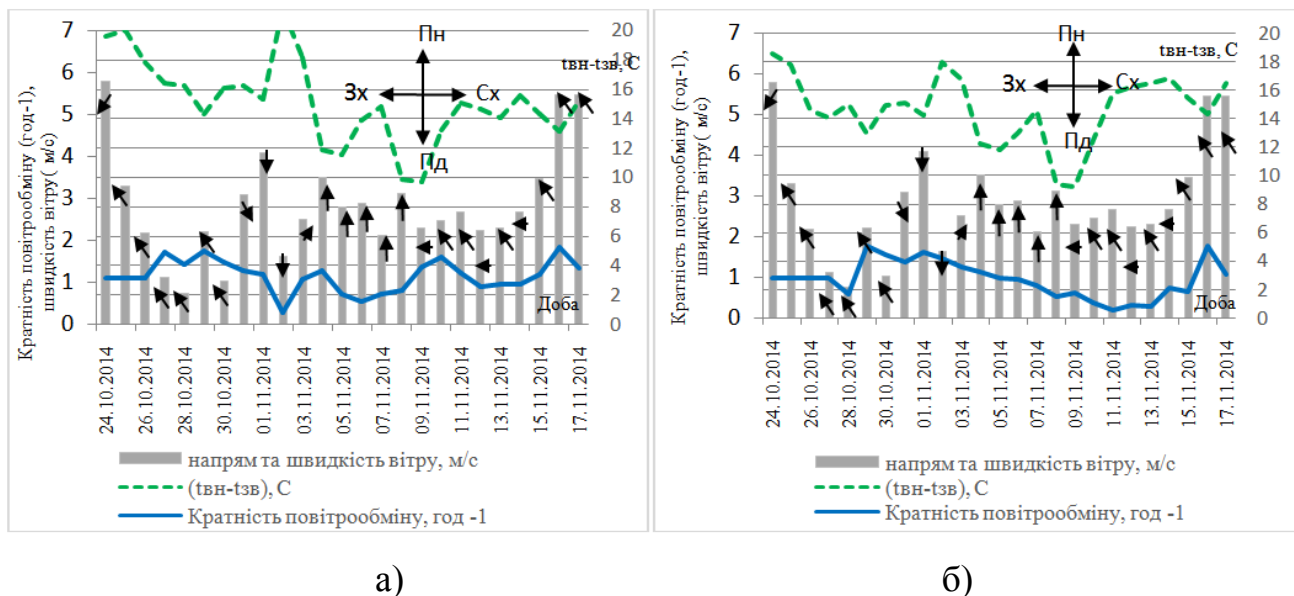


Рис. 4.18 – Порівняння величини кратності повітрообміну на південній (а) та північній (б) стороні будівлі і характеристик вітру та різниці температур повітря всередині та ззовні будівлі [182]

4.3 Енергетична сертифікація громадських будівель

Квазістаціонарний підхід визначення енергопотреби [94] був застосований до громадських будівель розташованих в м. Києві та інших регіонах України при розрахунку енезберігаючих заходів з енергозбереження.

Один з показників ефективного використання енергоресурсів є енергетична сертифікація, що дозволяє визначити клас енергоефективності та використовується при визначенні поняття енергоефективна чи не енергоефективна будівля.

Питання аналізу ефективності використання енергетичних ресурсів особливо актуальне у бюджетній сфері [183-192], по-перше, через зношеність фонду будівель, по-друге, через брак бюджетного фінансування на покриття комунальних витрат і проведення заходів з енергозбереження та санації будівель [183, 184]. Особливо це стосується об'єктів у сільській місцевості, де

обсяг капіталовкладень соціального призначення у розрахунку на одного жителя залишається у 1,5–2 рази нижчим, ніж у містах.

Більшість робіт присвячена соціальним закладам, розташованим у містах. [183, 184, 186-192] Заклади соціальної сфери мають свою специфіку пов'язану з особливістю місцевості. Наприклад, в певній місцевості відсутній природній газ, джерелом теплової енергії є тверде паливо (дрова, вугілля), а опалювальна площа використовується частково [193].

Існуюча практика оперує лише місячними показами енергоспоживання будівель, що ускладнює процес прийняття рішень щодо зменшення енергоспоживання при дотриманні нормативних умов мікроклімату у приміщеннях будівель [182].

4.3.1 Характеристика об'єктів соціальної сфери

В місті Київ в рамках співпраці Солом'янської районної державної адміністрації та Інститутом енергозбереження та енергоменеджменту проводились енергетичні аудити для шкіл та ДНЗ даного району. Всі об'єкти відносили до 70-80-тих років масової забудови з класичними архітектурними конфігураціями та теплофізичними рішеннями, що відповідають рокам забудови. До термомодернізації в розглянутій групі будівель соціальної сфери середній термічний опір зовнішніх непрозорих огорожень становив $1\text{--}2,5 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Детальна характеристика об'єктів наведена в Додатку В. Витрати на опалення визначені основі квазістаціонарного помісячного методу розрахунку за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015. За розрахунковими показниками споживання теплоти на опалення для закладів соціальної сфери знаходиться в діапазоні $50 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$.

Український фонд соціальних інвестицій (УФСІ) за фінансової підтримки Уряду Німеччини реалізують проекти по термомодернізації соціальних об'єктів по всій території країни. На одному з етапів реалізації проекту в програмі прийняли участь міста, смт. та села Львівської, Кіровоградської, Вінницької областей

(загальна кількість понад 60 об'єктів). Значна частина будівель особливі з точки зору аналізу, геометрії, експлуатації, теплофізичних особливостей огорожень, систем опалення та типів палива, що використовується. Характеристика об'єктів наведена в Додатку Б. Розглянута група будівель потребує більш детального аналізу.

Більшість будівель побудована в період 1955–1990 рр., деякі будівлі збудовані навіть наприкінці XVIII сторіччя. Розподіл будівель за роками забудови наведено на рис. 4.19.

Більшість об'єктів, які розглядалися в рамках інвестиційного проекту, - це школи та ДНЗ. Об'єкти частково використовують свої площі, що пов'язане зі зменшеною відносно проектних показників кількістю дітей. Дані особливості використання площ призводять до перевитрати споживання енергоресурсів, а отже, - надмірних витрат в бюджетній сфері [193].

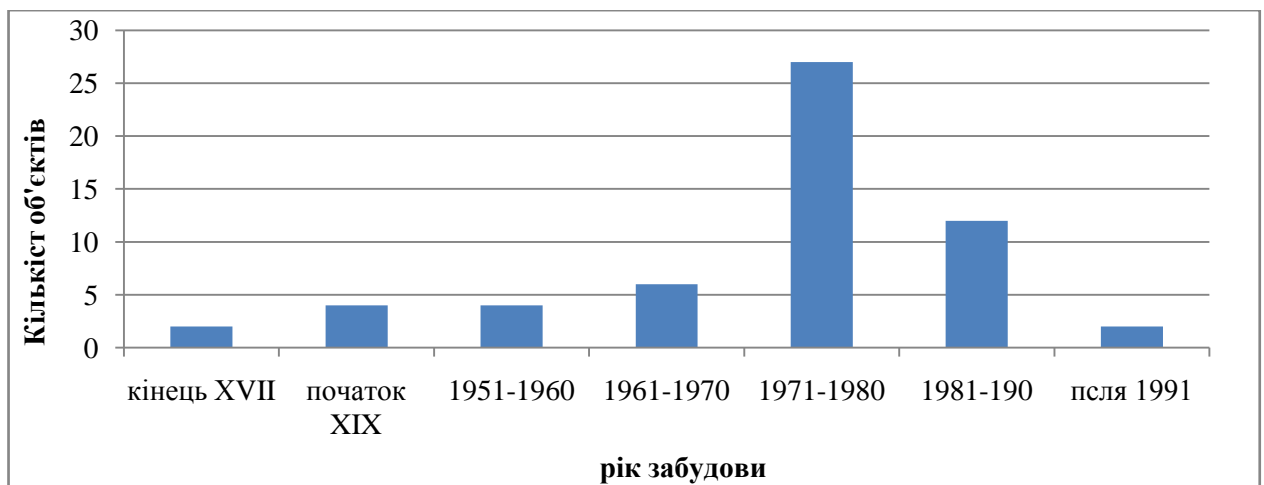


Рис. 4.19 – Розподіл будівель, що приймають участь у проекті УФСІ за роками забудови [193]

На рис. 4.20 представлений розподіл об'єктів соціальної сфери за призначенням будівель.

До термомодернізації в розглянутій групі будівель соціальної сфери середній термічний опір зовнішніх непрозорих огорожень становив 0,8–1,5 м²К/Вт (мінімально допустиме значення опору теплопередачі для стін 3,3 м²К/Вт), що призводить до надмірного споживання енергоресурсів та

недотримання умов внутрішнього мікроклімату приміщень. Дерев'яні віконні блоки – у незадовільному стані, деревина за період експлуатації розсохлася, спостерігаються нещільності між рамою та склом. В багатьох вікнах відсутнє одне скло з двох.

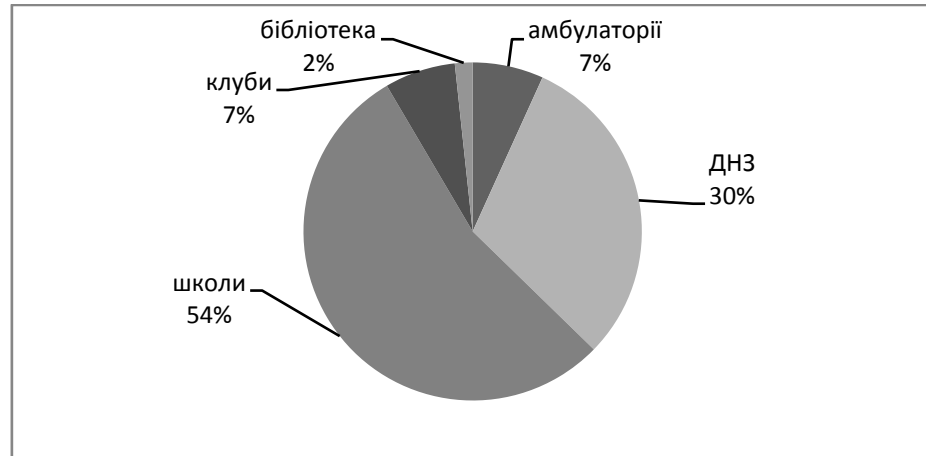


Рис. 4.20 – Розподіл об'єктів соціальної сфери за призначенням [193]

На розглянутих об'єктах використовували застарілі котли, деякі будівлі опалюються за допомогою печей (грубок). Основний вид палива – це вугілля та дрова, так як в даних регіонах відсутній газ.

Базовий рівень енергоспоживання розраховувався помісячним методом наведеним в стандарті ДСТУ Б А.2.2-12:2015.

За розрахунковими показниками середнє споживання теплоти на опалення для закладів соціальної сфери становить $89 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ ($333 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$). У зв'язку з нестачею фінансування потреб опалення рівень вимог до температури в приміщеннях часто не виконується і може бути нижчим за нормативний на $3\text{--}4^\circ\text{C}$. Будинки в Європі сьогодні споживають $121\text{--}135 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ [194].

Розкид значень питомих показників відносно середнього досить значний та становить понад 50%. На рис. 4.21 приведені питомі показники теплоспоживання.

Питоме теплоспоживання основної частина будівель знаходиться в діапазоні $50\text{--}140 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$. Розміри розглянутих будівель різні (від 50 до 25000 м^3). На рис. 4.22 наведений розподіл об'єктів за питомим енергоспоживанням.

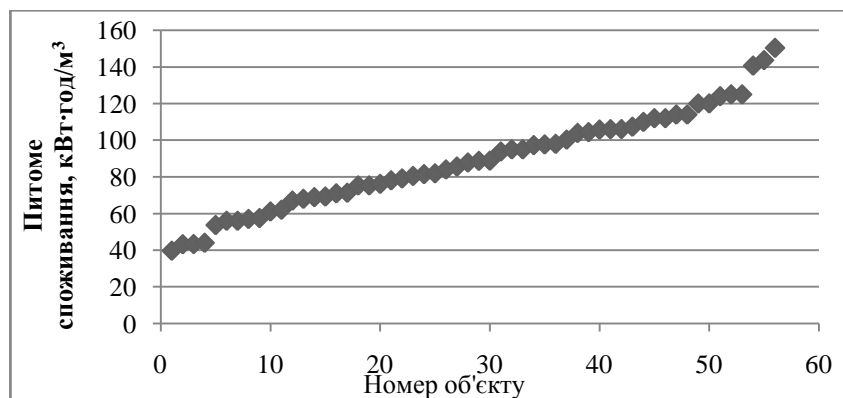


Рис. 4.21 – Питоме споживання об'єктів соціальної сфери [193]

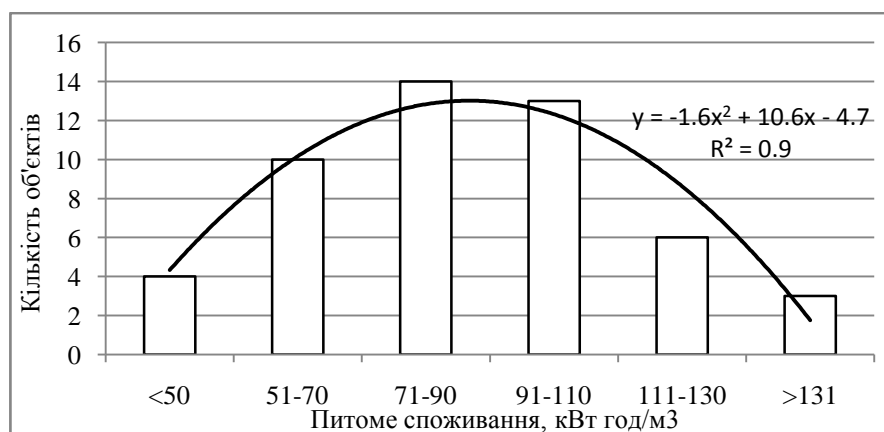


Рис. 4.22 – Скорегований розподіл об'єктів за питомими значеннями теплоспоживання будівель [193]

За сучасними вимогами норма споживання теплової енергії становить: 31 кВт·год/м³ для шкіл, ДНЗ – 36 кВт·год/м³; заклади охорони здоров'я (амбулаторії, лікарні, фельширсько-акушерські пункти (ФАП)) – 47 кВт·год/м³.

Згідно з нормами, які діяли в період зведення будівель [90, 91], норма споживання теплової енергії залежить від регіону, об'єму будівлі, року побудови. 70% розглянутих будівель побудовані в період 1970–1990 рр., деякі будівлі збудовані навіть в другій половині XIX сторіччя [193].

Для бюджетних закладів, побудованих після 1981 року, норма споживання теплової енергії збільшилася порівняно з будівлями, зведеними до 1980 року. Зі збільшенням об'єму будівлі нормоване питоме значення споживання теплової енергії зменшується. Для Львівської і Вінницької області норми споживання теплової енергії однакові, та дещо більші порівняно з Кіровоградською областю

[90, 91], що пов'язано з урахуванням кліматичних умов (табл. 4.2). Порівняно з новими діючими нормами споживання теплової енергії, старі норми більші на 10-15 кВт·год/м³. 85% розглянутих будівель становлять школи та ДНЗ. Тому доцільно при створенні шкали енергетичної сертифікації брати до уваги ДНЗ та школи [193].

