

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГОЛУБЕНКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК: 697.12:628.87

ДИСЕРТАЦІЯ

**Оцінювання впливу поведінково-експлуатаційних факторів на рівень
енергоефективності будівлі за допомогою динамічного моделювання**

144 – Теплоенергетика

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Олександр ГОЛУБЕНКО

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

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Голубенко О.О. Оцінювання впливу поведінково-експлуатаційних факторів на рівень енергоефективності будівлі за допомогою динамічного моделювання – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 Теплоенергетика. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ, 2024.

У вступі дисертації висвітлено актуальність теми дослідження на сьогоднішній день та зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Сформульовано мету, наукове завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, представлено дані про апробацію дисертації та наявні публікації з окресленням особистого внеску здобувача.

Перший розділ дисертації присвячено аналізу теоретичних аспектів енергоефективності будівель. Розглянуто ряд ключових нормативних документів що регулюють енергетичну ефективність будівель в Україні та в Європейському Союзі. Також, проведено аналіз ряду міжнародних системи зеленої сертифікації будівель та програм з енергетичного моделювання будівель. За результатами аналізу програм з енергетичного моделювання будівель обрано DesignBuilder як основний документ для подальшого дослідження.

Висвітлено основні напрямки сучасних досліджень у галузі енергоефективності будівель. В Україні дослідженню енергоефективності будівель останніми роками присвячено багато наукових робіт, зокрема щодо впливу технічних покращень на енергоефективність будівель, а також дослідження теплового комфорту перебування в приміщеннях. Особливу увагу приділено дослідженню тепловтрат через огорожувальні конструкції, а також параметричному аналізу впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на енергоефективність будівель. Закордонні дослідження, зокрема в Європі та США, зосереджуються на пасивних будівлях і будівлях з нульовим споживанням енергії.

Іншими популярними темами також є економічний аналіз при впровадженні заходів з енергозбереження та вплив поведінки людей, що використовують будівлю на рівень енергоспоживання.

Дослідження охоплюють всі типи будівель, проте лівова частина досліджень присвячена саме житловому фонду, оскільки саме ця група споживачів споживає найбільше енергії серед будівель. Огляд наукових робіт показує, що проблема енергоефективності та комфортності перебування в будівлях з частковою зайнятістю залишається недостатньо висвітленою, що робить її перспективною темою для подальших досліджень.

Другий розділ дисертації присвячений опису об'єкту дослідження – будівлі школи в Івано-Франківській області. Надано характеристику архітектурним особливостей, огорожувальних конструкцій, графіку експлуатації та інших особливостей досліджуваної будівлі. Також, надане пояснення, як в роботі отримані результати узагальнюються на інші будівлі шкіл.

Надалі в розділі надається більш детальний опис обраної програми з енергетичного моделювання будівель. Описуються принцип роботи, основні вхідні дані, та переваги використання кліматичної бази IWEC. Детально описана математична модель, якою розрахункове ядро (EnergyPlus) оперує для обробки даних. Також, надані числові значення основних параметрів моделі в DesignBuilder, та проведено її верифікацію. Базова модель використана для оцінки впливу підвищення рівня теплоізоляції будівлі до вимог ДБН 2.6-31 2016 року та ДБН 2.6-31 2021. За допомогою динамічного моделювання встановлено, що це дозволяє знизити споживання енергії на опалення на 48,9% та 55% відповідно, при доведенні всіх огорожувальних конструкцій до мінімальних вимог.

Третій розділ присвячено комплексній оцінці впливу варіативності режимів опалення на загальне енергоспоживання, тепловий комфорт, а також їх вплив на необхідну потужність систем опалення в шкільних будівлях. Виявлено, що використання режиму опалення з провалом на 4 °C в неробочі години дозволяє заощадити від 23% до 27% енергії на опалення порівняно з постійним опаленням, в залежності від рівня теплового захисту будівлі. Встановлено, що регулювання з

аналогічним провалом, але за розкладом шкільних занять дозволяє додатково заощадити 1,8-4,2% в порівнянні з режимом описаним вище. За результатами моделювань встановлено, що впровадження режимів опалення з провалом вимагає збільшення потужності системи опалення для компенсації періоду різкого переходу від пониженої температури до робочої. Виявлено, що при утепленні будівлі з одночасним введенням одного з графіків опалення з провалом, необхідна потужність системи опалення не перевищує аналогічний показник для постійного опалення в випадку неутепленої будівлі, що робить комплексне впровадження утеплення та режиму з провалом одночасно дуже перспективним заходом з енергозбереження.

Для аналізу впливу регулювання за розкладом шкільних занять на комфортність перебування дітей в приміщенні розглядається параметр PMV. В розділі йому наданий детальний опис. Надалі, обрано кутове приміщення, що контактує, в один з навчальних днів, з класом який не експлуатується на протязі всього дня, таким чином, досліджуючи варіант «найгіршого сценарію» робиться висновок про вплив режиму на термічний комфорт. Результати моделювань показують, що значної різниці параметру PMV в порівнянні з режимом з провалами в неробочі години не спостерігається.

З описаного вище аналізу робиться висновок, що регулювання за розкладом шкільних занять є перспективним заходом з енергозбереження, хоча й зазначається, що реалізація такого заходу є набагато більш складною за два інші описані графіки опалення.

Четвертий розділ аналізує експлуатацію будівлі школи в умовах неповної зайнятості. З метою дослідження з усієї будівлі було виокремлено кластер з п'яти приміщень, серед яких планується експлуатувати три. Кластер має форму хреста, що дозволяє розглянути наступні конфігурації розміщення приміщень, що експлуатуються: горизонтальне, вертикальне, кутове з контактом з дахом (але без контакту з підлогою по ґрунту) та кутове з контактом з підлогою по ґрунту (але без контакту з дахом). Сама ж будівля школи розглядається у законсервованому вигляді, тобто систему опалення не експлуатують, а обігрів приміщень

забезпечується індивідуальними електронагрівачами. Першочергово розглядався графік опалення при якому в неробочі години опалення вимикалось повністю, для максимальної економії енергії.

Дослідження річного споживання енергії конфігурацій розміщення приміщень показало, що найефективнішим є вертикальне розміщення приміщень, що експлуатуються, будучи на 8,5% більш ефективною за найближчу по споживанню кутову конфігурацію та на 22% за горизонтальну. Аналіз комфортності для найхолоднішої доби досліджуваного року показав, що вертикальне розміщення є найбільш ефективним і з точки зору цього параметру.

Динаміка зміни температури на графіках наштотувала на думку що програма можливо розраховувала надто потужну систему опалення що підтвердилось результатами моделювань: потужність, що була розрахована програмою становила близько 10 кВт на приміщення. Для оцінки можливості запровадження такого режиму експлуатації будівлі в реальних умовах, було промодельовано нормальний режим експлуатації для випадку неутепленої будівлі, і потужність розраховану в таких умовах було встановлено в модель неповної зайнятості школи, та проведено повторний аналіз комфорту. Система опалення наближена до реальною не змогла задовільнити комфортні умови ні за переривчастого графіку опалення, ні за графіку з провалами ні за постійного. Температура повітря в приміщеннях за постійного графіку опалення навіть для випадку будівлі з огорожувальними конструкціями доведеними до сучасних нормативних умов, в досліджувану добу не перевищувала 12 °C в найкращому випадку.

Надалі, для вирішення ситуації було розглянуто поліпшення: різний рівень утеплення внутрішніх стін та підвищення потужності опалення; в самому приміщенні, а також введення опалення в сусідніх приміщеннях для компенсації низької середньої радіаційної температури, що виникала в попередніх моделюваннях.

Заходи з опалення сусідніх приміщень, не лише не допомогли досягнути комфортних умов, але й значно підвищували споживання енергії, що виключило їх

доцільність. Надалі було проведено ряд моделювань для встановлення мінімальної рекомендованої потужності опалювальних приладів при впровадженні режиму неповної зайнятості будівлі, та отримані наступні результати: для неутепленої будівлі – 33,14 Вт/м³; для будівлі з огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН 2.6-31 2016 – 24 Вт/м³; мінімальним вимогам ДБН 2.6-31 2021 – 22,57 Вт/м³.

Для дослідження впливу утеплення внутрішніх стін на комфортність перебування в приміщеннях за умови неповної зайнятості, було розглянуто утеплення мінеральною ватою з кроком 2 см, і хоча утеплення позитивно впливало на показник PMV, 100% комфортних умов для всього опалювального періоду не вдалось досягти ,навіть, при утепленні внутрішніх стін на рівні з сучасними вимогами до опору теплопередачі зовнішніх огорожуючих конструкцій, сказаласть нестача потужності опалення. При дослідженні було помічено, що зі зростанням рівня теплового захисту приміщень, сонячні теплонадходження дозволяли частково компенсувати нестачу потужності опалення, що було помітно по відносно високих значеннях температури повітря та середньої радіаційної температури в приміщеннях, виходячи з чого було запропоновано змістити графік навчання на 2 години вперед. Це позитивно вплинуло на комфорт в робочі години, хоча й не вирішило проблему.

Аналіз енергоспоживання описаних вище заходів показав, що при збільшення потужності системи опалення для забезпечення комфортних умов, споживання енергії зросло на 77%. Варіанти з опаленням сусідніх приміщень показали зростання споживання на 100-200%, при цьому не задовільнивши комфорт. Ізоляція внутрішніх стін енергоспоживання знизила, проте комфортних умов на протязі всього опалювального періоду досягнути не вдалось.

Ключові слова: енергоефективність, енергоспоживання, енергозбереження, температурний режим, енергетичне моделювання будівлі, комп'ютерне моделювання, моделювання, числове моделювання, умови комфортності, PMV, температура, температурні режими, ефективність.

ABSTRACT

Holubenko O.O. Assessing the Impact of Behavioral and Operational Factors on Building Energy Efficiency through Dynamic Modeling – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. Thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 Thermal Power Engineering. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

The introduction of the dissertation highlights the relevance of the research topic today and the connection of the work with scientific programs, plans, and themes. The goal, scientific task, object, subject, and research methods are formulated, the scientific novelty and practical significance of the obtained results are determined, supported by the implementation acts, and data on the approbation of the dissertation and available publications are presented, outlining the personal contribution of the applicant.

The first chapter of the dissertation is devoted to the analysis of theoretical aspects of building energy efficiency. A number of key normative documents regulating the energy efficiency of buildings in Ukraine and the European Union were reviewed. An analysis of a number of international green building certification systems and energy modeling programs for buildings is also conducted. Based on the analysis of energy modeling programs for buildings, DesignBuilder was chosen as the main tool for further research.

The main directions of modern research in the field of building energy efficiency are highlighted. In Ukraine, many scientific works have been devoted to the study of building energy efficiency in recent years, in particular, the impact of technical improvements on building energy efficiency and the study of thermal comfort in premises. Special attention is paid to the study of heat losses through enclosing structures, as well as the parametric analysis of the impact of external and internal factors on building energy efficiency. Foreign studies, particularly in Europe and the USA, focus on passive buildings and buildings with zero energy consumption. Other popular topics include economic analysis of energy-saving measures and the impact of the behavior of people using the building on the level of energy consumption.

The research covers all types of buildings; however, the majority of the studies are devoted to the residential sector, as this group of consumers consumes the most energy among buildings. A review of scientific works shows that the issue of energy efficiency and comfort in buildings with partial occupancy remains insufficiently covered, making it a promising topic for further research.

The second chapter of the dissertation is dedicated to describing the object of the study – a school building in the Ivano-Frankivsk region. The architectural features, enclosing structures, operating schedule, and other characteristics of the studied building are described. An explanation is also provided on how the results obtained in the work are generalized to other school buildings.

Further in the chapter, a more detailed description of the selected building energy modeling program is provided. The principle of operation, main input data, and advantages of using the IWECC climate base are described. The mathematical model used by the calculation core (EnergyPlus) for data processing is described in detail. Numerical values of the main parameters of the model in DesignBuilder are also provided, and its verification is conducted. The base model is used to assess the impact of increasing the building's thermal insulation level to the requirements of DBN 2.6-31 2016 and DBN 2.6-31 2021. Dynamic modeling established that this allows reducing energy consumption for heating by 48.9% and 55%, respectively, when all enclosing structures meet the minimum requirements.

The third chapter is devoted to a comprehensive assessment of the impact of varying heating regimes on overall energy consumption, thermal comfort, and the required power of heating systems in school buildings. It was found that using a heating regime with a 4°C setback during non-working hours allows saving from 23% to 27% of heating energy compared to continuous heating, depending on the building's thermal protection level. It was established that regulation with a similar setback, but according to the school schedule, allows additionally saving 1.8-4.2% compared to the previously described regime. Modeling results showed that implementing heating regimes with setbacks requires increasing the heating system's power to compensate for the period of sharp transition from reduced temperature to working temperature. It was found that

with building insulation combined with one of the setback heating schedules, the required heating system power does not exceed the similar indicator for continuous heating in the case of an uninsulated building, making the combined implementation of insulation and setback regime simultaneously a very promising energy-saving measure.

To analyze the impact of regulation according to the school schedule on the comfort of children in the premises, the PMV parameter is considered. A detailed description is provided in the chapter. Subsequently, a corner room that contacts, on one of the school days, with a class that is not used throughout the day is selected, thus studying the "worst-case scenario" to conclude the impact of the regime on thermal comfort. The modeling results show that there is no significant difference in the PMV parameter compared to the regime with setbacks during non-working hours.

The analysis described above concludes that regulation according to the school schedule is a promising energy-saving measure, although it is noted that implementing such a measure is much more complex than the other two described heating schedules.