Таблиця 4.2 – Нормативні значення споживання теплової енергії, які діяли в період зведення будівель [91]

Призначення будівлі	ДНЗ				Школи					
	до 5 тис. м ³		понад 5 тис. м ³		до 5 тис. м ³		5-10 тис. м ³		понад 10 тис. м ³	
Об'єм	до 1980	після 1980	до 1980	після 1980	до 1980	після 1980	до 1980	після 1980	до 1980	після 1980
Рік побудови	до 1980	після 1980	до 1980	після 1980	до 1980	після 1980	до 1980	після 1980	до 1980	після 1980
	кВт·год/м ³									
Вінницька обл.	49	52	44	48	45	49	40	44	38	41
Кіровоградська обл.	46	50	41	47	43	47	38	42	36	38
Львівська обл.	49	53	44	49	45	49	41	44	38	41

Загальна кількість шкіл у вибірці 32. Середнє питоме споживання даною групою 84 кВт·год/м³ (рис. 4.3). Аналізуючи школи за роками побудови, то 60% шкіл побудовані в період 1960–1980 рр. Нормативні значення для будівель побудованих до 1980 року менші ніж для будівель з 1981 року, по фактичним даним картина обернена. Це пов'язано з тим, що будівлі збудовані в ХІХ сторіччі мають кращі теплофізичні властивості огорожень, та зменшують загальні показники фактичного теплоспоживання [193].

Окремо розглянута група об'єктів ДНЗ. Майже всі побудовані до 1981 року (80%). Середнє питоме споживання даною групою 93 кВт·год/м³ (табл. 4.3).

За інвестиційним проектом впроваджуються наступні заходи: заміна старих вікон на нові двокамерні металопластикові вікна з енергозберігаючим покриттям, утеплення та перекриття даху з реконструкцією стропильної системи, утеплення зовнішніх стін, заміна котлів. Під час встановлення сучасних металопластикових вікон особлива увага звертається на необхідність дотримання вимог стосовно

повітрообміну, що може бути вирішено за рахунок улаштування припливно-витяжної системи вентиляції з рекуперацією теплоти [193].

Таблиця 4.3 – Фактичне питоме теплоспоживання будівель закладів соціальної сфери

Рік побудови	до 1980		з 1980	
	до 5 тис. м3	від 5 тис. м3	до 5 тис. м3	від 5 тис. м3
	кВт·год/м ³			
Школи	85	78	85	77
ДНЗ	94	–	83	–

Аналіз впровадження заходів, передбачених проектом, показав, що вони дозволяють заощадити 15% теплової енергії. Загалом по 60 об'єктах бюджетних установ соціальної сфери після впровадження енергозберігаючих заходів, передбачених проектом, зменшується споживання на 647 т.у.п. [193].

Під час енергетичної оцінки стану закладів були запропоновані також додаткові заходи з підвищення енергоефективності: заміна застарілих джерел енергії на сучасні, промивка системи опалення, реконструкція системи опалення, встановлення автоматики погодного регулювання, клімат-контроль тощо. Впровадження всіх рекомендованих заходів в комплексі дозволить значно знизити енергоспоживання об'єктів (на 20–50%) та знизить грошові витрати на утримання об'єктів соціальної сфери. Група будівель, що розташовані в м. Києві досить близькі за енергетичними характеристиками між собою та мають значно вищий рівень енергоефективності порівняно з групою об'єктів в рамках проекту УФСІ, що знаходяться на нижній границі енергоефективності. Специфіку цих об'єктів потрібно враховувати при енергетичній сертифікації. Це можна досягти шляхом створення нерівномірної шкали енергетичної сертифікації [193].

4.3.2 Задачі сертифікації та оцінка рівня енергоефективності заходів з енергозбереження

В Україні налічується близько 98 тисяч бюджетних закладів, зокрема, з них: 16,4 тис. – дошкільних навчальних закладів (ДНЗ), 19,7 тис. – загальноосвітніх навчальних заклади, 19,2 тис. – бібліотек, 8,3 тис. – лікарських амбулаторно-поліклінічних закладів, 2,4 тис. – закладів охорони здоров'я. [194]

Одним з елементів оцінки ефективності використання енергетичних ресурсів є енергетична сертифікація об'єктів – споживачів ресурсів, або енергетична сертифікація, як це прийнято в світовій термінології, зокрема в стандартах ЄС. [16, 17] Енергетична сертифікація будівель — це метод для підвищення енергоефективності, мінімізації енергоспоживання та зниження негативного впливу на довкілля. Сертифікація будівель з точки зору ефективності використання енергетичних ресурсів створює основу для оцінки та порівняння енергоспоживання різних будівель. Також рейтингова система слугує основою для фінансово-матеріального заохочення або покарання, а отримання класу енергоефективності створює передумови та стимули для проектування нових екоенергоефективних будівель, термомодернізації існуючих будівель тощо.

Відповідно до [16, 17, 92, 95] сертифікат характеристики енергетичного стану будівлі включає еталонні значення нормативних і фактичних показників, щоб користувачі могли порівняти і оцінити енергетичну ефективність будівлі, та супроводжується рекомендаціями щодо рентабельного покращення останньої.

На першому етапі введення енергетичної сертифікації будівель в Україні застосовувалися правила визначення меж класів енергоефективності відповідно до [92], що полягають у визначенні відхилення енергетичного рейтингу будівлі від нормативно встановлених значень величин витрат енергії на одиницю опалюваної об'єму будівлі. [35] В таблиці 4.4 наведено шкалу для визначення класів енергоефективності відповідно до підходів стандарту [35].

На другому етапі запровадження енергетичної сертифікації будівель в Україні, що настає після накопичення достатньо відомостей про рівень

енергоспоживання існуючого будівельного фонду, застосовуються правила визначення меж класів енергоефективності відповідно до ДСТУ Б EN 15217 [16].

Таблиця 4.4 – Класифікація будівель за енергетичною ефективністю [92]

Класи енергетичної ефективності будинку	Різниця у % енергетичного рейтингу будівлі $q_{\text{буд}}$, від максимально допустимого значення, E_{max} або R_r , $[(q_{\text{буд}} - E_{\text{max}}) / E_{\text{max}}] \cdot 100\%$
A	мінус 50 та менше
B	від мінус 49 до мінус 10
C	від мінус 9 до 0
D	від 1 до 25
E	від 26 до 75
F	76 та більше

Згідно з [16] загальний принцип побудови нерівномірної шкали ефективності енергоспоживання будівель базується на використанні нормативних R_r (відповідає вимогам сучасних норм для типу будівлі, приймається згідно з ДБН В.2.6-31) та фактичних R_s (відповідає середньостатистичному фактичному показнику типу будівлі) даних про енергоспоживання типових будівель. [16]

Таблиця 4.5 – Підходи до визначення класів енергетичної сертифікації будівель відповідно до ДСТУ Б EN 15217 [16]

Класи енергетичної ефективності будинку	Правила визначення меж класів енергетичної ефективності
A	$EP < 0,5R_r$
B	$0,5 \cdot R_r \leq EP < R_r$
C	$R_r \leq EP < 0,5 \cdot (R_r + R_s)$
D	$0,5 \cdot (R_r + R_s) \leq EP < R_s$
E	$R_s \leq EP < 1,25 \cdot R_s$
F	$1,25 \cdot R_s \leq EP < 1,5 \cdot R_s$
G	$1,5 \cdot R_s \leq EP$

Згідно з технічною термінологією, прийнятою у європейському стандарті ДСТУ Б EN 15217 [16], шкала градації (віднесення) питомих показників ресурсоспоживання у будівлях налічує 7 класів - від «А» до «G». При цьому, межі

кожного класу різняться залежно від типу будівлі: школа, дошкільна установа, лікарня, тощо. Даний підхід нерівномірної побудови шкал не набув широкого вжитку у зв'язку відсутністю середньостатистичних фактичних показників типу будівлі.

Тому на третьому етапі введення шкал енергетичної сертифікації в Україні в 2016 році в стандарті [95] запропонована нова рівномірна шкала енергетичної сертифікації, що близька за підходами визначення класів наведених в стандарті [92] (рівномірна), але має на відмінну від [92] не 6, а 7 класів [95], аналогічна до країн Європи. В таблиці 4.6 наведено шкалу для визначення класів енергоефективності відповідно до підходів стандарту [95].

Таблиця 4.6 – Класифікація будівель за енергетичною ефективністю [95]

Класи енергетичної ефективності будинку	Різниця у % енергетичного рейтингу будівлі E_P , від максимально допустимого значення, E_{max} або R_r , $[(E_P - E_{P_{max}}) / E_{max}] \cdot 100\%$
A	мінус 50 та менше
B	від мінус 49 до мінус 10
C	від мінус 9 до 0
D	від 1 до 25
E	від 26 до 50
F	від 51 до 75
G	76 та більше

У європейських стандартах, що визначають процедуру та порядок проведення енергетичної сертифікації будівель визначено необхідність розробки методу оцінки енергоефективності як нових, так і існуючих будівель. У зв'язку з цим у ДСТУ EN 15603:2013 [17] запропоновано два типи енергетичних рейтингів будівель: розрахунковий та інструментальний рейтинг.

Побудова шкал енергоефективності потребує значень нормативного споживання, середнього фактичного споживання, а також фактичного споживання енергії по категорії будівель. Відповідно інформація, яка ґрунтується не тільки на проектних даних, але й на враховані фактичних даних – відсутня.

З вище наведено аналізу слідує, що для громадських будівель розташованих в м. Києві клас енергоефективності можна визначити за рівномірною шкалою відповідно до стандарту [95]. На рисунку 4.23 наведено розподіл об'єктів по класам енергоефективності до та після впровадження енергозберігаючих заходів.

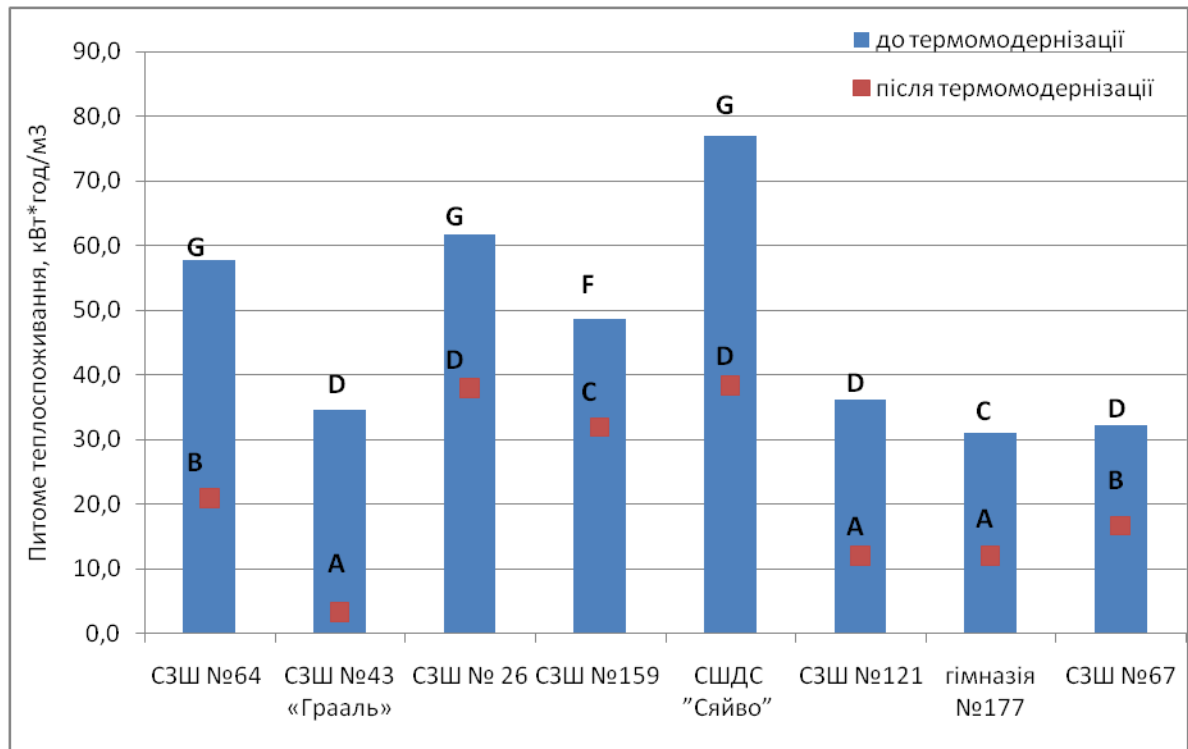


Рис. 4.23 – Розподіл об'єктів за класами енергоефективності до та після впровадження енергоефективних заходів

При застосуванні шкали енергетичної сертифікації за підходами [95] до громадських будівель, розглянутих в рамках проекту УФСІ, потрапляють в клас енергоефективності "G". Заходи з підвищення енергоефективності, розглянуті в рамках проекту, дозволяють перейти до класу "F" в частині будівель, а частина лишається без змін, тому дані будівлі потребують інших підходів до енергетичної сертифікації.

4.7.3 Побудова шкали енергоефективності

При побудові шкали енергетичної сертифікації будівель на розкид меж класів енергоефективності впливає співвідношення фактичних та нормативних значень енергоспоживання. На рис. 4.24 наведено вплив на загальний інтервал шкали та розподіл шкали на інтервали зміни нормативних значень R_r (рис. 4.24,а) та розрахункових/фактичних значень R_s (рис. 4.24,б) при співвідношеннях $R_r/R_s = \{0,3; 0,5; 0,8\}$ [196].

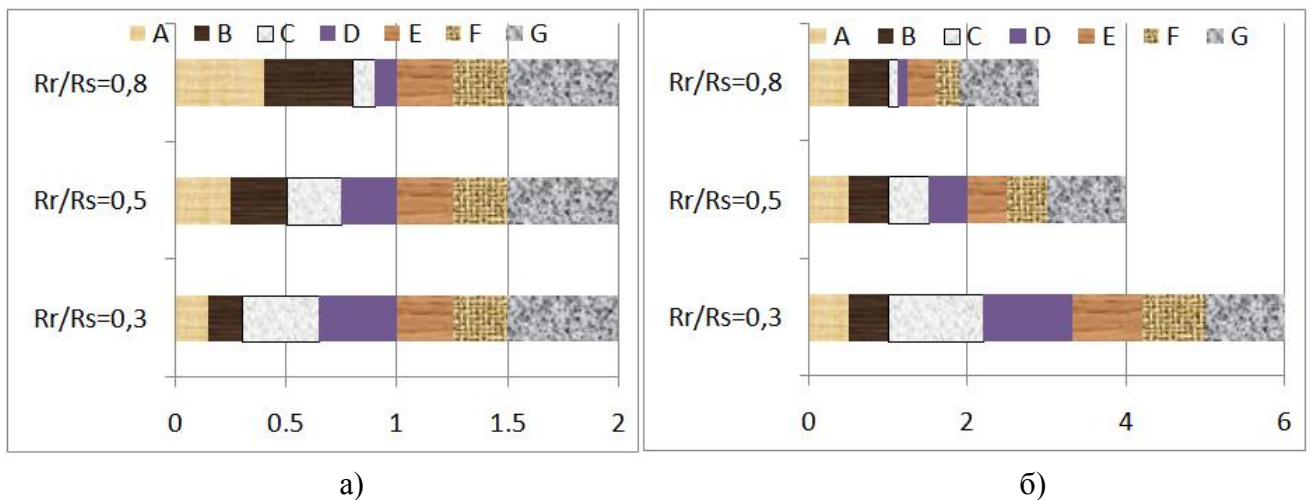


Рис.4.24 – Вплив зміни співвідношень R_r/R_s на положення класів енергетичної ефективності при варіюванні нормативних даних (а) та при варіюванні фактичних даних (б) [196]

З рис. 4.24 слідує, що варіації величини R_r більше впливає на розподіл інтервалів у верхній частині шкали, а зміна R_s – у нижній. Крім того, величина R_s при зміні співвідношень R_r/R_s впливає на величину загального інтервалу шкали. Тобто, коли співвідношення R_r/R_s прямує до одиниці, розкид шкали зменшується.