The fourth chapter analyzes the operation of the school building under partial occupancy conditions. For research purposes, a cluster of five rooms was isolated from the entire building, of which three are planned to be used. The cluster has a cross shape, allowing the consideration of the following configurations of the rooms in use: horizontal, vertical, corner with roof contact (but without ground floor contact), and corner with ground floor contact (but without roof contact). The school building itself is considered as conserved, meaning the heating system is not used, and heating of the rooms is provided by individual electric heaters. Initially, the heating schedule was considered, in which the heating is completely turned off during non-working hours for maximum energy savings.

The annual energy consumption study of room layout configurations showed that the most efficient is the vertical layout of the rooms in use, being 8.5% more efficient than the closest corner configuration in terms of consumption and 22% more efficient than the horizontal configuration. The comfort analysis for the coldest day of the studied year showed that the vertical layout is also the most efficient in terms of this parameter.

The temperature change dynamics in the graphs suggested that the program might have calculated an overly powerful heating system, which was confirmed by the modeling results: the power calculated by the program was about 10 kW per room. To assess the possibility of implementing such a building operation regime under real conditions, a normal operation mode was modeled for the uninsulated building case, and the power calculated under these conditions was set in the partial occupancy model of the school, followed by a repeated comfort analysis. The heating system close to reality could not satisfy the comfort conditions under intermittent heating, setback schedules, or continuous heating. The air temperature in the rooms under continuous heating schedule, even for the case of a building with enclosing structures brought to modern normative conditions, did not exceed 12°C on the studied day in the best case.

Further, to resolve the situation, improvements were considered: varying levels of internal wall insulation and increased heating power; in the room itself, as well as introducing heating in adjacent rooms to compensate for the low average radiant temperature that arose in previous modeling.

Heating adjacent rooms did not only fail to achieve comfortable conditions but also significantly increased energy consumption, making them impractical. Further, a series of modelings were conducted to determine the minimum recommended heating device power when implementing a partial occupancy regime for the building, and the following results were obtained: for the uninsulated building – 33.14 W/m³; for the building with enclosing structures meeting the minimum requirements of DBN 2.6-31 2016 – 24 W/m³; and meeting the minimum requirements of DBN 2.6-31 2021 – 22.57 W/m³.

To study the impact of internal wall insulation on the comfort of premises under partial occupancy conditions, mineral wool insulation with a step of 2 cm was considered, and although the insulation positively affected the PMV parameter, 100% comfortable conditions for the entire heating period could not be achieved, even with internal wall insulation at the level of modern requirements for the thermal resistance of external enclosing structures, due to insufficient heating power. The study noted that with increasing thermal protection level of the rooms, solar gains partially compensated

for the insufficient heating power, noticeable by relatively high air temperature values and average radiant temperature in the rooms, leading to the suggestion to shift the school schedule forward by 2 hours. This positively affected comfort during working hours, although it did not solve the problem.

The energy consumption analysis of the described measures showed that increasing the heating system power to ensure comfortable conditions increased energy consumption by 77%. Variants with heating adjacent rooms showed a consumption increase of 100-200%, while failing to satisfy comfort. Internal wall insulation reduced energy consumption; however, comfortable conditions throughout the entire heating period could not be achieved.

Keywords: energy efficiency, energy consumption, energy saving, temperature regime, building energy modeling, computer modeling, modeling, numerical modeling, comfort conditions, PMV, temperature, temperature regimes, efficiency.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 1) Дешко В. І., Буяк Н. А., Білоус І. Ю., Гурєєв М. В., Голубенко О. О. Оцінка впливу заміни вікон на енергопотребу та умови комфорту в будівлі на основі динамічного моделювання. Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. 2018. № 3 (53). С. 52–62. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164428>
- 2) Дешко В.І., Білоус І.Ю., Голубенко О.О., Визначення економічної доцільності покращення огорожувальних конструкцій до нових мінімальних вимог за допомогою динамічного моделювання. «Енергетика і автоматика», №4. 2023. с. 45-59 [http://dx.doi.org/10.31548/energiya4\(68\).2023.045](http://dx.doi.org/10.31548/energiya4(68).2023.045)
- 3) Дешко В.І., Голубенко О.О., Вплив використання розкладу занять для програмування термостатів на енергоспоживання будівлі шкільного закладу, Технології та інжиніринг. 2024. № 1(18), С. 40-49. DOI: 10.30857/2786-5371.2024.1.4
- 4) Білоус І.Ю., Голубенко О.О., Енергоспоживання школи в умовах неповної зайнятості для різних режимів опалення приміщень. Системні технології. 2024. № 1 (150). С. 166-181. DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-17
- 5) Дешко В.І., Білоус І. Ю., Голубенко О.О., Сердечний П.Ю., Яркова Н.А. Оцінювання енергоефективності школи з врахуванням локальних відновлювальних джерел енергії. Інтегровані технології та енергозбереження.. 2024. №1. С. 83-98. DOI: 10.20998/2078-5364.2024.1.08

ЗМІСТ	
АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	7
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	12
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ	22
1.1 Теоретичні аспекти енергоефективності будівель.....	22
1.2 Останні дослідження у сфері енергоефективності та комфорту будівель.	31
1.3 Вибір програмного продукту для моделювання енергетичних характеристик будівлі	37
Висновки до розділу 1	39
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІВНЯ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ БУДІВЛІ НА РІВЕНЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДІВЛІ.....	41
2.1 Характеристики об'єкту дослідження	41
2.2 Основні параметри математичної моделі в DesignBuilder.....	43
2.3 Основні параметри енергетичної моделі в DesignBuilder.....	50
2.4 Оцінювання енергоефективності школи при зміні вимог до теплового захисту за допомогою динамічного моделювання.....	54
Висновки до розділу 2	59
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ВИКОРИСТАННЯ РОЗКЛАДУ ЗАНЯТЬ ДЛЯ ПРОГРАМУВАННЯ ТЕРМОСТАТІВ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДІВЛІ ШКІЛЬНОГО ЗАКЛАДУ	61
3.1 Методологія досліджень використання шкільного розкладу занять для програмування термостатів.....	61
3.2 Результати впровадження регулювання за розкладом шкільних занять	64
3.3 Дослідження впровадження енергоефективних режимів опалення на потужність системи опалення школи	70
3.4 Дослідження впливу енергоефективних режимів опалення на комфортність перебування в приміщеннях школи.....	72
Висновки до розділу 3	82
РОЗДІЛ 4. ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ШКОЛИ В УМОВАХ НЕПОВНОЇ ЗАЙНЯТОСТІ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ОПАЛЕННЯ ПРИМІЩЕНЬ	85