Відповідно до підходів, що запропоновані європейським стандартом ДСТУ EN 15217:2013 [16] основна частина будівель в рамках проекту УФСІ потрапляє в середину шкали (клас E, D). Заходи, які впроваджуються на об'єктах не завжди дають можливість достатньо зменшити питоме енергоспоживання, щоб забезпечити перехід з класу в клас, тому що не в повному обсязі виконана термомодернізація, недотримання комфортних умов до термомодернізації. Для кращої оцінки впроваджених заходів рекомендується розбити кожен клас на

підкласи, що відповідає підходам стандарту [16]. Отже, шкала енергетичної сертифікації будівель матиме 14 класів.

Проект УФСІ реалізується для більшості об'єктів розташованих в сільській місцевості. В кожному селі є школа та ДНЗ. Основним завданням була розробка універсальної шкали енергетичної сертифікації. З вище наведеного аналізу, фактичні значення для Шкіл та ДНЗ не суттєво відрізняються, аналогічно і з нормативними значеннями, що є підставою, розглядати всі об'єкти разом.

Проведено аналіз відхилень EP (показник енергоефективності – energy performance indicator) від лівої межі класу для трьох варіантів: 1) $R_{г.сер}$, $R_{с.сер}$; 2) $R_{г}$ для кожної групи ($R_{г} = \{31, 36, 47\}$), $R_{с.сер}$; 3) $R_{г}$, $R_{с}$ для кожної групи. На рис. 4.25 наведено розподіл об'єктів по відхиленням для середніх значень.

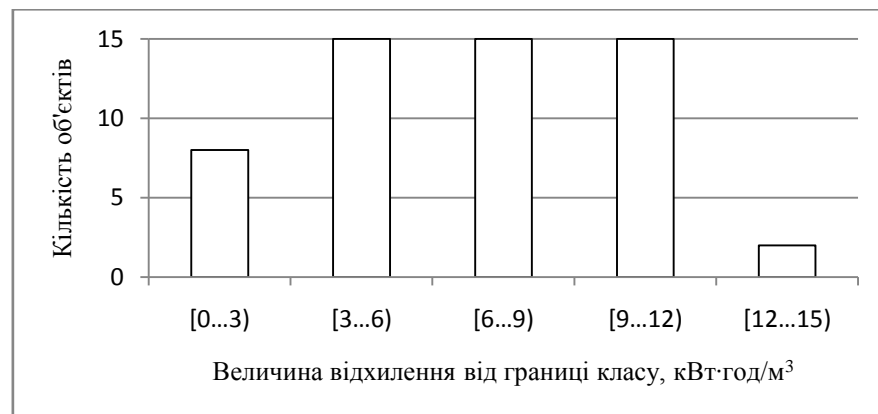


Рис. 4.25 – Відхилення об'єктів від лівої границі класу при умові, що $R_{г.сер}$, $R_{с.сер}$ [196]

Більшість об'єктів потрапляють в діапазон відхилень [3...12). Для інших варіантів аналізу даних збільшується кількість об'єктів, котрі знаходяться в діапазоні [0...3), але основна частина розглянутих об'єктів потрапляє в групу відхилень [6...9) [196].

Запропонована шкала енергетичної ефективності закладів соціальної сфери на 14 класів побудована за правилами наведеними в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Побудова шкали енергетичної сертифікації з розбивкою на 14 класів енергоефективності

Класи енергетичної ефективності будинку	Правила визначення меж класів енергетичної ефективності
A	$EP < 0,25R_T$
A*	$0,25R_T \leq EP < 0,5R_T$
B	$0,5R_T \leq EP < 0,75R_T$
B*	$0,75 \cdot R_T \leq EP < R_T$
C	$R_T \leq EP < 0,75R_T + 0,25R_S$
C*	$0,75R_T + 0,25R_S \leq EP < 0,5 \cdot (R_T + R_S)$
D	$0,5 \cdot (R_T + R_S) \leq EP < 0,25R_T + 0,75R_S$
D*	$0,25R_T + 0,75R_S \leq EP < R_S$
E	$R_S \leq EP < 1,125 \cdot R_S$
E*	$1,125R_S \leq EP < 1,25 \cdot R_S$
F	$1,25 \cdot R_S \leq EP < 1,375 \cdot R_S$
F*	$1,375 \cdot R_S \leq EP < 1,5 \cdot R_S$
G	$1,5 \cdot R_S \leq EP < 1,625 \cdot R_S$
G*	$1,625 \cdot R_S \leq EP$

На рис. 4.26 наведено шкалу енергетичної ефективності об'єктів соціальної сфери.

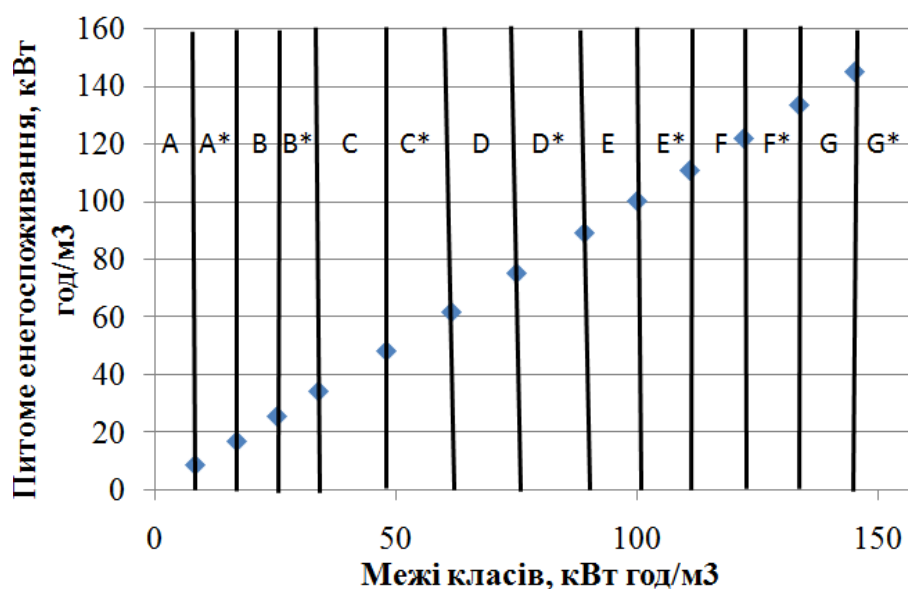


Рис. 4.26 – Шкала енергетичної сертифікації об'єктів соціальної сфери [196]

За проектом передбачено виконання наступних основних енергозбігаючих заходів: заміна вікон на двокамерні енергозберігаючі склопакети; заміна вхідних дверей металопластиковими; встановлення рекуператорів теплоти у коридорах, спортивних та актових залах; перекриття даху з заміною стропильної системи та його утепленням; заміна або встановлення сучасних котлів; реконструкція системи опалення. Також за проектом на деяких об'єктах передбачено утеплення зовнішніх стін, встановлення теплових насосів, впровадження електричного опалення, і т.д.

Після впровадження енергозберігаючих заходів передбачених проектом досягається наступний відсоток економії теплової енергії (рис. 4.27).

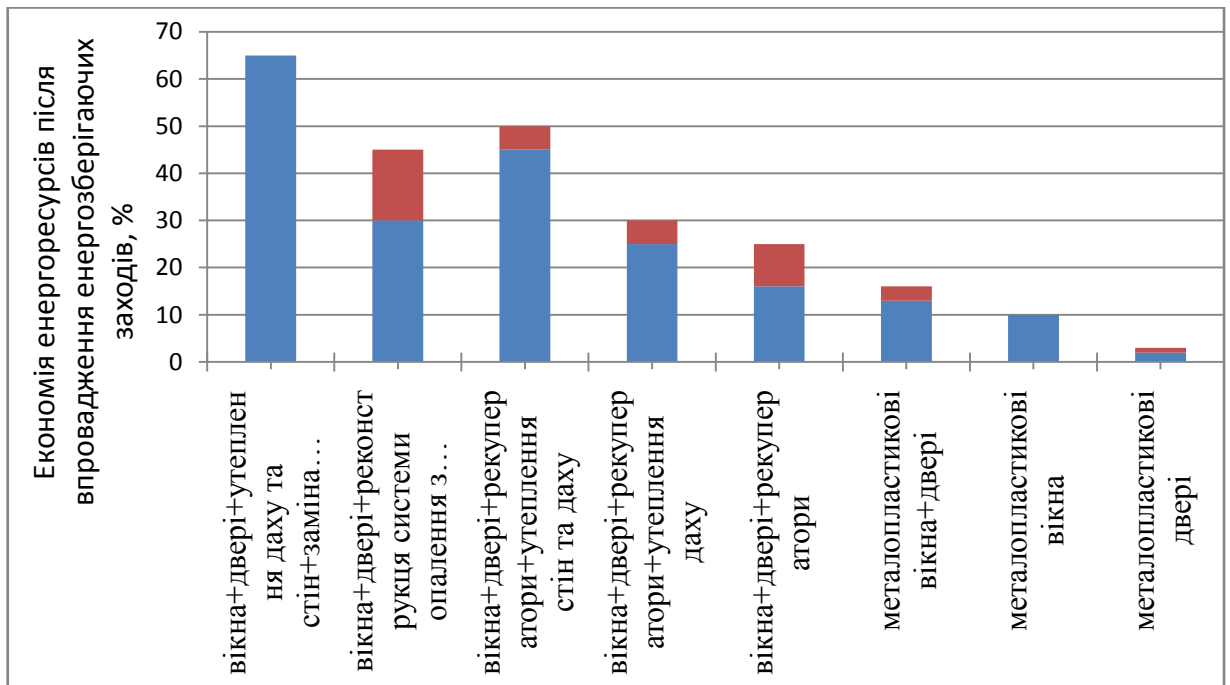


Рис.4.27 – Рівень економії теплової енергії від впровадження комплексу енергозберігаючих заходів [196]

Енергозберігаючі заходи при впровадженні в комплексі мають більший ефект, ніж коли їх впроваджувати поодинокі. На рис. 4.18 червоним кольором показано діапазон економії теплової енергії від впровадження комплексу енергозберігаючих заходів на різних об'єктах. В діапазон 15-25% очікуваної економії енергоресурсів від впровадження енергозберігаючих заходів потрапляє найбільша кількість об'єктів [196].

На рис. 4.28 наведено розподіл об'єктів за відсотком економії після реалізації передбачених проектом заходів.

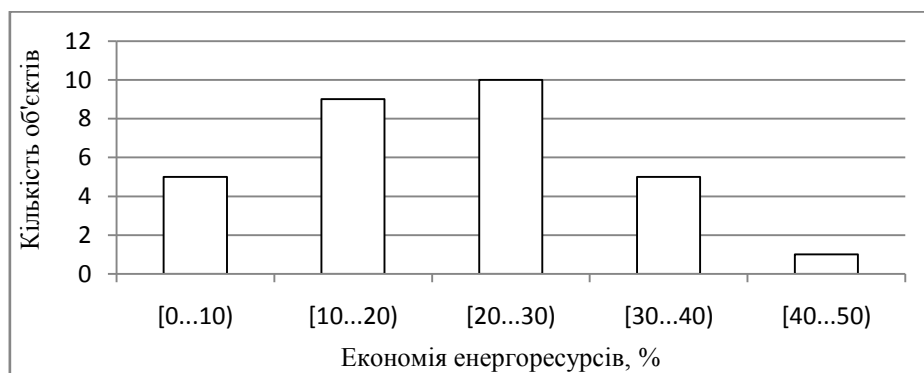


Рис.4.28 – Розподіл об'єктів за відсотком економії від впроваджених енергозберігаючих заходів [196]

На рис. 4.29 наведена зміна питомого теплоспоживання по об'єктам до та після впровадження енергозберігаючих заходів (ЕЗЗ). Горизонтальними лініями нанесені межі класів енергоефективності.

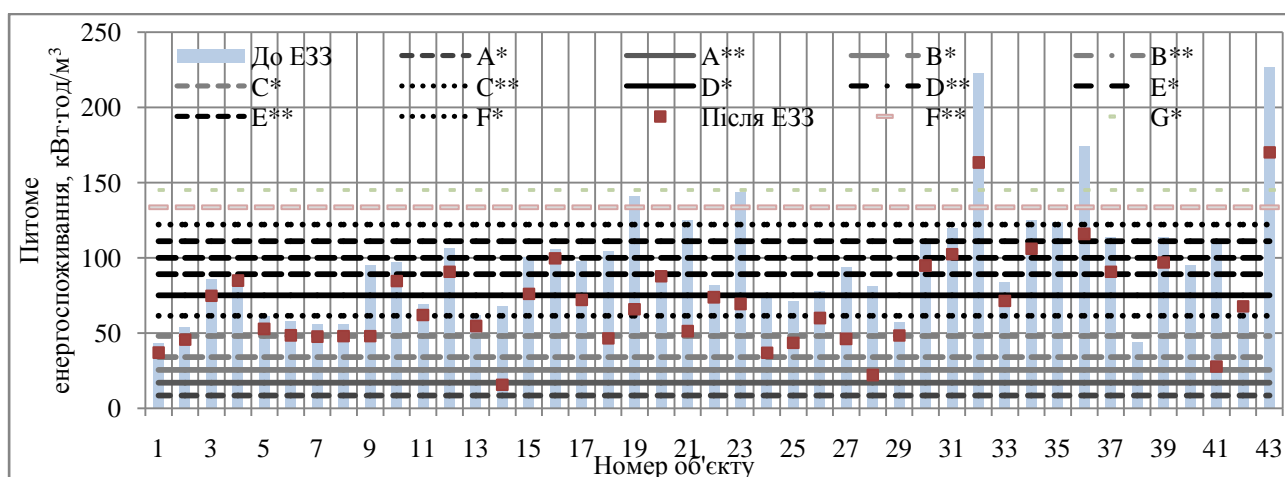


Рис. 4.29 – Питоме енергоспоживання будівель до та після впровадження енергозберігаючих заходів та межі класів енергоефективності [196]

На більшій кількості об'єктів клас енергетичної ефективності покращується на одну сходинку. Застосування даної шкали дозволяє оцінювати клас енергоефективності бюджетних закладів соціальної сфери. Запропонована шкала

енергетичної ефективності дозволяє оцінити покращення класу енергоефективності при малому поступі від енергозберігаючих заходів [196].

4.4 Використання динамічних моделей для прогнозування рівня опалення будівлі ВНЗ

Більшість бюджетних закладів функціонують за розкладом, що характеризується присутністю у них персоналу та відвідувачів протягом короткострокового періоду упродовж доби. Тобто, комфортні санітарно-гігієнічні умови для їх перебування у приміщеннях необхідно створити на цей період часу і є можливість запровадження чергового графіку роботи системи опалення будівлі, який характеризується зниженням споживання теплової енергії будівлею у не робочі години закладу [152, 197]. Для ефективного впровадження таких режимів опалення необхідно звернути увагу на теплову інерцію огорожуючих конструкцій, яке є у приміщеннях будівлі та її вплив на тепловий режим і визначення діапазону зниження температури теплоносія, що надходить до системи опалення [152]. Вирішення задач переривчастого опалення реалізується за допомогою динамічних моделей будівель.