4.1 Методологія досліджень енергоспоживання будівлі школи в умовах неповної зайнятості	89
4.2 Оптимальне розміщення приміщень в умовах неповної зайнятості з точки зору енергоефективності	92
4.3 Дослідження комфортності перебування в приміщеннях в умовах неповної зайнятості	94
4.4 Дослідження технічних модернізацій приміщень для досягнення комфортних умов перебування в умовах неповної зайнятості.....	104
4.5 Дослідження можливості використання поведінкових особливостей в будівлі для досягнення комфортних умов перебування в приміщеннях за умови неповної зайнятості.....	114
4.6 Енергоспоживання будівлі в умовах неповної зайнятості з урахуванням забезпечення комфортних умов перебування в приміщеннях.....	118
Висновки до розділу 4	120
ВИСНОВКИ.....	123
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	125
ДОДАТОК 1 РОЗКЛАД ШКІЛЬНИХ ЗАНЯТЬ	136

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

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

BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method (Метод екологічної оцінки будівель, розроблений Дослідницьким інститутом будівель);

CEN – European Committee for Standardization (Європейський комітет з стандартизації);

EN – European Norms (Європейські норми);

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

IWEC – International Weather for Energy Calculations (Міжнародні кліматичні дані для енергетичних розрахунків);

LEED – Leadership in Energy and Environmental Design (Лідерство в енергетичному та екологічному дизайні);

MRT– Mean Radiant Temperature (середня радіаційна температура);

PMV – Predicted Mean Vote (прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини);

TR – Technical Report (технічний звіт);

ГВП – гаряче водопостачання;

ДБН – Державні будівельні норми;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ОВК – опалення, вентиляція, кондиціонування.

ВСТУП

Актуальність теми. Енергоефективні будівлі - це важлива складова сучасного будівництва, яка допомагає зменшувати споживання енергії та, як наслідок, викиди парникових газів, створювати комфортні та здорові умови для мешканців, підвищувати цінність нерухомості та конкурентні переваги на ринку. Проте, значний потенціал енергоефективності сучасних будівель прихований не лише в технічних рішеннях, але й у режимах використання, тобто, поведінці користувачів будівель та споруд. Розумний підхід до експлуатації будівлі може значно зменшити фактичне споживання енергії в будівлі. Поведінково-експлуатаційні фактори охоплюють такі аспекти, як регулювання температури, вентиляції, освітлення, використання побутової техніки, відкривання вікон, активність, розклад використання тощо. Урахування цих факторів є важливим чинником для точного оцінювання та прогнозування енергоефективності будівель, а також для визначення ефективних стратегій її підвищення, що набуває додаткової актуальності з все більшим використанням інтелектуальних систем управління системами вентиляції та опалення [1-4].

Проблема оцінювання впливу поведінково-експлуатаційних факторів на енергоефективність будівель є актуальною, щороку їй присвячуються все більше уваги у вітчизняній та світовій науковій літературі [1-5]. Основними методами дослідження цієї проблеми є динамічне моделювання, статистичний аналіз, експериментальні вимірювання, анкетування та інтерв'ювання користувачів. На основі аналізу останніх досліджень і публікацій можна виділити такі нерозв'язані частини загальної проблеми:

- розробка універсальної та гнучкої методології динамічного моделювання енергоефективності будівель з урахуванням поведінково-експлуатаційних факторів, яка дозволяла б адаптувати моделі до різних типів будівель, користувачів, клімату, сценаріїв тощо;
- Розробка та оцінювання різних стратегій підвищення енергоефективності будівель, які враховували б не тільки технічні аспекти, а й соціальні, економічні,

психологічні та екологічні фактори, що впливають на поведінку та моделі поведінки користувачів та підходи до експлуатації ними інженерних систем та обладнання.

- Підходи до прогнозування поведінки споживачів, і як наслідок, можливість впливу на піки споживання без зменшення комфортності перебування в приміщеннях будівель.

Окремою темою дослідження в цій сфері, яка є більш актуальною саме в реаліях сучасної України, є оптимальне використання будівель з неповною зайнятістю, а також в умовах пошкодження енергетичної інфраструктури країни, оскільки бойові дії що тривають з 2022 року гостро поставили ці питання на порядок денний.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є оцінювання впливу поведінково-експлуатаційних факторів на рівень енергоефективності будівлі за допомогою динамічного моделювання. Відповідно до поставленої мети вирішуватимуться такі завдання:

- проаналізувати теоретичні та методичні підходи до визначення та врахування поведінково-експлуатаційних факторів, що впливають на енергоспоживання та тепловий комфорт у будівлях;
- розробити та верифікувати динамічну модель енергоспоживання та теплового комфорту для обраної типової шкільної будівлі, яка описує її архітектурні, конструктивні, технічні та функціональні особливості, а також поведінку та експлуатацію користувачів; вибрати та обґрунтувати показники та методи оцінювання енергоефективності будівлі з урахуванням поведінково-експлуатаційних факторів;
- визначити вплив умов експлуатації на енергоспоживання при зміні рівня теплового захисту;
- аналіз та порівняння різних сценаріїв часткової експлуатації з точки зору споживання енергії та комфортності перебування в приміщеннях;

- розробити та оцінити ефективність заходів щодо підвищення енергоефективності будівлі школи в умовах неповної зайнятості з урахуванням поведінково-експлуатаційних факторів;

Об'єктом дослідження є споживання енергії на опалення будівлі та комфортність перебування людей в приміщеннях, на основі динамічного енергомодельовання імітаційної моделі будівлі школи в програмному середовищі.

Предмет дослідження є зміна характеристик енергетичного стану, комфортності перебування в приміщеннях, а також споживання теплової енергії та інших енергоресурсів будівлею школи в умовах неповної зайнятості з урахуванням поведінкових особливостей експлуатації будівлі.

Методи дослідження. Динамічне моделювання в програмному забезпеченні Design Builder, методи аналізу та синтезу.

Наукова новизна одержаних результатів. Полягає в розвитку методів та даних по впливу на споживання енергії та умови комфортності організації навчального процесу в умовах неповної зайнятості будівлі школи, в тому числі під час карантинних обмежень та військового стану, що дозволяє обирати шляхи підвищення енергоефективності за рахунок управління системами опалення та вентиляції, раціональних графіків використання приміщень та організації навчання, а саме:

- визначено характеристики ефективності енергоспоживання в школі для різних рівнів теплового захисту пілотної будівлі. Загалом, підвищення рівня теплового захисту дозволяє сумарно скоротити споживання енергії на опалення на 48,9%-55;

- вперше проведено аналіз та доведено доцільність використання розкладу шкільних занять як базису для регулювання системи опалення з точки зору комфортності та енергоспоживання. Це дозволяє зменшити споживання енергії на опалення на 1,8-4,2% в залежності від рівня утеплення будівлі;

- доведено вперше, найефективнішим типом розташування при неповній експлуатації школи є вертикальне розміщення приміщень, що

експлуатуються, як з точки зору комфортності, так і з точки зору енергоефективності (на 22,3% за горизонтальне розміщення);

- обґрунтовані рекомендації щодо дотримання комфортних умов в приміщеннях за умови неповної зайнятості будівлі при різних рівнях теплового захисту.