Для ВНЗ СумДУ створено та передано три динамічні моделі, а саме: 5R1C (рис. 2.2.), 9R2C (рис. 4.30) та 9R2C (рис. 4.31). Для створення сіткових моделей досліджуваної теплової системи [20], було визначено активні термічні опори, конвективного теплообміну та теплоємність повітря і усіх конструкцій досліджуваного об'єкту [198].

Термічний опір непрозорих елементів конструкцій визначено за виразом (к/Вт):

$$R_o = \frac{\delta}{\lambda \cdot F}, \quad (4.3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К);

δ - товщина огороження, м.

F - площа поверхні огородження, м^2 .

Конвективні опори теплообміну:

$$R_K = \frac{1}{\alpha_K \cdot F}, \quad R_{HC} = \frac{1}{\alpha_{HC} \cdot F}, \quad (4.4)$$

де α_K та α_{HC} – коефіцієнти конвективного теплообміну на внутрішній та зовнішній поверхнях, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

Теплоємність непрозорих елементів огороджуючих конструкцій розраховувалася за виразом:

$$C_O = F \cdot \delta \cdot \rho_O \cdot c_O, \quad (4.5)$$

де ρ_O та c_O – густина та питома масова теплоємність матеріалу огороджуючих конструкцій, відповідно $\text{кг}/\text{м}^3$ та $\text{Дж}/(\text{кг К})$.

Тепловий опір віконних та дверних отворів розраховується через значення питомого опору та вже враховує конвективний опір теплообміну

$$R_O = \frac{r}{F}, \quad (4.6)$$

r - типовий опір огородження з стандартів [92], $(\text{К м}^2)/\text{Вт}$,

Теплоємності внутрішнього повітря C визначалися за формулами:

$$C_O = V \cdot \rho \cdot c, \quad (4.7)$$

де V – об'єм повітря у кімнаті, м^3 ;

ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c – питома теплоємність повітря, $\text{Дж}/(\text{кг К})$.

Теплоємність внутрішнього повітря значно менша в порівнянні з огородженнями, тому даною величиною можна знехтувати.

Геометричні та теплофізичні властивості розглянутого репрезентативного приміщення СумДУ наведені в розділі 2.1. На базі стандарту ДСТУ ISO EN

13790:2011 [23] створена сіткова модель 5R1C (рис. 2.2) для репрезентативного приміщення.

Розвинено сіткову модель кімнати, де розділені внутрішні та зовнішні непрозорі елементи конструкції (рис. 4.30).

Моделі на рис. 4.30-4.31 та 2.2 дозволяють проводити якісне регулювання рівня опалення, відповідно до підходів типових для України, в залежності від зовнішньої температури. Сонячні теплонадходження в енергетичному балансі кімнати мають суттєвий вплив в години пікової сонячної активності. На рис. 4.31 наведено динамічну модель кімнати, що дозволяє розраховувати рівень опалення та/або внутрішню температуру повітря з врахування сонячних теплонадходжень в зону кімнати. Сонячні теплонадходження мають наступний механізм розподілу: частина сонячних теплонадходжень надходить на поверхню, а частина до масиву внутрішніх та зовнішніх огорожень.

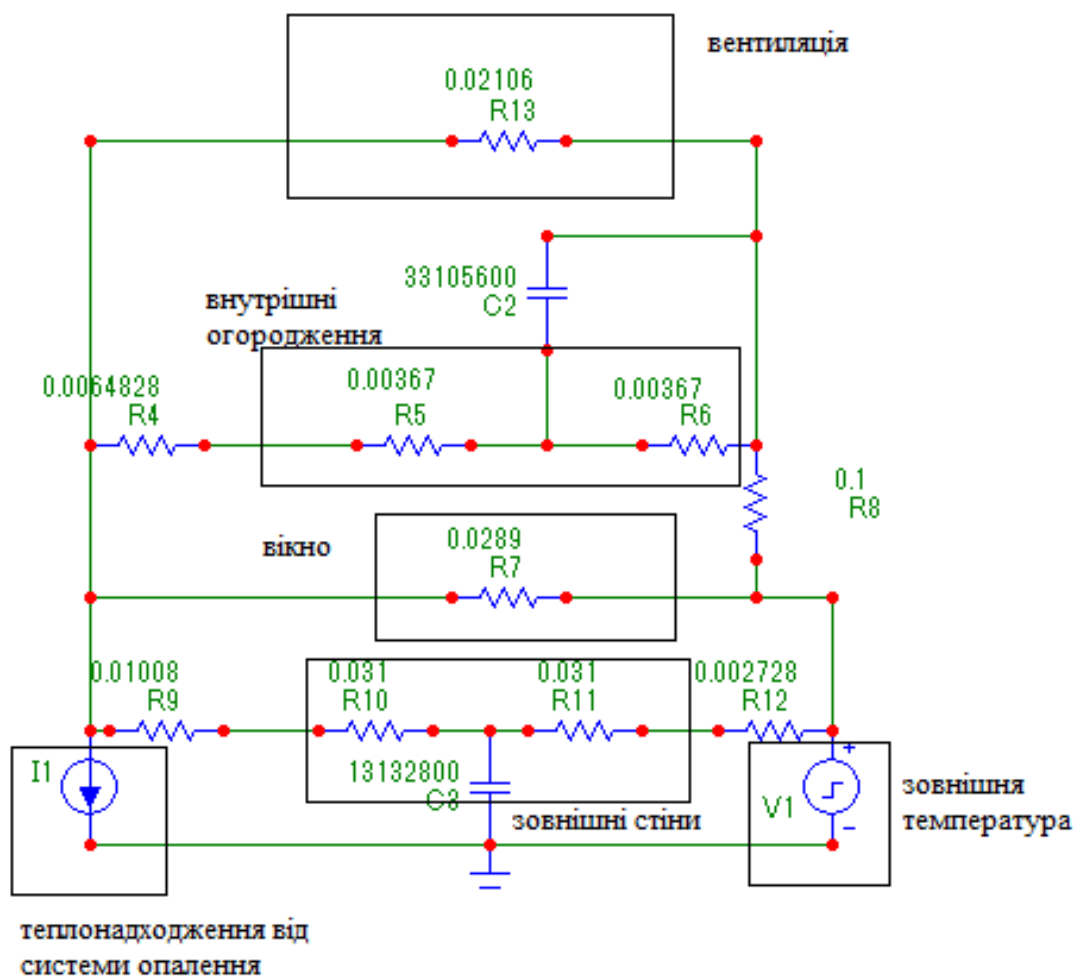


Рис. 4.30 – Модель дев'ять опорів, дві ємності (9R2C)

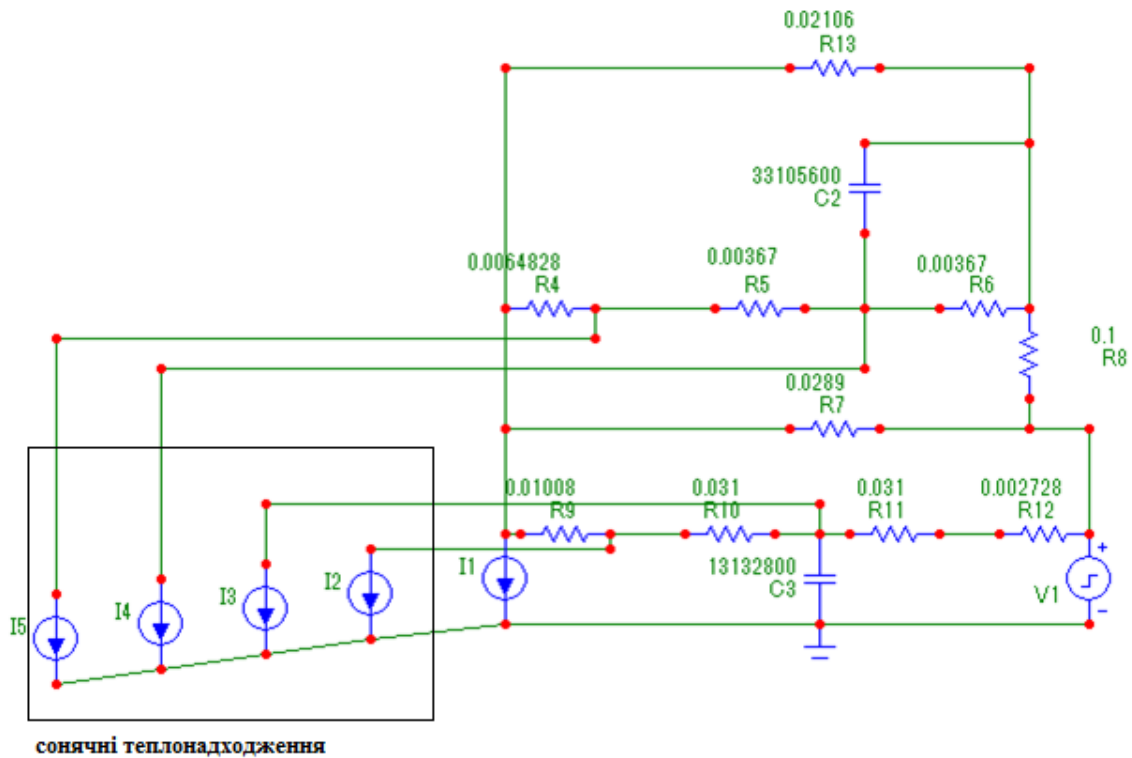


Рис. 4.31 – Модель дев'ять опорів, дві ємності (9R2C) з врахуванням сонячних теплонадходжень

В залежності від орієнтації приміщення, періоду року та складності фіксування/прогнозування рівня опалення може використовуватися модель наведена на рис. 4.30-4.31.

Динамічні сіткові моделі кімнати реалізовані на базі наступних програмних продуктів: Mathcad, Micro-Cap, MATLAB. Створені моделі передані до служби енергетичного менеджменту СумДУ, що можуть бути використанні для аналізу постійних та переривчастих режимів опалення, та прогнозування температурного стану приміщення.

Висновки до розділу

В розділі 4 розглянуто використання моделювання для вирішення задач підвищення енергоефективності різних об'єктів: навчальний корпус КПІ ім. Ігоря

Сікорського та СумДУ, об'єкти громадського призначення розташовані в м. Києві та регіонах України.

1. В результаті проведених досліджень за допомогою створеної нестационарної моделі кімнати в програмному середовищі EnergyPlus опрацьовані методи та отримані дані для визначення режимів переривчастого опалення будівель, на прикладі навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського. Враховані особливості конструкцій оболонки та зміни погодних умов.

Розглянуто різні варіанти переривчастого опалення неробочі годин та визначено економічний ефект від впровадження регулювання системи опалення. Визначено характеристики за умови постійного регулювання рівня опалення добовий графік зміни внутрішньої температури повітря починає просідати, тому для вирівнювання графіка в робочі години потрібно проводити збільшення рівня базового опалення в порівнянні з базовим рівнем при відсутності регулювання.

Форсування системи опалення дозволяє забезпечити повернення до комфортного рівня температури в робочі години без запізнення та забезпечити менше просідання графіку добової зміни внутрішнього повітря. Потрібно також враховувати, що форсування системи опалення потребує значного запасу потужності системи опалення, тому рівень зниження температури в неробочі години має ряд обмежень.

Використання різних графіків переривчастого опалення розглянутих в роботі дозволяють скоротити споживання теплової енергії на 2-9% для розглянутого типу будівель масової забудови.

2. Отриманні фактичні данні значень середніх температур приміщень навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського в залежності від впливу ряду факторів. Вони можуть слугувати при розробці та тестуванні математичних моделей теплового стану будівель.

В результаті проведених досліджень отримано та проаналізовано інформацію по розподілу середніх температур приміщень, за певні періоди 2003-2014 рр. Визначено кількісні значення зміни діапазону та рівня відмінностей температур приміщень під впливом рівня опалення, режиму експлуатації, погодних умов для

будівлі в цілому та для окремих груп приміщень за призначенням. Середня температура повітря в робочі годин в навчальному корпусі коливалась в межах 15-17°C, а по групам приміщень: адміністративні – 17-22°C; навчальні - 15-18°C; лабораторно-дослідницькі – 13-16°C ; комп'ютерні класи – 14-16°C. З пониженням поверху середня температура розташованих на них приміщень понижується на 0,5°C.

3. За рахунок аналізу добової зміни температур контрольних приміщень для кожної групи визначено сукупний вплив опалення, сонячної радіації, внутрішніх теплонадходжень на середній рівень та коливання в часі температур приміщень. Відхилення середньої температури в робочі години від середніх добових значень спостерігалось в межах 0,5...2,5°C та по максимуму – до 6°C. В навчальних аудиторіях та в адміністративних приміщеннях в години сонячної активності має місце схожа поведінка добових коливань внутрішньої температури, але протяжність зміни температури в робочі години значно більша (4-5 годин) у порівнянні з вихідними днями, тому температурний пік більш гострий.

Отримані результати дозволили визначити основні фактори впливу на зміну внутрішньої температури приміщення: сонячна радіація - 2...4°C; графік опалення - 2...3°C; режим роботи (теплонадходження від людей) – 1,5...2°C; додаткові обігрівачі – 2...3°C.

4. Локально виміряна зовнішня температура повітря з південної та північної сторони будівлі вища від зовнішньої температури отриманої з метеоданих, що може впливати на фактичні енергетичні баланси будівлі за виміряними даними.

5. На базі експериментальних даних було визначено фактори, які найбільш суттєво впливають на внутрішню температуру повітря. На основі імітаційного моделювання в програмному продукті EnergyPlus досліджено відокремлений вплив кожного фактору та побудована регресійна модель для визначення внутрішньої температури повітря. На базі створеної регресійної залежності проведено уточнення кратності повітрообміну відповідно до експериментальних даних. Кратність повітрообміну є залежною величиною від ряду факторів: різниці температур повітря всередині та ззовні будівлі, швидкості і напрямку вітру,

вітрового тиску. Для розглянутого інтервалу часу кратність повітрообміну коливалась в діапазоні $0,2 \dots 2 \text{ год}^{-1}$.

6. Розглянуті громадські будівлі розташовані в м. Києві, що мають відмінності у функціонуванні та використанні корисної площі. На базі квазістаціонарного методу розрахунку [94] визначено питоме енергоспоживання до та після впровадження енергозберігаючих заходів та визначено клас енергетичної ефективності на базі підходів [95].

Також у роботі проаналізовано стан більш ніж 60 типових громадських будівель, розташованих в сільській місцевості Вінницької, Кіровоградської та Львівської області, що мають відмінності в експлуатації в порівнянні з об'єктами розташованими в м. Києві. На основі проведених досліджень оцінено економічний ефект від провадження енергозберігаючих заходів в рамках проекту «Сприяння розвитку соціальної інфраструктури», надано рекомендації щодо впровадження додаткових заходів з підвищення енергоефективності. Виведення подібних об'єктів на рівень сучасних вимог по класу енергоефективності потребує додаткових обсягів фінансування, які за сучасних умов не можуть бути забезпечені одночасно, і скоріше за все будуть з'являтися поетапно. Врахування цих особливостей робить створена спеціальна шкала енергоефективності для даної групи, яка надає можливість відстежити та уточнити клас в процесі поетапної термомодернізації. На основі проведених досліджень оцінено рівень енергоефективності об'єктів до та після рекомендованих заходів. Запропоновано підходи енергетичної сертифікації будівель невеликих міс та селищ. Отримані результати та шкали енергетичної сертифікації будівель передані до фонду УФСІ та селищним та міським громадам, які брали участь у проекті.