Таким чином, дослідження не лише доповнює сучасні знання у галузі енергоефективності будівель але й окреслює перспективні шляхи для подальших досліджень в сфері використання режимів експлуатації будівель для підвищення комфорту та енергоспоживання.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблено динамічну енергетичну модель в програмному середовищі DesignBuilder з метою моделювання енергоспоживання в школах з урахуванням специфіки графіку експлуатації будівлі різного рівня теплового захисту при повній та частковій зайнятості.

Проведено аналіз можливості та доцільності використання розкладу шкільних уроків як базису для програмування термостатів в школах для будівель з різним рівнем теплового захисту з точки зору енергоефективності та комфортності перебування в будівлі.

Запропонована схема та оптимізація розміщення приміщень в умовах неповної зайнятості.

Надані рекомендації для забезпечення комфортних умов будівель з неповною зайнятістю для шкільних закладів з різним рівнем теплового захисту.

Надані рекомендації щодо можливих технічних та поведінкових аспектів при впровадженні режиму неповної зайнятості, для забезпечення більш комфортних умов та підвищення рівня енергоефективності.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень, викладених у дисертаційній роботі, було представлено на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях та конкурсах, зокрема:

Динамічні методи розрахунку у будівництві та поширені технології утеплення. VIII міжнародна науково-практична конференція "КОМПЛЕКСНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ" м. Чернігів 10 - 12 травня 2018 р. С. 105-107. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Голубенко О.О.

Дешко В.І., Буяк Н.А., Білоус І.Ю., Гурєєв М.В., Голубенко О.О. Вплив теплоінерційних особливостей огорожень на умови комфортності під час впровадження енергоощадних режимів опалення житлових будівель. Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи» (4-5 червня 2019, м. Київ).

Білоус І.Ю., Голубенко О.О. Оцінювання рівня енергетичної ефективності будівлі при підвищенні вимог до теплового захисту будівель на прикладі загальноосвітньої школи. XX-й міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (25 - 28 квітня 2023 р.)

Роботу Голубенка О.О. та Гурєєва М.В. на Всеукраїнський конкурсу "МОЛОДЬ-ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ-2018: ВІДКРИТИЙ КОНКУРС МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА ЕНЕРГЕТИКІВ", яка відзначена Дипломом II-ступеня за роботу на тему: «Аналіз впливу заходів з енергозбереження на енергопотребу будівлі на основі динамічного моделювання» в номінації «Енергетика та енергоменеджмент».

Робота Голубенка О.О. та Гурєєва М.В. на Міжнародний конкурс студентських наукових робіт "Black Sea Science", яка відзначена Дипломом II-ступеня за роботу на тему: «ASSESSMENT OF THE WINDOW REPLACEMENT INFLUENCE ON BUILDING ENERGY CONSUMPTION AND HUMAN THERMAL COMFORT ON THE BASIS OF DYNAMIC MODELING» в номінації «Енергетика та енергоефективність».

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано у 5 наукових працях: 5 статей у наукових фахових виданнях (5 статті у фахових виданнях

України), 3 тез доповідей у збірниках матеріалів конференції, 1 участь у всеукраїнському конкурсі, 1 участь у міжнародному конкурсі.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 99 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 137 сторінок, 43 рисунків, 7 таблиць.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

1.1 Теоретичні аспекти енергоефективності будівель

Ефективне використання енергії у будівельній сфері є вирішальним елементом у дизайні та конструкції сучасних споруд, що гарантує комфортні умови проживання та роботи при одночасному зниженні енергетичних витрат. Концепція енергоефективності перевищує просте зниження енергоспоживання, охоплюючи цілісний підхід до підвищення теплового захисту будівель, інтеграції альтернативних джерел енергії та інтелектуального управління інженерними системами.

Основні завдання енергоефективності полягають у наступному:

1. зниження споживання ресурсів: ефективне використання енергії для зменшення загального енергоспоживання, що призводить до зниження собівартості продукції та підвищення її конкурентоздатності;
2. економія для населення: значне скорочення витрат на комунальні послуги через впровадження енергозберігаючих технологій та практик;
3. зменшення екологічного впливу: обмеження викидів парникових газів та інших забруднювачів, що сприяє захисту довкілля;
4. підвищення енергетичної безпеки: зменшення залежності від імпортованих енергоресурсів та підвищення стійкості енергетичної системи;
5. стимулювання інновацій: розвиток нових технологій та підходів, які сприяють енергозбереженню та використанню відновлюваних джерел енергії;
6. підвищення якості життя: забезпечення комфортних умов проживання та роботи без надмірних енергетичних витрат. [6]

Ці завдання відображають комплексний підхід до енергоефективності, який включає технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти. Вони спрямовані на створення сталої та ефективної енергетичної системи, яка відповідає потребам сучасного суспільства та забезпечує його розвиток.

У цьому контексті важливо розглянути нормативні акти, які регулюють енергоефективність в будівництві як в Україні, так і в Європейському Союзі. Дані нормативи визначають стандарти, вимоги та методики для підвищення енергоефективності будівель та систем управління енергією.

Нормативи України:

1. Закон України "Про енергетичну ефективність будівель"

Цей закон є основоположним документом, який визначає стратегічні цілі та завдання в галузі енергозбереження в Україні. Він регулює такі аспекти, як:

- енергоефективність у будівництві: закон встановлює вимоги до енергоефективності в будівництві, включаючи стандарти утеплення, використання енергоефективних матеріалів та систем опалення та кондиціонування повітря;
- енергетичний аудит: закон визначає процедури та вимоги до проведення енергетичного аудиту для оцінки та покращення енергоефективності в промисловості, комерційних та житлових будівлях;
- стимулювання енергозбереження: закон передбачає механізми фінансової підтримки та інші заходи для стимулювання впровадження енергоефективних технологій та практик.[7]

2. Державні будівельні норми (ДБН)

Державні будівельні норми (ДБН) в Україні є ключовими регулятивними документами, які визначають стандарти та вимоги до будівництва в різних сферах. Серед них є і нормативи, які спеціально регламентують питання енергоефективності в будівництві.

Один з найважливіших з них - ДБН В.2.6-31:2021 "Теплова ізоляція та енергоефективність будівель" [8]. Цей документ визначає широкий спектр вимог та стандартів, спрямованих на забезпечення оптимального використання енергії у будівництві та зменшення енерговитрат.

Основні аспекти, які включаються до [8], включають:

- утеплення будівель: визначення вимог до теплоізоляції будівельних конструкцій, включаючи стіни, дахи, підлоги та вікна, для зменшення тепловитрат;
- використання енергоефективних матеріалів: сприяння застосуванню будівельних матеріалів та технологій, які мають високий коефіцієнт теплоізоляції та дозволяють зменшити енерговитрати.

ДБН В.2.6-31:2021 "Теплова ізоляція та енергоефективність будівель" є важливим інструментом для забезпечення енергоефективності у будівництві в Україні, сприяючи зменшенню споживання енергії та впровадженню сталих практик у галузі будівництва.

ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування" [9] є державними будівельними нормами України, які регламентують проектування, монтаж, експлуатацію та реконструкцію систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря у будівлях та спорудах.

Серед вимог, також, висувуються вимоги до енергоефективності систем ОВК, серед яких вимоги до ККД обладнання, та вимоги до ізоляції трубопроводів та повітропроводів.

Цей документ є обов'язковим до виконання для всіх учасників будівельного процесу, включаючи проектувальників, будівельників та експлуатаційні організації. Застосовується як при новому будівництві, так і при реконструкції та капітальному ремонті систем ОВК.

Впровадження документу ДСТУ ISO 50001:2020 "Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо застосування" [10] мало на меті: підвищення енергоефективності, зниження енергоспоживання та поліпшення енергетичної продуктивності організацій. Є адаптацією Європейського стандарту ISO 50001 [11]. Документи [10, 11] допомагає організаціям встановлювати системи і процеси, необхідні для поліпшення енергетичної продуктивності, включаючи енергоефективність, використання та споживання енергії.

Висуває вимоги до енергетичної політики на підприємстві, планування енергоспоживання, моніторингу споживання енергії та підвищення енергоефективності.

Основною сферою застосування даного документу є організації будь-якого типу.

ДСТУ EN 15232-1:2020 "Енергоефективність будівель. Вплив автоматизації та управління будівлями" є стандартом, що встановлює вимоги до систем автоматизації та управління будівлями (BACS) для поліпшення їхньої енергоефективності. Стандарт [12] допомагає забезпечити ефективне управління енергоспоживанням будівель через використання передових систем автоматизації та управління, що сприяє значному зниженню витрат на енергію та підвищенню загальної енергоефективності будівель.

Документ регламентує:

- категоризація систем BACS: визначення категорій та рівнів функціональності систем автоматизації та управління будівлями;
- методи оцінки: оцінка впливу систем BACS на енергетичні показники будівель;
- рекомендації по впровадженню: настанови щодо впровадження ефективних систем автоматизації та управління для досягнення енергозбереження;
- функціональні можливості: перелік функціональних можливостей систем BACS, що впливають на енергоефективність, такі як контроль опалення, вентиляції, кондиціонування, освітлення тощо.

Застосовується:

- для нових та існуючих будівель: використовується при проектуванні нових будівель, а також для модернізації існуючих будівель з метою підвищення їх енергоефективності;
- проектувальниками та інженерами: при розробці та впровадженні систем автоматизації та управління будівлями;
- для оцінки енергоефективності: застосовується для оцінки впливу існуючих та нових систем автоматизації на енергетичні характеристики будівель.

ДСТУ EN ISO 52016-1:2022 Енергоефективність будівель. Енергетичні потреби для опалення та охолодження, внутрішні температури та потреби в охолодженні і опаленні, ступінь використання енергії. Частина 1: Моделі розрахунку та ДСТУ CEN ISO/TR 52016-2:2022 Енергоефективність будівель. Енергетичні потреби для опалення та охолодження, внутрішні температури та потреби в охолодженні і опаленні, ступінь використання енергії. Частина 2: Настанови щодо введення в дію [13, 14] встановлюють методи розрахунку енергетичних потреб для опалення та охолодження будівель, внутрішніх температур та ступеня використання енергії та надають настанови щодо застосування та введення в дію даних методів розрахунку.

Ці стандарти допомагають забезпечити енергоефективне проектування, експлуатацію та оцінку будівель, сприяючи зниженню енергоспоживання та підвищенню комфорту.

Директиви Європейського союзу:

Європейський Союз постійно оновлює свої директиви щодо енергоефективності з метою зменшення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та забезпечення сталого розвитку. Основні документи, що регулюють енергоефективність в ЄС, включають:

1. Energy Efficiency Directive (EED) [15]

Оновлення 2023 року: зміцнення правової бази для досягнення цілей пакету "Fit for 55" та плану "REPowerEU". Нові цілі включають щорічне зниження споживання енергії в державному секторі на 1,9% і щорічне оновлення будівель на 3% на всіх рівнях державного управління.

Цілі на 2030 рік: загальна мета енергоефективності встановлена на рівні не менше 11.7% у порівнянні з очікуваним споживанням енергії у 2030 році, зокрема 992.5 Mtoe для первинного енергоспоживання та 763 Mtoe для кінцевого енергоспоживання. Це перевищує попередні цілі, встановлені в 2018 році.

2. Fit for 55 Package [16]

Цей пакет законодавчих ініціатив, прийнятий у липні 2021 року, передбачає зменшення викидів парникових газів на 55% до 2030 року у порівнянні з рівнями 1990 року. Включає оновлення EED та інші законодавчі ініціативи для сприяння досягненню кліматичних цілей.

3. REPowerEU Plan [17]

Прийнятий у травні 2022 року як відповідь на кризу з енергетичними постачаннями, спрямований на зменшення залежності від імпорту викопного палива з Росії та прискорення переходу до чистої енергії. Цілі REPowerEU передбачають підвищення обов'язкових цілей енергоефективності до 13%.

4. Зелений курс (European Green Deal) [18]

Зелений курс (European Green Deal) є стратегією ЄС, спрямованою на перетворення Європи на кліматично нейтральний континент до 2050 року. Основні моменти в оновлених директивах щодо зеленого курсу:

- енергоефективність: включення амбітних цілей щодо зниження споживання енергії та збільшення частки відновлюваних джерел енергії;
- державний сектор: приділяється особлива увага оновленню будівель державного сектора, підвищенню їх енергоефективності та демонстрації переваг високоефективних будівель;
- роль громадян та бізнесу: сприяння активній участі громадян та бізнесу у досягненні енергоефективних цілей через енергетичний менеджмент та впровадження нових технологій.

Таким чином, оновлені директиви ЄС підкреслюють важливість енергоефективності як ключового елементу зеленого курсу та переходу до сталого майбутнього.

5. Директива про енергоефективність будівель (EPBD) [19]

Ця директива спрямована на поліпшення енергоефективності будівель у ЄС. Вона включає:

- мінімальні вимоги до енергоефективності: EPBD встановлює мінімальні вимоги до енергоефективності будівель та систем опалення та кондиціонування повітря;
- системи сертифікації: директива вимагає впровадження систем сертифікації енергоефективності будівель, що допомагає споживачам та інвесторам зрозуміти рівень енергоефективності будівель;
- аудити та огляди: EPBD також вимагає регулярні огляди та аудити енергоефективності будівель з метою ідентифікації можливостей для покращення.

6. Європейські норми (EN)

Європейські норми, такі як EN 15232 [20], EN 13790 [21] та інші визначають методики та процедури для оцінки та управління енергією в організаціях.

EN 15232: цей стандарт визначає методи оцінки та покращення енергоефективності будівель через управління системами автоматизації та контролю.