7. Для СумДУ розроблено ряд динамічних математичних моделей для аналізу та прогнозування енергетичних характеристик будівель для постійних та переривчастих режимів опалення. Дані моделі передані в службу енергетичного менеджменту університету.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить нові науково обґрунтовані результати застосування та подальшого розвитку методів і засобів аналізу будівель як складних енергетичних систем. У процесі виконання роботи отримані наступні науково-практичні результати:

1. Для оцінювання енергоефективності будівель отримали розвиток математичні моделі та методи їх використання для визначення показників енергоефективності за рахунок уточнення розділення теплоінерційних характеристик огорожень будівлі, зміни погодних умов, що дозволяє зменшити розбіжності визначення енергопотреби в умовах країн з різкоконтинентальним кліматом.

2. Визначено умови застосування та проведено порівняння стаціонарних, квазістаціонарних та динамічних методів визначення енергетичних характеристик будівель для різних часових інтервалів розрахунку.

Динамічні методи E+ та 5R1C (погодинний розрахунок) дають майже однакове значення потреби для опалення, відмінність до 4-8%, в режимі охолодження – до 16-18% з даними кліматології IWEC. Порівняння цих даних для періоду опалення з результатами стаціонарного за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 та квазістаціонарного за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 методів розрахунку, в яких використані дані будівельної кліматології України, дає відмінність до 15% та 15-25%, відповідно, а для охолодження за квазістаціонарним методом 20-30%.

3. Розроблені методичні основи та створенні математичні моделі для прогнозування та регулювання рівня опалення на основі регресійного аналізу та врахування передісторії впливу чотирьох груп внутрішніх та зовнішніх факторів впливу. Для трьох днів передісторії лінійна багатофакторна регресійна модель потребує визначення 13 коефіцієнтів рівняння регресії. Нелінійна багатофакторна регресія дозволяє використовувати один коефіцієнт при кожному з впливових параметрів незалежно від кількості днів врахування передісторії зміни параметру, для визначення яких достатньо по одному модельному експерименту.

4. Проведено багатофакторний параметричний аналіз факторів, які включені в енергетичну систему будівлі, та визначено вагомість та динаміку їх впливу. В розглянутому діапазоні зміни параметрів їх вплив на температуру внутрішнього повітря зменшується в ряду: кратність повітрообміну, рівень опалення, зовнішня температура повітря, сонячні теплонадходження.

5. Уточнено режими переривчастого опалення будівель з врахуванням теплоінерційних та погодних умов. Економія при впровадженні рекомендованої глибини зниження температури повітря в неробочі години може досягти до 9% для типових умов грудня. В цілому для громадського сектору будівель України застосування режимів переривчастого опалення протягом опалювального сезону з врахуванням динаміки зміни умов середовища дозволить досягти економії – до 3,6 млн. Гкал.

6. На основі багаторічних спостережень температур повітря в приміщеннях отримано дані по розподілу температур в приміщеннях багатоповерхової будівлі навчального корпусу в залежності від їх розташування, використання та забезпечення рівня опалення, що дозволило розвинути комплексний підхід на основі поєднання експериментальних методів визначення розподілу температур в приміщеннях будівлі та математичних моделей локального та часового розосередження характеристик, що дозволяє визначити фактичні енергетичні характеристики.

7. Запропоновано та обгрунтовано нову шкалу енергетичної сертифікації громадських будівель, розташованих у невеликих містах та селах, що дозволяє провести оцінку енергофактивності при реалізації енергозберігаючих проектів з врахуванням особливостей розташування та функціонування об'єктів зі збільшенням кількості класів шляхом розбиття на підкласи.

8. Результати роботи використані Українським Фондом Соціальних Інвестицій, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», службами енергетичного менеджменту СумДУ та КПІ ім. Ігоря Сікорського, у навчальному процесі на кафедрі теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лавінська З., Саницька О. Соціально-екологічні аспекти енергозбереження в житлово-комунальному секторі. “GEODESY, ARCHITECTURE & CONSTRUCTION 2009” (GAC-2009), 14-16 MAY 2009, LVIV, UKRAINE. P.75-77.
2. Основні причини збитковості (низької рентабельності) підприємств та організацій житлово-комунального господарства у 2004 – 2010 роках : Аудиторський звіт Державної контрольно-ревізійної служби України. К., 2011 – 83 с.
3. Полуянов В. П., Кравченко Р. С. Перспективы развития централизованного теплоснабжения в Украине в контексте государственно-частного партнерства. *БІЗНЕСІНФОРМ*. 2012. №5. С. 109–112.
4. Долінський А.А., Басок Б.І. та ін. Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації. К.:ІТТТФ, 2007. - 828 с.
5. Енергетика світу та України. Цифри та факти / Г.К. Вороновський, С.П. Денисюк, О.В. Кириленко та ін. К.:Українські енциклопедичні знання, 2005-404 с.
6. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017№ 2118-VIII. С. 359.
7. Урядова програма з енергоефективності для населення, ОСББ та ЖБК. Динаміка попиту. Держенергоефективності, http://saee.gov.ua/sites/default/files/21%2002%202017_INFO_NEW.pdf.
8. Науменко Д. “Теплі кредити”: підсумки та перспективи. – Економічна правда, 2 березня 2017р., <https://www.epravda.com.ua/columns/2017/03/2/622212>.
9. Маркевич К. ЕНЕРГЕТИЧНА ГАЛУЗЬ УКРАЇНИ: ПІДСУМКИ 2016 РОКУ. За сприяння ДТЕК. Київ: Заповіт. 2017 р. С. 164.
10. Guy R. Newsham, Sandra Mancini, Benjamin J. Birt. Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but... *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. P. 897–905.
11. Дешко В.И., Шовкалюк М.М., Ленькин А.В. Моделирование теплового состояния помещений при измерении режимов параметров отопления. *Промышленная теплотехника*. Т.31 - 2009. №6. С. 75-80.

12. Круковский П.Г., Метель М.А., Тадля О.Ю. Возможности и проблемы применения способа экономии энергии путем регулирования температуры помещений. *Промышленная теплотехника*. 2009. №7. С. 24.

13. EN 12831:2003 E Heating systems in buildings – Method for calculation of the design heat load. (Опалювальні системи в будівлях – Розрахунок теплових навантажень). CEN, 2003. P. 76.

14. Волкова В.Н. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: учеб. пособие под ред. А.А. Емельянова / В.Н. Волкова. - М.: Финансы и статистика, 2006. - 848 с.

15. Панасенко І. О. ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА В УКРАЇНІ. Державне будівництво. 2012. № 2. С. 1-12.

16. ДСТУ Б EN 15217:2013 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ БУДІВЕЛЬ. Методи для визначення енергоефективності та для енергетичної сертифікації (EN 15217:2007, IDT). [Чиний від 16.12.2013]. Вид. офіц. К.: НДІБК, 2014. – 44 с.

17. ДСТУ EN 15603:2013 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ БУДІВЕЛЬ. Загальне енергоспоживання та проведення енергетичної оцінки (EN 15603:2008, IDT). [Чиний від 01.01.2014]. К.: НДІБК, 2014. 177 с.

18. Буяк Н.А. ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ БУДІВЛІ В УМОВАХ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ: автореф. дис...канд.тех.наук: 28.12.2017 / КПІ імені Ігоря Сікорського. Київ, 2017. 22 с.

19. Волощук В.А. МАТЕМАТИЧНОМОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВІ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПІДХОДІВ: автореф. дис...докт. тех. наук. 27.04.2018 / Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України. Київ, 2018. 44 с.

20. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий: монографія. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.

21. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1978.

22. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М., Шилкин Н.В. Энергоеффективные здания: монография. М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. - 200 с.
23. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Энергоеффективность зданий. Расчеты энергопотребления при отоплении и охлаждении (EN ISO 13790:2008, IDT). [На замену ГОСТ 26629.85; чинний з 01.01.2013]. К. : НДІБК, 2011. 229 с.
24. Петрик М., Бабюк М. Основы математического моделирования и применения математических методов в научных исследованиях. Тернопіль: Підручники і посібники, 1998. 160 с.
25. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2001. ISBN 5-9221-0120-X.
26. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Енергоеффективность в строительстве. Современные конструктивные системы, эффективные материалы и инженерное оборудование»(5 березня 2014 р., м.Київ). Київ: НДІБК, 2014. С. 68–72.
27. Mohd Ehmer, Farmeena Khan. A Comparative Study of White Box, Black Box and Grey Box Testing Techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2012. Vol. 3(6). P. 361-370.
28. Khosravani H. R., Castilla M. Del M., Berenguel M., Ruano A. E. Pedro, Ferreira M. A Comparison of Energy Consumption Prediction Models Based on Neural Networks of a Bioclimatic Building. *Energies*. 2016. Vol. 9, 57. P. 1-24.
29. Perera D. W. U., Halstensen M., Skeie N.O. Prediction of space heating energy consumption in cabins based on multivariate regression modelling. *International Journal of Modeling and Optimization*. 2015. Vol. 5, No. 6, P. 385-392.
30. Harish V.S.K.V., Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. P.1272–1292.
31. Manjarres D., Mera A., Perea E., Lejarazu A., Gil-Lopez, S. An energy-efficient predictive control for HVAC systems applied to tertiary buildings based on regression techniques. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 152. P. 409-417.

32. Robinson C., Dilkina B., Hubbs J., Zhang W., Guhathakurta S., Brown M.A., Pendyala R.M. Machine learning approaches for estimating commercial building energy consumption. *Applied Energy*. 2017. Vol. 208. P. 889-904.
33. Popescu D., Ungureanu F., Serban E. Simulation of Consumption in District Heating Systems. *ENVIRONMENTAL PROBLEMS and DEVELOPMENT*. P. 50-55.
34. Fangting Song, Yi Jiang, Anne Le Mouel, Jean-Jacques Roux Development of a data model for consumption analysis and prediction of large-scale commercial building. *Building Simulation*. 2007. P. 1601-1609.
35. ДСТУ-Н Б А.2.2.5:2007. Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції. [Уведено вперше ; чинний від 2008.07.01.]. К.: Мінрегіонбуд України, 2008. 44 с.
36. Fumo N., Biswas M.A.R. Regression analysis for prediction of residential energy consumption. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015. Vol. 47. P. 332–343.
37. German Association of Engineers, Calculation of transient thermal response of rooms and buildings – modelling of rooms. 91.140.10 (VDI 6007-1), BeuthVerlag GmbH, Düsseldorf, 2012.
38. Ding Y., Zhang Q., Yuan T., Yang K. Model input selection for building heating load prediction: A case study for an office building in Tianjin. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 59. P. 254-270.
39. Lundström L. Adaptive Weather Correction of Energy Consumption Data. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 3397 – 3402.
40. Aghdaei N., Kologiannakis G., Daly D., McCarthy T. Linear regression models for prediction of annual heating and cooling demand in representative Australian residential dwellings. International Conference on Improving Residential Energy Efficiency (IREE). *Energy Procedia*. 2017. Vol. 121. P. 79-86.
41. Reeves T., Olbina S., Raja R. A. Issa Guidelines for Using Building Information Modeling for Energy Analysis of Buildings. *Buildings*. 2015. Vol. 5 P. 1361-1388.

42. Jalaei F., Jrade A. INTEGRATING BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) AND ENERGY ANALYSIS TOOLS WITH GREEN BUILDING CERTIFICATION SYSTEM TO CONCEPTUALLY DESIGN SUSTAINABLE BUILDINGS. *Journal of Information Technology in Construction*. 2014. Vol. 19. P. 494-519.

43. Маляренко В.А., Орлова Н.А. Анализ критерия энергоэффективности зданий и сооружения. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2004. №2. С. 43-48.

44. Cowie A., Hong T., Feng X., Darakdjian Q. Usefulness of the obFMU Module Examined through a Review of Occupant Modelling Functionality in Building Performance Simulation Programs. *Building Performance Simulation*. 2016. Vol. 7. P. 1-22.

45. Hong T., Chen Y., Belafi Z., D'Oca S. Occupant behavior models: A critical review of implementation and representation approaches in building performance simulation programs. *Building Simulation*. 2017.

46. Perera W., Pfeiffer C. F., Skeie N. O. Modeling and simulation of multi-zone buildings for better control. *55th Conference on Simulation and Modelling*, 2014, Aalborg, Denmark: Linköping University Electronic Press.

47. Perera D. W. U., Pfeiffer C., Skeie N. O. Control of temperature and energy consumption in buildings. *International Journal of Energy and Environment*, 2014, Vol. 5, no. 4. P. 471-484

48. Østergård T., Jensen R.L., Maagaard S.E., A comparison of six metamodeling techniques applied to building performance simulations. *Applied Energy*. 2018. Vol. 211. P. 89-103.

49. Rahman A., Smith A.D. Predicting fuel consumption for commercial buildings with machine learning algorithms. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 152. P. 341-358.

50. Roy S. S., Roy R., Balas V. E. Estimating heating load in buildings using multivariate adaptive regression splines, extreme learning machine, a hybrid model of MARS and ELM. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82, Part 3. P. 4256-4268.

51. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T. A New Approach for Applying Dynamic Exergy Analysis and Exergoeconomics to a Building Envelope: Proceedings of Ecos 2016, The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact of Energy Systems June 19-23, 2016, Portorož, Slovenia.

52. Huang J., Gurney K.R. The variation of climate change impact on building energy consumption to building type and spatiotemporal scale. *Energy*. 2016. Vol. 111. P. 137-153.

53. Pusat S., Ekmekçi I., Akkoyunlu M.T.. Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey. *Renewable Energy*. 2015. Vol. 75. P. 144-151.

54. Maryam H., Aslani A. Analysis of energy system in Norway with focus on energy consumption prediction. Management of Sustainable Development Sibiu, Romania, Vol. 9, №1, June 2017. P. 5-14

55. Andaloro A.P.F., Salomone R., Ioppolo G., Andaloro L. Energy certification of buildings: A comparative analysis of progress towards implementation in European countries.. *Energy Policy*. 2010. Vol. 38. P. 5840–5866.

56. Koo C., Hong T., Lee M., Park H. S. Development of a new energy efficiency rating system for existing residential buildings. *Energy Policy*. 2014. Vol. 68, , P. 218-231.

57. Kazanasmaza T., Uyguna I.E., Akkurth G.G., Turhanc C., Ekmen K. E. On the relation between architectural considerations and heatingenergy performance of Turkish residential buildings in Izmir.. *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 72. P. 38–50.

58. Dall'O' G., Sarto L., Sanna N., Tonetti V., Ventura M. On the use of an energy certification data base to create indicators for energy planning purposes: Application in northern Italy. *Energy Policy*. 2015. Vol. 85. P. 207–217.

59. Kelly S., Crawford-Brown D., Pollitt M.G. Building performance evaluation and certification in the UK: Is SAP fit for purpose. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. P. 6861–6878.