EN ISO 13790:2008 - це міжнародний стандарт, який надає методи оцінки енергетичних характеристик будівель. Він застосовується для розрахунку потреб в енергії на опалення та охолодження житлових і нежитлових будівель.

EN ISO 52000-1:2023 [22] замінює та оновлює EN 15603:2008 [23]. Цей стандарт описує методи для оцінки загальної енергетичної ефективності будівель. Стандарт [22] розроблений для забезпечення більш комплексного підходу до оцінки енергетичної ефективності будівель, враховуючи останні науково-технічні досягнення та вимоги.

Стандарт EN ISO 52003-1:2022 [24] визначає критерії та методи для встановлення енергетичних характеристик будівель, включаючи класифікацію енергоефективності та видачу енергетичних сертифікатів. Норматив є оновленням

EN 15217:2007 [25]. Оновлення було проведено, щоб привести стандарт у відповідність до сучасних технологічних вимог і методів оцінки енергетичної ефективності будівель

Стандарт EN 15316-1:2017 [26] регулює методи розрахунку енергетичних потреб та ефективності опалювальних систем у будівлях.

EN 15459-1:2017 [27] надає методи для економічної оцінки інвестицій у енергетичні системи будівель.

Ці нормативи та стандарти визначають стратегії та методи для покращення енергоефективності у будівництві як в Україні, так і в країнах Європейського Союзу.

Системи зеленої сертифікації будівель

1. LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) [28]

Є однією з найбільш відомих та використовуваних систем сертифікації енергоефективності та екологічної дизайну у будівництві, розроблена в Сполучених Штатах Америки. Ця програма ставить перед собою завдання сприяти будівництву та експлуатації будівель, які зменшують негативний вплив на навколишнє середовище, ефективно використовують ресурси та створюють здорове і комфортне середовище для користувачів.

Основні аспекти Схеми LEED включають:

- енергоефективність: схема LEED встановлює вимоги до енергоефективності будівель, включаючи використання відновлюваних джерел енергії, оптимізацію систем опалення, кондиціонування повітря та освітлення, а також застосування енергоефективних технологій;
- матеріали та ресурсозбереження: LEED враховує використання екологічно чистих та відновлюваних матеріалів, а також принципи ресурсозбереження в будівництві та експлуатації будівель;
- якість середовища: схема LEED ставить перед собою завдання створення здорового та комфортного середовища для користувачів будівель,

включаючи вимоги до якості повітря та води, а також до організації простору;

- інновації та дизайн: програма LEED сприяє впровадженню інноваційних технологій та дизайнерських рішень, спрямованих на зменшення впливу будівель на навколишнє середовище;
- стратегії планування та транспортні рішення: LEED враховує вплив місця розташування будівель та їх доступність для громадського та екологічно чистого транспорту.

Ця програма пропонує кілька рівнів сертифікації в залежності від досягнень будівлі в певних категоріях. Схема LEED стала популярною не лише в США, а й по всьому світу, в тому числі і в Україні та країнах Європейського Союзу.

2. BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) [29]

Ще однією з провідних систем сертифікації енергоефективності та екологічного будівництва у світі. Вона була розроблена Великобританським дослідницьким установою "Building Research Establishment" (BRE) і використовується для оцінки екологічної продуктивності будівель та просторів.

Основні аспекти Схеми BREEAM включають:

- енергоефективність: BREEAM встановлює вимоги до енергоефективності будівель, включаючи використання відновлюваних джерел енергії, заходи щодо зменшення витрат енергії на опалення, кондиціонування повітря та освітлення.
- матеріали та ресурсозбереження: BREEAM враховує використання екологічно чистих матеріалів, а також принципи ресурсозбереження в будівництві та експлуатації будівель;
- якість середовища: схема BREEAM сприяє створенню здорового та комфортного середовища для користувачів будівель, зокрема, встановлюючи вимоги до якості повітря та води;

- управління процесами та інновації: BREEAM стимулює впровадження інноваційних технологій та практик у будівництві, які сприяють зменшенню впливу будівель на навколишнє середовище;
- вплив на місцеве середовище: схема BREEAM враховує вплив будівель на місцеве середовище, зокрема, ефективність використання землі, водних ресурсів та вплив на флору та фауну;
- планування та транспорт: BREEAM також оцінює доступність будівлі та інфраструктури для громадського та екологічно чистого транспорту;
- управління: BREEAM встановлює вимоги до систем управління енергією та екологічними показниками під час експлуатації будівлі.

Схема BREEAM є важливим інструментом для забезпечення енергоефективності та екологічності в будівництві, а також сприяє підвищенню свідомості про збереження ресурсів та зменшення впливу будівництва на навколишнє середовище.

1.2 Останні дослідження у сфері енергоефективності та комфорту будівель.

В Україні дослідженню енергоефективності будівель за останні роки було присвячено значна кількість наукових робіт, різної направленості. Найбільшої популярністю користується дослідження енергоефективності будівель та споруд в умовах нормальної експлуатації [30-37] та питання впливу технічних покращень на енергоефективність будівлі [38-43]. В роботах використовуються як розрахунки, що опираються на вітчизняні стандарти [30-34, 37, 43], так і енергетичне моделювання будівель [32, 35, 36, 42].

В [30] розробили математичні моделі для визначення специфічної потреби в енергії для опалення та охолодження адміністративних будівель. Вони проаналізували вплив різних параметрів на енергоефективність будівель і запропонували методи для точного розрахунку енергоспоживання.

Наукова робота [31] присвячена розробці математичних моделей для визначення потреби в енергії для опалення будівель, акцентуючи увагу на методах розрахунку, які враховують різні експлуатаційні фактори. Їх дослідження спрямоване на покращення точності розрахунків енергоспоживання.

Дешко В., Суходуб І. та Білоус І. дослідили методи визначення специфічної потреби в енергії для опалення, що використовуються в Україні. Вони проаналізували національні стандарти та методики, пропонуючи шляхи їх вдосконалення [33].

Шовкалюк М.М. та Зіменко С.В. дослідили тепловтрати через огороження будівель, враховуючи різні методи оцінки теплозахисних властивостей. Вони розробили рекомендації для підвищення ефективності теплоізоляції [34].

Білоус І., Дешко В., та Суходуб І. виконали параметричний аналіз впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на енергоефективність будівель, використовуючи нелінійні багатофакторні регресійні моделі. Вони встановили ключові фактори, що впливають на енергоспоживання [41].

Вони ж, в роботі [36] описали можливості використання моделювання під час енергетичних аудитів будівель, підкреслюючи важливість точних моделей для оцінки енергоефективності. Ця робота є важливим кроком, що наближує вітчизняні нормативи до міжнародних.

Також, частина робіт пересвячена порівнянню вітчизняних підходів та енергетичного моделювання, наприклад Дешко В, Суходуб І, та Яценко О. провели порівняння споживання енергії будівлями за допомогою інструментальних і розрахункових методів. Вони встановили відмінності між теоретичними розрахунками та фактичними даними, що дозволяє оптимізувати енергетичні моделі [32].