60. Nunesa P., Lererb M.M., Grac G.C. Energy certification of existing office buildings: Analysis of two case studies and qualitative reflection. *Sustainable Cities and Society*. 2013. Vol. 9 P. 81–95.
61. Lombard L.P., Ortiz J., Gonzalez R., Maestre I.R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. P. 272–278.
62. Herrando M., Cambra D., Navarro M., Cruz L., Millán G., Zabalza I.. Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 125. P.141-153.
63. Mijakowski M., Narowski P., Sowa J. Integrated calculations of thermal behaviour of buildings and processes in AHU - the tool for assessment of energy performance of complex buildings. *Building Simulation*. 2009. P. 875- 882.
64. Malinowski A., Turkowski W., Muzyczak A. Thermal conditions of buildings: mathematical modeling by power circuit theory. *TECHNICAL TRANSACTIONS CIVIL ENGINEERING*. 2014. P. 299-309.
65. Panão M.J.N.O., Santos C.A.P., Mateus N.M., Carrilho da Graca G. Validation of a lumped RC model for thermal simulation of a doubleskin natural and mechanical ventilated test cell. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 121. P. 92–103.
66. Węglarz A. Narowski P. THE OPTIMAL THERMAL DESIGN OF RESIDENTIAL BUILDINGS USING ENERGY SIMULATION AND FUZZY SETS THEORY. *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November*. P. 585-592.
67. Burhenne S., Jacob D. SIMULATION MODELS TO OPTIMIZE THE ENERGY CONSUMPTION OF BUILDINGS. *Proceedings of the Eighth International Conference for Enhanced Building Operations, Berlin, Germany, October 20-22, 2008*.
68. Vivian J., Zarrella A., Emmi G., Carli M. An evaluation of the suitability of lumped-capacitance models in calculating energy needs and thermal behaviour of buildings. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 150. P. 447–465.

69. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. 2014. № 80. С. 68–72.

70.

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename_submenu=energy_simulation

71. Офіційний сайт EnergyPlus Energy Simulation Software. <https://energyplus.net/>

72. James J. Hirsch and Associates, eQUEST. <http://www.doe2.com/equest/>

73. Офіційний сайт TRNSYS Energy Simulation Software <http://www.trnsys.com>

74. <http://simulationresearch.lbl.gov/modelica>

75. ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT User's Guide Documentation. Режим доступу : <http://www.ansys.com>.

76. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике, Санкт-Петербург 2008.

77. Офіційний сайт Кампанії DISPLAY: <http://www.display-campaign.org/doc/en/index.php>.

78. Chua K.J., Chou S.K. Energy performance of residential buildings in Singapore. *Energy*. 2010. Vol. 35. P. 667–678.

79. Tronchin L., Fabbri K. A Round Robin Test for buildings energy performance in Italy. *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. P. 1862–1877.

80. D. B. Crawley *et al.* EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*. Vol.33. Pp. 443-457.

81. Andelkovic A. S., Mujan I., Daki S. Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin facade. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 118. P. 27–36.

82. *International Weather for Energy Calculations*: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR.

83. Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Wittef M.J., Glazer J. EnergyPlus:

creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*. 2001. Vol. 33. P. 319-331.

84. Crawley D.B., Winkelmann F.C., Lawrie L.K., Pedersen C.O. EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001. P. 51-58

85. Fumo N., Mago P., Luck R. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. P. 2331–2337.

86. Martin M., Afshari A., Armstrong P. R., Norford L. K. Estimation of urban temperature and humidity using a lumpedparameter model coupled with an EnergyPlus model. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 96. P. 221–235.

87. Shabunko V., Lim C.M., Mathew S. EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam. *Energy and Buildings*. 2016. P. 1-10.

88. Yu S., Cui Y., Xu X., Feng G. Impact of Civil Envelope on Energy Consumption Based on EnergyPlus. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 121. P. 1528–1534.

89. Офіційний сайт European Standards: <https://www.en-standard.eu>

90. Норми та вказівки по нормуванню витрат витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні. КТМ-204 Україна 244-94. Затверджені Держжитлокомунгоспом України 14 грудня 1993. К.: ЗАТ"ВІПОЛ", 2001. 376 с.

91. Міжгалузеві норми споживання електричної та теплової енергії для установ і організацій бюджетної сфери України. Затверджені Держкомітетом України з енергозбереження 25.10.99. К.: ЗАТ"ВІПОЛ", 2000. 104 с.

92. ДБН В.2.6_31:2006. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель. [На заміну СНиП II_3_79 ; чинний від 2007.04.01 зі Зміною №1 від 1 липня 2013 року]. К.: Мінбуд України, 2006. 70 с.

93. Deshko V.I., Shevchenko O.M University campuses energy performance estimation in Ukraine based on measurable approach. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 66. P. 582–590.

94. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні [Уведений вперше; чинний від 2015.01.01]. К. Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.

95. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель [Чинний з 08.10.2016]. К.: Державне підприємство "Укрархбудінформ", 2016. 33 с.

96. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель [На заміну СНиП II_3_79 ; чинний від 2007.04.01]. К.: Мінбуд України, 2006. 64 с.

97. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings // IOJ L 1, 4.1.2003, p. 65.

98. ДСТУ Б EN 15316-2-1:2011 Системы теплообеспечения строений. Методика расчета энергопотребления и энергоэффективности системы. Часть 2-1. Теплоотдача системой отопления (EN 15316-2-1:2007, IDT). [Уведений вперше; чинний від 12.06.2012]. К. Мінрегіонбуд України, 2012. 72 с.

99. ДСТУ Б EN 15232:2011 Энергоэффективность зданий. Влияние автоматизации, мониторинга и управления зданиями (EN 15232:2007, IDT). [Уведений вперше; чинний від 01.04.2012]. К. Мінрегіонбуд України, 2012. 115 с.

100. EN 13829: 2001 Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method. - CEN. European Committee for Standardization, 2001. P. 24.

101. EN 14501: 2005. Blinds and shutters - Thermal and visual comfort - Performance characteristics and classification. - CEN. European Committee for Standardization, 2007. P. 10.

102. ДСТУ Б EN 13779:2011 Вентиляція громадських будівель. Вимоги до виконання систем вентиляції та кондиціонування повітря (EN 13779:2007, IDT). [Уведений вперше; чинний від 01.01.2013]. К. Мінрегіонбуд України, 2012. 128 с.

103. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. ЕРГОНОМІКА ТЕПЛОВОГО СЕРЕДОВИЩА Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового

комфорту. [Уведений вперше; чинний від 30.12.2011]. К. Мінрегіонбуд України, 2012. 74 с.

104. Шевченко О.М. СИСТЕМА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ГАЛУЗІ ОСВІТИ: автореф. дис... канд.тех.наук: 28.12.2017 / КПІ імені Ігоря Сікорського. Київ, 2012. 25 с.

105. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.

106. Michalak P. The simple hourly method of EN ISO 13790 standard in Matlab/Simulink: A comparative study for the climatic conditions of Poland. *Energy*. 2014. Vol. 75. P.568-578.

107. Bruno R., Oliveti G., Arcuri N. An analytical model for the evaluation of the correction factor F_{wof} of solar gains through glazed surfaces defined in EN ISO 13790. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 96. P.1–19.

108. Jokisalo J., Kurnitski J. Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate. *Energy and Buildings*. 2007. Vol. 39. P. 236–247.

109. Orosa J.A., Oliveira A. C. Implementation of a method in EN ISO 13790 for calculating the utilisation factor taking into account different permeability levels of internal coverings. *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. P.598–604.

110. Ruiz-Pardo A., Dominguez S. A., Fernandez J. A. S. Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE-EN ISO 13790. *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. P. 763–773.

111. Fischer D., Wolf T., Scherer J., Wille-Hausmann B. A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hotwater load profiles for German households. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 124 P. 120–128.

112. Rouvel L., Zimmermann F., Berechnung des instationären thermischen Gebäudeverhaltens. LH 55 3 2004 39–46; LH 55 (4) (2004) 24- 30.

113. Neto A.H., Fiorelli F. A. S. Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption. *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40. P. 2169–2176.

114. Suganthi L., Iniyan S., Samuel A.A. Applications of fuzzy logic in renewable energy systems. *A review. Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015. Vol. 48, P. 585–607.
115. Kaytez F., Taplamacioglu M.C., Cam E., Hardalac F. Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2015. Vol. 67, P. 431–438.
116. Lu X., Lu T., Kibert C.J., Viljanen M. Modeling and forecasting energy consumption for heterogeneous buildings using a physical-statistical approach. *Appl. Energy* .2015. Vol. 144. P. 261–275.
117. Lomet A., Suard F., Cheze D. Statistical modeling for real domestic hot water consumption forecasting. *Energy Procedia.* 2015. Vol. 70. P. 379–387.
118. Aydinalp-Koksal M., Ugursal V.I. Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector. *Appl. Energy.* 2008. Vol. 85. P. 271–296.
119. Lau H.C.W., Cheng E.N.M., Lee C.K.M., Ho G.T.S A fuzzy logic approach to forecast energy consumption change in a manufacturing system. *Expert Systems with Applications.* 2008. Vol. 34. P. 1813-1824.
120. Ciabattoni L., Grisostomi M., Ippoliti G., Longhi S. Fuzzy logic home energy consumption modeling for residential photovoltaic plant sizing in the new Italian scenario. *Energy.* 2014. Vol. 74. P. 359-397.
121. Kabak M., Köse E., Kırılmaz O., Burmaoglu S. A fuzzy multi-criteria decision making approach to assess buildingenergy performance. *Energy and Buildings.* 2014. Vol. 72. P. 382–389.
123. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering.* 2016. Vol. 8. P. 65–75.
124. Khosravani H. R., Castilla M. D. M., Berenguel M., Ruano A. E., Ferreira P. M. A Comparison of Energy Consumption Prediction Models Based on Neural Networks of a Bioclimatic Building. *Energies.* 2016. Vol. 9(57).
125. Joseph C. Lam, Kevin K.W. Wan, Dalong Liu, C.L. Tsang. Multiple regression models for energy use in air-conditioned office buildings in different climates. *Energy Conversion and Management.* 2010. Vol. 51. P. 2692–2697.

126. Mottahedia M., Mohammadpourb A., Amirib S. S., Rileyb D., Somayeh A. Multi-linear Regression Models to Predict the Annual Energy Consumption of an Office Building with Different Shapes. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 118. P. 622 – 629.

127. Korolijaa I., Zhanga Y., Marjanovic-Halburdb L., Hanbya V. I. Regression models for predicting UK office building energy consumption from heating and cooling demands. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 59. P. 214–227.

128. Aranda A., Ferreira G., Mainar-Toledo M.D., Scarpellini S., Llera Sastresa E. Multiple regression models to predict the annual energy consumption in the Spanish banking sector. *Energy and Buildings*. 2012. Vol.49. P. 380–387.

129. Ma Z., Li H., Sun Q., Wang C., Yan A., Starfelt, F. Statistical analysis of energy consumption patterns on the heat demand of buildings in district heating systems. *Energy Build*. 2014. Vol. 85. P. 464–472.

130. Hygh J. S., DeCarolis J. F., Hill D. B., Ranjithan S. R. Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design. *Building and Environment*. 2012. Vol. 57. P. 165-175.

131. Aregi B., Garay R. Regression analysis of the energy consumption of tertiary buildings. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 122. P. 9-14.

132. Braun M.R., Altan H., Beck S.B.M. Using regression analysis to predict the future energy consumption of a supermarket in the UK. *Applied Energy*. 2014. Vol. 30. P. 305–313.

133. Чипулис В.П., Кузнецов Р.С. Анализ эффективности регулирования теплопотребления с использованием регрессионных моделей объектов теплоэнергетики. *XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ*. Москва, 2014. С. 7529-7539.

134. Chowdhury A. A., Rasul M. G., Khan M. M. K. Modelling and simulation of building energy consumption: a case study on an institutional building in central queensland, australia. *Building Simulation*. 2007. P. 1916-1923.

135. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Євтухов В.Я., Білоус І.Ю., Красовський О.П. Досвід впровадження міжнародного інвестиційного проекту з підвищення

енергоефективності об'єктів соціальної сфери. *Науковий вісник "Економіка і регіон"*. Полтава 2015. №6(55). С 59–63.

136. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Моніторинг температурного стану навчального корпусу. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. Київ 2015. №2. С. 24-32.

137. ASHRAE Transactions 1992;98(1):346-353. Orhan Buyukalaca, Husamettin Bulut, Tuncay Yilmaz. Analysis of variable-base heating and cooling degree- days for Turkey. *Applied Energy*. 2001. Vol. 69.P. 269–283.

138. EN ISO 13786:2007. Thermal performance of building component - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods. — CEN. European Committee for Standardization, 2007. 27 p.

139. Bernt Lie. Improved model for solar heating of buildings. SIMS October 07-09, 2015, Linköping, Sweden p. 299-308.

140. MacKay D., Ryder-Cook D. Thermal Modelling of Buildings. 2009. P. 23. Cambridge: UIT Cambridge. Available free online <http://www.withouthotair.com>.

141. Harish V.S.K.V., Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. P. 1272–1292.

142. Pereira W., Bögl A., Natschläger T. Sensitivity analysis and validation of an EnergyPlus model of a house in Upper Austria. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 62. P.472–481.

143. Stefanovic A., Gordic D. Modeling methodology of the heating energy consumption and the potential reductions due to thermal improvements of staggered blockbuildings. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 125. P. 244–253.

144. Lu S., Zheng S., Kong X. The performance and analysis of office building energy consumption in the west of Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 127. P.499–511.

145. Braulio-Gonzalo M., Juan P., Bovea M. D., Rua M. J. Modelling energy efficiency performance of residential building stocks based on Bayesian statistical inference. *Environmental Modelling & Software*. 2016. Vol. 83. P. 198-211.

146. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. М.: Энергоиздат, 3-е изд., 1981. 416 с.
147. *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением. М.: Мир, перевод с англ., под ред. д-ра. техн. наук Хрусталева Б.А. 1975. 934 с.
148. *Михеев М.А., Михеев И.М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 2-е изд., 1977. 342с.
149. *Дешко В.И., Дубровская В.И., Шкляр В.И., Ленкин А.В., Студенец В.П.* Теоретические основы теплотехники. К.: НТУУ «КПИ», 2011. 118 с.
150. Winkelmann F.C. MODELING WINDOWS IN ENERGYPLUS. Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro, Brazil August 13-15, 2001. *Building Simulation*. 2001. P. 457 – 464.
151. Krarti M., Chuangchid P., Ihm P. Foundation heat transfer module for EnergyPlus program. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil August 13-15, 2001. P. 931–938
152. Бойко В. С., Сотник М. І., Хованський С. О. Перехідний процес в електричному колі як аналог теплообміну та теплової інерції приміщення. *Реферативний журнал. Інститут електромеханіки, енергозбереження і систем управління*. 2016. №3 (35). С. 10-16
153. ДСТУ-НБ В.1.1-27:2010.Будівельна кіматологія. К., 2011. 127 с.
154. <https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/iwec2>
155. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Wittef M.J., Glazer J. *Energy and Buildings*. 2001. Vol. 33. P. 319-331.
156. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=tashkent@meta.ua>
157. <http://www.meteonorm.com>
158. J. Duffie, W. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley-interscience. Wiley. 2013. 928 p.
159. *W. Beckman, S. Klein, J. Duffy.* Calculation of systems of solar heat supply. М.: Energoizdat, 1992.

160. BERGE A. Analysis of Methods to Calculate Air Infiltration for Use in Energy Calculations. Sweden 2011. 98 p.
161. ASHRAE Standard 62.2-2003 Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings.
162. ASHRAE Fundamentals Handbook. 1997. P. 85
163. ГОСТ 25891-83 Здания и сооружения. методы определения сопротивления воздухопроницанию ограждающих конструкций. От 15 июня 1983 г. № 118. С. 50.
164. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівелью. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. Київ 2017. №4 С. 97-104.
165. Тадля О.Ю., Круковский П.Г. Совершенствование методов и моделей расчетного анализа тепловых режимов и теплопотерь помещений с различными системами отопления. *Промышленная теплотехника*. 2004. Т. 26, № 6. С. 197-201.
166. Deshko V., Sukhodub I., Bilous I. MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINATION OF SPECIFIC ENERGY NEED FOR HEATING USED IN UKRAINE. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)* . 2018. Vol.1. P. 13-25.
167. Deshko V.I., Bilous I.Yu. Mathematical Models for Determination of Specific Energy Need for Heating and Cooling of the Administrative Building. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.3). P. 325-330.
168. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Суходуб І.О. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на внутрішню температуру огорожень будівлі. *Журнал "Вісник КНТУТД"*. Київ 2015, №5(90). С 24-31.
169. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Жижка М.І. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на рівень опалення приміщення. *Международный научно-практический журнал "Керамика наука и жизнь"*. Київ 2015. №4(29). С 34–40.
170. Tzempelikos A., Andreas K. Athienitis. Shading as an active component for solar control: an integrated approach at the early design stage. PLEA2006 - The 23rd

Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.

171. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20. P. 327-336.

172. Круковский П.Г., Метель М.А., Тадля О.Ю. Возможности и проблемы применения способа экономии энергии путем регулирования температуры помещений. *Промышленная теплотехника*. Киев 2009. №7. С. 24.

173. Дешко В.И., Шовкалюк М.М., Ленькин А.В. Моделирование теплового состояния помещений при измерении режимов параметров отопления. *Промышленная теплотехника*. Т.31. 2009. №6. С. 75-80.

174. Дешко В.И., Білоус І.Ю. Моделювання режимів опалення приміщень. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. Київ 2016. №3. С. 97-104.

175. Дешко В.И., Шовкалюк М.М., Лохманець Ю.В., Куран Ю.Р. Числове моделювання як метод дослідження теплових режимів приміщення. *Нова тема*. Київ 2008. №4. 2008. С. 26-30.

176. Кордюков М.И., Дешко В.И., Суходуб И.О. Особенности процессов теплообмена рекуперативного мембранного теплообменника "воздух-воздух" в летний период. *Холодильная техника и технология*. 2014. №1 (147). С. 24-31.

177. Popescu D., Ungureanu F., Serban E. Simulation of Consumption in District Heating Systems. *ENVIRONMENTAL PROBLEMS and DEVELOPMENT*. P. 50-55.

178. Сайт метеорологічних даних: <http://meteo.ua>

179. Сайт метеорологічних даних: <http://rp5.ua>

180. Басок Б.И., Воробйов Л.Й., Гончарук С.М., Декуша Л.В., Чорна Н.О. Прилад для дослідження надходження сонячної енергії на похилий геліоколектор. *Промышленная теплотехника*. 2013. Т. 35, № 5. С. 8-8

181. Басок Б.И., Накорчевский А.И. Теплофизика влияния солнечного излучения на здания. Киев: Наукова думка. 2016. 224 с.

182. Deshko V., Goncharuk S., Bilous I., Gurska Y. Buildings energy performance integrated research. *The scientific heritage*. 2017. Vol. 9 (9) P.1. P. 63-68.

183. Білоус І.Ю., Дешко В.І., Сплавська В.О., Суходуб І.О., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. Управління ефективністю енерговикористання у вищих навчальних закладах: монографія / під заг. ред. В.І. Дешка. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 186с.

184. Розен В.П., Ткаченко В.Ф. Энергетический мониторинг зданий высших учебных заведений. *Проблемы региональной энергетики*. Кишинев 2013. № 2. — С. 108–112.

185. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Шевченко О.М. Практичні питання енергоефективності. Практичний посібник. Київ: «Майстерня реклами «План Б», 2014. 48 с.

186. Шовкалюк М.М., Білоус І.Ю. Аналіз енергетичних і матеріальних показників і балансів навчального закладу з розробкою енергозберігаючих заходів. *Екологічні науки*. 2014. № 1 /2014 (5). С. 108–115.

187. Bilous I., Shovkaluyk M., Shevchenko E. Study level energy efficiency for public sector agencies. PROCEEDINGS of 8-th INTERNATIONAL GREEN ENERGY CONFERENCE (IGEC-8) [Monograph]. Kyiv, June 17-19, 2013. P .230-231.

188. Праховник А.В., Дешко В.І., Шевченко О.М. Енергетична сертифікація будівель. *Наукові Вісті НТУУ "КПІ"*. 2011. №1. С. 140–153.

189. Парфененко Ю.В., Шендрик В.В., Красніков С.І. Концептуальна модель інформаційної системи аналізу теплозабезпечення. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Серія: Інформаційні системи та мережі. 2012. № 743. С. 131–140.

190. Дешко В.І., Шевченко О.М., Галілейська О.М. Створення моделі-еталону будівлі навчального закладу. *Енергоефективніекобезпечні технології та обладнання*. 2011. №1. С. 442–450.

191. Фаренюк Г.Г. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій. Київ: Гама-Принт, 2009. 216 с.

192. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Шевченко О.М. та ін. Вплив температурно-погодних факторів на показники проектів з енергозбереження. *Енергетика та електрифікація*. 2007. № 3. С. 62—68.

193. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Євтухов В.Я., Красовський О.П., Білоус І.Ю. Досвід впровадження міжнародного інвестиційного проекту з підвищення енергоефективності об'єктів соціальної сфери. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «СУЧАСНІ ІННОВАЦІЙНО-ІНВЕСТИЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ РОЗВИТКУ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ» (27 листопада 2015 р., м. Полтава). Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, 2015. С. 138-139.

194. Статистичний щорічник України. Київ: ДП «Інформаційно аналітичне агентство», 2014. 443 с.

195. Ashish Shukla, Richard Bull. Performance study of DISPLAY database: Trends in municipality buildings. *Energy and Buildings*. 2012. №47. P. 285–291.

196. Дешко В.І., Шевченко О.М., Красовський О.П., Білоус І.Ю. ЕНЕРГЕТИЧНА СЕРТИФІКАЦІЯ БУДІВЕЛЬ ЗАКЛАДІВ СОЦІАЛЬНОЇ СФЕРИ. *Науково-технічний, виробничий та інформаційно-аналітичний журнал «Наука та будівництво»*. Київ 2016. №2. С. 14-20.

197. Ковалко М.П., Денисюк С.П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / відповідальний редактор А.К. Шидловський. Київ: УЕЗ, 1998. 506 с.

198. Куценко А.С., ТОВАЖНЯНСКИЙ В.И., Коваленко С.В. Математическое моделирование управляемого процесса теплоснабжения зданий. Інтегровані технології та енергозбереження. Харків: Націон. Техн. Ун-т «ХПІ». 2013. №1. С. 36 – 44.

Додаток А

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Білоус І.Ю., Дешко В.І., Сплавська В.О., Суходуб І.О., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. Управління ефективністю енерговикористання у вищих навчальних закладах: монографія / під заг. ред. В.І. Дешка. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 186с. **(колективна монографія)**.
2. DESHKO V., SUKHODUB I., BILOUS I. Mathematical models for determination of energy need for heating. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, 2017. Vol. 2. P. 45-51. **(іноземне видання)**.
3. Deshko V.I., Bilous I.Yu. Mathematical models for determination of specific energy need for heating and cooling of the administrative building. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.3). P. 325-330. **(іноземне видання, включене до бази даних Scopus)**.
4. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 8. P. 65–75. **(іноземне видання, включене до бази даних Scopus)**.
5. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20. P. 327-336. **(іноземне видання, включене до бази даних Scopus)**.
6. DESHKO V., SUKHODUB I., BILOUS I. Mathematical models for determination of specific energy need for heating used in Ukraine. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*. 2018. Vol. 1. P. 13-25. **(іноземне видання)**.
7. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гончарук С.М., Гурська Ю.В. КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЛІ. *The scientific heritage*. 2017. Vol. 9. P. 63-68. **(іноземне видання)**.

8. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. 2014. № 80. С. 68 – 72. **(фахове видання)**.

9. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2017. №4. С. 67-73. **(фахове видання, включене до бази даних Index Copernicus)**.

10. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Моніторинг температурного стану навчального корпусу. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2015. №2. С. 24-32. **(фахове видання, включене до бази даних Index Copernicus)**.

11. Дешко В.І., Шевченко О.М., Красовський О.П., Білоус І.Ю. ЕНЕРГЕТИЧНА СЕРТИФІКАЦІЯ БУДІВЕЛЬ ЗАКЛАДІВ СОЦІАЛЬНОЇ СФЕРИ. *Науково-технічний, виробничий та інформаційно-аналітичний журнал «Наука та будівництво»*. 2016. №2. С. 14-20. **(фахове видання)**.

12. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Суходуб І.О. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на внутрішню температуру огорожень будівлі. *Журнал "Вісник КНУТД"*. 2015. №5(90). С. 24-31. **(фахове видання, включене до бази даних Ulrich's Periodical Directory)**.

13. Дешко В.І., Буяк Н.А., Білоус І.Ю. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. *Журнал "Вісник КНУТД"*. 2015. №5(90). С. 71-80. **(фахове видання, включене до бази даних Ulrich's Periodical Directory)**.

14. Соловей О.І., Шевченко О.М., Білоус І.Ю. Оцінка рівня ефективності енергоспоживання об'єктів житлового комплексу (на прикладі гуртожитків НТУУ «КПІ»). *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. 2013. № 77. С. 293-297. **(фахове видання)**.

15. Шовкалюк М.М., Білоус І.Ю. Аналіз енергетичних і математичних показників і балансів навчального закладу з розробкою енергетичних заходів.

Науково-практичний журнал "Екологічні науки". 2014. №1(5). С. 108-115. (фахове видання).

16. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Моделювання режимів опалення приміщень. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія».* 2016. №3 С. 97-104. **(видання, включене до бази даних Index Copernicus).**

17. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Жижя М.І. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на рівень опалення приміщення. *Международный научно-практический журнал "Керамика: наука и жизнь".* 2015. №4(29). С. 34–40.

18. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Євтухов В.Я., Білоус І.Ю., Красовський О.П. Досвід впровадження міжнародного інвестиційного проекту з підвищення енергоефективності об'єктів соціальної сфери. *Науковий вісник "Економіка і регіон".* 2015. №6(55). С. 59–63.

19. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Bilous I.Yu. Mathematical models for determination of energy need for heating. *International Scientific-Technical Conference "Actual Problems Of Power Engineering, Construction And Environmental Engineering" (23-25 November 2017, Kielce, Poland).* Kielce: Kielce University of Technology, 2017. P. 33-40.

20. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Бази кліматичних і погодних даних для визначення енергетичних характеристик будівель. Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Буд-Майстер-Клас-2017» (28.11-01.12.2017, Київ). Київ: київський національний університет будівництва і архітектури, 2017. С. 80-81.

21. Bilous I., Hetmanchuk H. Use of climatic databases for determining the energy need of heat buildings. *International Internet Conference "Scientific Results Of 2017" (15.12.2017, Vinnitsa).* Vinnitsa, 2017. P. 14-16.

22. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гурєєв М.В. Аналіз зміни енергопотребі будівлі при заміні вікон. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку –

REMS'18 (17-19 квітня 2018 р., м.Київ). Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2018. С. 16.

23. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Визначення кратності повітрообміну в залежності від зовнішніх та внутрішніх факторів. Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання.» (26-27 квітня 2018 р., Тернопіль). Тернопіль: ТНТУ, 2018. С. 81-82.

24. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Динамічні моделі для визначення енергопотреб на охолодження будівель. Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (24-27 квітня 2018 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТЕФ, 2018. С. 184.

25. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Голубенко О.О. Динамічні методи розрахунку у будівництві та поширені технології утеплення. Міжнародна науково-практична конференція "Комплексне Забезпечення Якості Технологічних Процесів Та Систем" (10 - 12 травня 2018 р., м. Чернігів). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 105-107.

26. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі для визначення питомої енергопотреб на опалення та охолодження адміністративної будівлі. Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту» (14-16 травня 2018р., м. Харків). Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 89-91.

27. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гурська Ю.В. Дослідження підходів визначення енергопотреб будівель. Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (25-28 квітня 2017 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТЕФ, 2017. С. 175.

28. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гурська Ю.В. Порівняння методів визначення енергопотреб будівель в опаленні. Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» (25-26 травня 2017 р., м.Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2017. С. 129-133.

29. Басок Б.І., Дешко В.І., Гончарук С.М., Білоус І.Ю. Вплив сонячної радіації на тепловий стан будівлі. *Промышленная теплоэнергетика*. 2017. №7. С. 49.
30. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Жижа М.І. Моделювання переривчастого опалення будівель. Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (18-21 квітня 2016 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТЕФ, 2016. С. 202.
31. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Жижа М.І. Моделювання переривчастого опалення будівель. Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» (1-3 червня 2016 р., м. Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2016. С. 185-190.
32. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Шевченко О.М. Шкала визначення класу енергоефективності для закладів соціальної сфери. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та студентів "Еколого-енергетичні проблеми сучасності" (14 квітня 2016 р., Одеса). Одеса: ОНАХТ, 2016. С. 71–73.
33. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гурська Ю.В. До застосування регресійного аналізу для прогнозування енергоспоживання будівель. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REIMS'16» (30 травня-1 червня 2016 р., м. Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, С. 77.
34. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Фактори температурних режимів приміщень в енергетичному менеджменті громадських будівель. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REIMS' 15» (19-21 травня 2015 р., м. Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2015. С. 28.
35. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Суходуб І.О. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на внутрішню температуру огорожень приміщення. Міжнародна конференція "Проблеми промислової теплотехніки" (20-23 жовтня 2015 р., м. Київ). Київ: ІТТФ, 2015. С. 110-111.

36. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Євтухов В.Я., Красовський О.П., Білоус І.Ю. Досвід впровадження міжнародного інвестиційного проекту з підвищення енергоефективності об'єктів соціальної сфери. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасні інноваційно-інвестиційні механізми розвитку національної економіки» (27 листопада 2015 р., м. Полтава). Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, 2015. С. 138-139.

37. Білоус І.Ю., Дешко В.І., Шовкалюк М.М. Підвищення енергоефективності навчального закладу. Международная научно-практическая конференция «Энергосберегающие технологии теплогазоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры» (23-22 ноября 2013, Харьков). Харьков: ХНУГХ им. А.Н.Бекетова, 2015. С. 90.

38. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Енергоефективність у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання» (5 березня 2014 р., м.Київ). Київ: НДІБК, 2014. С. 68–72.

39. Шовкалюк М.М., Білоус І.Ю. Практический пример анализа энергетических и материальных показателей и балансов зданий учебного заведения с разработкой энергосберегающих мероприятий. Международный форум для устойчивого развития бизнеса "GREEN MIND" (15-17 октября 2013 г., Киев.). Киев: Торгово-промышленная палата Украины, 2013. С.120.

40. Bilous I., Shovkaluyk M., Shevchenko E. Study level energy efficiency for public sector agencies. International Green Energy Conference (IGEC-8) (17-19 June, 2013., Kyiv). Kyiv: NAY, 2013. P.230-231.

41. Білоус І.Ю., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. Дослідження рівня ефективності енерговикористання. Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (16-19 квітня 2013 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТЕФ, 2013. С. 162.

42. Шовкалюк Ю.В., Білоус І.Ю. Аналіз впливу на повітряне середовище поквартирних систем опалення. Всеукраїнська наукова конференція студентів, магістрів та аспірантів "Сучасні проблеми екології та геотехнології". (23-25 березня 2011р., Житомир). Житомир. С. 85.

43. Шовкалюк М.М., Білоус І.Ю. Використання в навчальному процесі програмних продуктів з енергетичної сертифікації будівель. V Всеукраїнська студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання.» (20 березня 2012 р., Тернопіль). Тернопіль: ТНТУ, 2012. С. 111.

44. *Свідотство про реєстрацію авторського права. Нелінійні багатофакторні регресійні залежності для прогнозування внутрішньої температури повітря в адміністративній будівлі та параметричний аналіз зовнішніх та внутрішніх факторів впливу* / І.Ю. Білоус, В.І. Дешко. – № 79449; заявл. 11.05.2018; зареєстр. 31.05.2018.

Додаток Б

Таблиця Б1 - Характеристика громадських будівель в рамках проекту "Сприяння розвитку соціальної інфраструктури" УФСІ

Область	№	місто, село	рік забудови	признач ення	площа	об'єм	R _{стін} (м ² К)/Вт	Питоме споживання		
					м ²	м ³		кВт·год /м ²	кВт·год /м ³	
Вінницька область	1	Махаринці	1976	школа	1780.52	12321	0.64	230	43.2	
	2	Кордишівка	1980	ДНЗ	266	798	0.93	130	43.3	
	3	Вернигородок	1978	школа	2126	11476	0.79	290.1	53.7	
	4	Козятин	1980	ДНЗ	800	4606	0.79	493	85.6	
	5	Козятин	1967	ДНЗ	1058	4682	0.79	393	88.7	
	6	Козятин	1961	ДНЗ	1210	5891	0.84	298	61.1	
	7	Піщанка	1985	ДНЗ	1470	6199	0.64	242	57.5	
	8	Студена	1964	школа	2450	16170	1.29	372	56	
	9	Піщанка	1982	школа	5816	17448	0.8	168	56	
	11	Гальджбіївка	1965	ДНЗ	385	2466	0.83	324	97.3	
	12	Придністрянське	1963	школа	677	2358	1.47	240	68.9	
	13	Северинівка	1964	ДНЗ	290	961.9 4	1.17	334	106	
	14	Цекинівка	1980	школа	1337	7410	0.89	344	62.01	
	15	Гонорівка	1897	школа	743	2600	1	239	68	
	16	Вінницькі хутори	1978	школа	3897	13675	1.18	352	100.3	
	17	Буша	1913	школа	2099	7256	0.51	366	105.8	
	18	Бубнівка	1978	школа	1574	5194	0.96	323	98	
	19	Хмільник	1975	ДНЗ	2739	9446	1.04	360	104.4	
	20	Кришинці	1956	ДНЗ	460	1418	1.81	433	140.7	
	23	Ялтушків	1975	школа	5084	18810	1.1	303	81.9	
	24	Дашківці	1978	школа	4547	15007	1.18	474	143.7	
	25	Городівка	1987	школа	3766	13690	0.96	274	75.3	
	26	Козятин	1985	школа	2420	8918	0.763	277	75.3	
	27	Козятин	1975	школа	2959	11133	1.29	356	107.35	
	28	Ямполь	1985	школа	6556	24902	1.13	255	71.3	
	29	Северинівка	1960	ДНЗ	420	1260	0.64	281.4	93.8	
	Кіровоградська область	31	Сасівка	1974	школа	2526	4557	0.673	147	81.47
		32	Чарівне	1972	школа	1044	6475	0.89	177	57
		33	Устинівка	1976	школа	704	2407	0.49	278	112
34		Олексіївка	1986	школа	1801	5832	0.49	391	120	
35		Криничуватка	1974	школа	1897	6331	0.82	337	84	
37		Буховецьке	1976	школа	1275	3853	0.89	402	124	
38		Смоліне	1974	ДНЗ	975	2828	0.86	330	114	
39		Петрівське	1983	школа	2343	8063	0.62	136	44	
40		Петрівське	1971	школа	2032	6674	1.02	375	114	
41		Кетрисанівка	1989	школа	2976	10015	1.02	318	95	
42		Вільшанка	1973	ДНЗ	1098	3623	1.03	371	112	
43		Бобринець	1983	школа	5150	16900	1	234	71	

Додаток В

Таблиця В1 - Характеристика громадських будівель м.Києва в рамках співпраці Солом'янської районної державної адміністрації та Інститутом енергозбереження та енергоменеджменту

№	Назва закладу	рік за будови	площа	об'єм	кількість учнів	кількість працівників	R _{стіни} (м ² К)/Вт	Питоме споживання	
			м ²	м ³				кВт·год/ м ³	кВт·год/ /м ³
1	Спеціалізована школа №64	1973	2481	28377	765	71	0.83	57.7	20.9
2	Спеціалізована школа №43 «Грааль»	1952	10509	31528	1262	10	1	34.4	3.2
3	Середня Загальноосвітня Школа № 26	1960	560	20530	480	50	1	61.7	38.0
4	Спеціалізована школа №159	1976	7290	21871	586	95	0.96	48.5	31.9
5	СШДС "Сяйво"	1976	2700	8073	132	66	1.1	76.9	38.4
6	СЗШ №121	1957	4539	12000	237	42	2.16	36.0	12.0
7	гімназія №177	1962	14200	46900	712	85	2.9	31.0	12.0
8	СЗШ№67	1963	5256	22211	600	80	1.2	32.1	16.6

МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ, БУДІВНИЦТВА ТА ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ”
(ДП НДІБК)



юридична адреса: вул. І.Клименка, 5/2, м. Київ - 37, 03680, поштова адреса: вул. Преображенська, 5/2, м. Київ -37, 03037; тел. (044) 249-72-34; факс (044) 248-89-09
www.niisk.com; e-mail: niisk-office@ndibk.gov.ua; ndibk@ndibk.kiev.ua; код ЄДРПОУ 02495431

31.08.18 № 100-1748 На № _____ Від _____

ДОВІДКА

впровадження результатів дисертаційної роботи асистента
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
БІЛОУС ІННИ ЮРІЇВНИ

В дисертаційній роботі Білоус І.Ю. проведено апробацію умов використання методів для визначення енергетичних характеристик будівель, запропоновані підходи реалізації та розвитку динамічних моделей для аналізу будівель. В роботі визначені реперні точки для побудови енергетичних шкал для диференційної сертифікації будівель громадських закладів України.

Розглянуті в роботі динамічні моделі та виконанні дослідження слугують базою для порівняння та адаптації методів міжнародних стандартів з енергоефективності будівель до умов України, а також розвитку сіткових моделей будівель. Збільшення числа вузлів моделі та деталізований розрахунок теплоінерційних особливостей огорожень дозволить проводити більш точні розрахунки, особливо для теплого періоду року, що відповідає сучасним світовим підходам, які застосовуються у ряді країн.

Результати зазначених наукових досліджень використовуються ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» при розробці сучасних стандартів щодо забезпечення теплового стану та методів оцінки енергоефективності будівель як складних енергетичних систем.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор ДП НДІБК



Г.Г. Фаренюк



**Український
Фонд
Соціальних
Інвестицій**

04071, м. Київ, вул. Лук'янівська, 77
тел.: (044) 417-2633, (044) 463-5836
факс: (044) 417-1057
e-mail: usif@usif.org.ua
web: www.usif.org.ua

№ 93 від 06. 06. 2016 р.

Акт

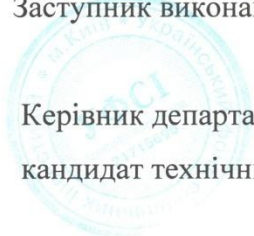
впровадження результатів дисертаційної роботи

Білоус Інни Юріївни

В дисертаційній роботі аспірантки кафедри теплотехніки та енергозбереження Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Білоус Інни Юріївни виконано аналіз споживання енергії будівель закладів соціальної сфери та запропоновані підходи до їх енергетичної сертифікації. Результати роботи використані для впровадження енергоефективних заходів у будівлях закладів соціальної сфери в рамках проекту «Сприяння розвитку соціальної інфраструктури» (2013-2016рр.), передані власникам об'єктів (місцевим відділам освіти) для використання у сертифікації будівель та впровадження додаткових енергоефективних заходів.

Заступник виконавчого директора

 М.Г. Сторож


Керівник департаменту мікропроектів,
кандидат технічних наук

 О.П. Красовський

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
 Національного технічного
 університету України
 «Київський політехнічний
 інститут імені Ігоря Сікорського»
 акад. НАН України, д.т.н., проф.



Ю.І. Якименко
 _____ 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи науково-педагогічного працівника кафедри
 теплотехніки та енергозбереження Білоус І.Ю.
 у навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського

Комісія у складі завідувача кафедри теплотехніки та енергозбереження
 д.т.н., проф. Дешко В.І. та голови методичної комісії ІЕЕ
 к.т.н., доц. Гана А.Л. склали цей акт про те, що результати дисертаційної
 роботи Білоус І.Ю. використані у навчальному процесі кафедри теплотехніки
 та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського для студентів спеціальності
 144 «Теплоенергетика», спеціалізація «Енергетичний менеджмент та
 інжиніринг».

Зокрема:

- динамічна сіткова модель 5R1C під час розробки комп'ютерного практикуму з дисципліни «Методи енергомоніторингу та енергоаудиту»
- методика розробки шкал енергетичної сертифікації на прикладі громадських будівель під час розробки практичних занять з дисципліни «Методи енергомоніторингу та енергоаудиту»
- методика та результати складання та аналізу температурних карт під час розробки практичних та лабораторних занять з дисципліни «Енергозбереження у будівлях»

Заступник директора,
 голова методичної комісії ІЕЕ,
 к.т.н, доц.

А.Л. Ган

Завідувач кафедри
 Теплотехніки та енергозбереження,
 д.т.н., проф.

В.І. Дешко

Міністерство освіти і науки України



Ministry of Education and Science of Ukraine

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТSUMY STATE
UNIVERSITY

вул.Римського-Корсакова, 2, м.Суми, 40007

2, Rymsky-Korsakov, St., Sumy, Ukraine, 40007

тел. 64-04-99, тел/факс (0542) 33-40-58

tel. 64-04-99, tel/fax +38(0542) 33-40-58

E-mail: kanc@sumdu.edu.ua

E-mail: kanc@sumdu.edu.ua

www.sumdu.edu.ua

www.sumdu.edu.ua

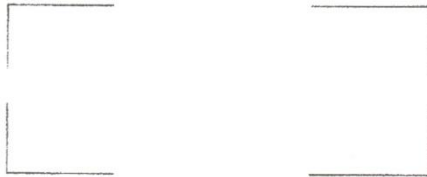
Код ЄДРПОУ 05408289

USREOU code 05408289

25 ВЕР 2018

20 р. № 57.12/15-06/3687

На № _____ від _____ 20 ____ р.



ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи науково-педагогічного працівника
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
БІЛОУС ІННИ ЮРІЇВНИ

В дисертаційній роботі Білоус І.Ю. досліджено та розвинено динамічні підходи до аналізу енергетичних характеристик будівлі як складної енергетичної системи.

В роботі розглянуті діючі підходи та запропоновані авторські підходи до оцінки енергоефективності та прогнозування використання енергії на основі динамічних моделей будівель. Для будівлі навчального корпусу ЛА СумДУ розроблено імітаційні динамічні моделі репрезентативної кімнати. Моделі дозволяють аналізувати режими опалення з врахуванням теплофізичних та теплоінерційних особливостей огорожень, внутрішніх та зовнішніх теплонадходжень, режимів роботи, кліматичних даних, що дозволяє аналізувати будівлю комплексно.

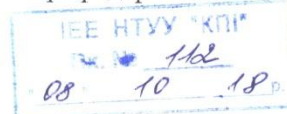
Результати зазначених наукових досліджень використані групою з енергетичних обстежень Сумського державного університету при розробці методів аналізу та прогнозування енергопотреби та теплового стану будівлі в залежності від сукупності мінливості зовнішніх та внутрішніх факторів впливу на базі динамічних моделей різної складності.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Проректор з наукової роботи
Сумського державного університету



проф. д.ф-м.н. А. М. Черноус



Вик. Сотник М.І.
(050)3273417

089253

ЗАТВЕРДЖУЮПроректор з адміністративно-
господарської роботи

Національного технічного
університету України
Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»

П.В. Ковальов

« » 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи асистента кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського
БІЛОУС ІННИ ЮРІВНИ

В дисертаційній роботі Білоус І.Ю. запропоновано методику побудови нелінійних багатофакторних регресійних моделей для прогнозування енергопотреби та/або теплового стану будівель, отримано узагальнені експериментальні дані багаторічних спостережень по розподілу температур в приміщеннях багатоповерхової будівлі навчального корпусу в залежності від їх розташування, використання та забезпечення рівня опалення, які дозволяють аналізувати та передбачати вплив цих факторів на температурні умови експлуатації будівель. Для будівлі навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського створено нелінійну багатофакторну регресійну модель будівлі, що дозволяє проводити прогноз рівня опалення, аналізувати фактичний та прогнозний тепловий стан приміщень навчального корпусу. За результатами розрахунку на базі динамічної математичної моделі будівлі, пониження температури в неробочі години дозволить знизити споживання теплової енергії до 9%.

Результати зазначених наукових досліджень використовуються-службою енергетичного менеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського при розробці методів аналізу та прогнозування енергопотреби та/або теплового стану будівлі в залежності від сукупності мінливості зовнішніх та внутрішніх факторів впливу на базі регресійних багатофакторних моделей.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Головний енергоменеджер,
к.т.н.

О.М. Шевченко



ДИПЛОМ

І-ступеня

*XVI ВСЕУКРАЇНСЬКОГО КОНКУРСУ
"МОЛОДЬ – ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ – 2016:
ВІДКРИТИЙ КОНКУРС МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА
ЕНЕРГЕТИКІВ"*

*НАГОРОДЖУЄТЬСЯ
БІЛОУС ІННА ЮРІВНА
за роботу на тему:*

«Енергетична сертифікація будівель закладів соціальної сфери»
*в номінації « Енергозбереження та енерго менеджмент »
серед Молодих вчених*

*Голова Правління
ГО ВРВПЕ, Герой України*



*Проректор Київського
політехнічного інституту
ім. Ігоря Сікорського*



ДИПЛОМ

ІІІ-ступеня

ХІІ ВСЕУКРАЇНСЬКОГО КОНКУРСУ
 "МОЛОДЬ – ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ – 2013:
 ВІДКРИТИЙ КОНКУРС МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА ЕНЕРГЕТИКІВ"
 ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ 115-Й РІЧНИЦІ СТВОРЕННЯ НТУУ
 «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

НАГОРОДЖУЄТЬСЯ
 БІЛОУС ІННА ЮРІВНА

за роботу на тему:
 “Підвищення енергоефективності навчального закладу на прикладі
 навчального корпусу НТУУ «КПІ»”
 в номінації “Енергозбереження та енергоменеджмент”
 серед Молодих вчених

Голова Правління
 Всеукраїнської Ради
 ветеранів праці енергетики,
 Герой України

С.І. Потапюк
 С.І. Потапюк

Проректор НТУУ „Київський
 політехнічний інститут”
 професор

Г.Б. Варламов
 Г.Б. Варламов





ДИПЛОМ

II-ступеня

IX ВСЕУКРАЇНСЬКОГО КОНКУРСУ
 "МОЛОДЬ – ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ – 2010:
 ВІДКРИТИЙ КОНКУРС МОЛОДИХ ЕНЕРГЕТИКІВ "
 НАГОРОДЖУЮТЬСЯ

Шевченко Олена Миколаївна
Білоус Інна Юріївна

за роботу на тему:

**“Оцінка енергетичної ефективності
 навчальних закладів Міністерства освіти та
 науки”**

в номінації серед спеціалістів

“ЕКОНОМІКА В ЕНЕРГЕТИЦІ”

Заступник Міністра енергетики та
 вугільної промисловості України

Чех С.М.

Голова правління ОГ Рада
 старійших енергетиків України

Чулков Є.І.

Інститут
 ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ
 академії наук України

Стогній Б.С.

Проректор НТУУ „Київський
 політехнічний інститут”

Варламов Г.Б.