В науковій статті [35] розробили моделі динамічного моделювання для аналізу теплового стану будівель та їх технічних систем. Вони вивчали вплив різних факторів на тепловий баланс та енергоефективність [35].

Наукове дослідження [42] присвячене вдосконаленню динамічних сіткових моделей для будівельних систем, з особливим акцентом на врахування

експлуатаційних факторів. Автор створив нові методи моделювання, які забезпечують більш точне врахування експлуатаційних параметрів, та надав висновки щодо досягнутих результатів, виявив переваги та можливості подальшого вдосконалення моделей.

Дослідження в Європі та США, в більшості своїй, присвячені пасивним будівлям та будівлям з нульовим споживанням. Підвищення теплового опору огорожувальних конструкцій будівель є важливою темою в цьому контексті. Для зниження залежності від викопного палива акцент робиться на пасивних будинках (ПБ), [44, 45] присвячені економічному аналізу впровадження такої покращеної оболонки будівлі.

Важливість та необхідність економічного аналізу та аналізу життєвого циклу для термомодернізації школи продемонстровано на прикладі Італії [43]. Автори статті підкреслюють, що термомодернізація дозволить підвищити рівень теплового комфорту.

Питанню теплового комфорту, також, приділяється особлива увага на заході. Данна проблема розглядається в контексті необхідності скорочення споживання енергії [46, 47]. У статті [48] запропоновано багатоцільовий оптимізаційний підхід до енергетичного проектування огорожувальних конструкцій будівель, який дозволяє знайти оптимальне рішення для будівель з майже нульовим споживанням енергії, що мінімізують споживання первинної енергії. Запропоновані рішення спрямовані на забезпечення оптимальних будівельних стратегій для типового житла в Італії для чотирьох різних місцевостей. У статті [49] розглядаються питання, пов'язані з реконструкцією існуючого житлового фонду. Дослідження існуючого будівельного фонду та підвищення його енергоефективності представляють певні проблеми порівняно з проектними умовами. Ці проблеми обмежують впровадження низки енергозберігаючих заходів. У статті досліджуються різні заходи з енергозбереження для фасадів будівель з використанням енергетичного моделювання будівель. Також оцінюється їх економічна життєздатність спеціально для середземноморського клімату.

Оптимальні підходи до реконструкції старих будівель є також важливим питанням в Європі. Це викликано розбіжністю в старих підходах до будівництва та жорсткості нових вимог. Наприклад, у статті [50] було досліджено тепловий комфорт існуючих житлових будинків, збудованих до 1945 року, і виявлено, що сучасні стандарти комфорту не дозволяють оцінити рівень комфорту в таких будівлях, а їх застосування призводить до недооцінки їх теплового комфорту.

Аналізу зміни теплового комфорту при впровадженні заходів з енергоефективності також надається значна увага [51-54].

Значна частина досліджень присвячена аналізу комфортності перебування в приміщеннях, за різних навколишніх умов, зміни внутрішніх параметрів [55] і т.д..

В роботі [55] вивчали параметри, що впливають на внутрішню температуру повітря в будівлях, пропонуючи шляхи оптимізації для покращення теплового комфорту та енергоефективності.

Наукове дослідження [56] спрямоване на розробку методів оцінки впливу температурних умов на енергоефективність систем опалення в будівлях для підвищення енергоефективності та комфортності. Використовуючи реальні дані зовнішніх температур, створюються математичні моделі, які імітують роботу опалювальних систем за різних умов. Проводяться експериментальні дослідження для вимірювання параметрів роботи систем опалення при різних температурах. Отримані результати застосовуються для розробки методів оцінки впливу зовнішніх температур на енергоефективність та комфортність опалювальних систем. Висновки та рекомендації з дослідження допомагають оптимізувати роботу опалювальних систем для підвищення їх ефективності та забезпечення комфортного мікроклімату в будівлях. Дослідження має важливе значення для практики в галузі енергетики та будівництва, оскільки сприяє розробці ефективних систем опалення, які враховують зовнішні температурні умови та забезпечують оптимальний комфорт для мешканців.

При цьому, на відміну від Українських дослідженнях цього питання, проблему перегріву будівель також є предметом дискусії. Уникнення перегріву в будівлях розглядається за допомогою різних заходів контролю на прикладі

будинку з централізованим опаленням у Швеції в роботі [57]. Наступним кроком, пропонується впровадити машинне навчання систем для забезпечення суб'єктивного комфорту [57].

В контексті перегріву, звісно, важливим параметром є сонячна радіація [58]. Стаття [58] розглядає вплив сонячної активності на тепловий режим у приміщеннях із системою радіаційного опалення. У рамках дослідження використовується метод імітації руху сонця, який здійснюється шляхом нагрівання плівок під час експериментів. Додатково використовується тепловий манекен для оцінки теплового комфорту в приміщенні. Експерименти проводилися в помірному океанічному кліматі міста Тур, Франція. Отримані результати свідчать, що рухома сонячна пляма призводить до зниження теплового комфорту в приміщенні.

Також проводиться дослідження, що допоможуть покращити нормативну базу. Вимоги до значень PMV для дітей дещо вищі, ніж для дорослих [59]. Увага приділяється індивідуальним вимогам до теплового комфорту за статтю, віком тощо. У результаті, ми спостерігаємо перехід від парадигми централізованого забезпечення якості мікроклімату до персоналізованих систем [59].

Поведінка людей що експлуатують будівлі також набирає популярності. Наукове дослідження [60] спрямоване на вивчення впливу різноманітних факторів на ефективність систем тепlopостачання. Автори аналізують температурно-погодні умови (зовнішню температуру повітря, вологість, опади) та експлуатаційні фактори (режим роботи систем опалення, теплоізоляція будівель). Дослідження також підкреслює необхідність розширення аналізу на ширший спектр факторів, включаючи соціо-економічні.

Дослідження [61] використовує методи динамічного моделювання для аналізу впливу поведінкових аспектів користувачів на енергоефективність будівель. Основною метою є з'ясування, як зміна поведінки користувачів може впливати на рівень енергоспоживання та як цей вплив можна враховувати під час проектування та експлуатації будівель. Результати показують, що зміни в поведінці, такі як коригування графіків роботи систем опалення та

кондиціонування повітря або впровадження енергоефективних технологій освітлення, можуть значно зменшити витрати енергії.

В науковому дослідженні [62] вивчаються звички користувачів щодо використання електроприладів, систем опалення і т.д.. Дослідження вказує, що зміна звичок користувачів може суттєво вплинути на витрати енергії.

Дослідження [63] аналізує різні моделі поведінки користувачів у контексті симуляції енергоспоживання будівель. Серед розглянутих моделей є основані на статистичних даних, індивідуальних користувачах і моделі на основі машинного навчання, що аналізують великі обсяги даних для виявлення закономірностей у поведінці.

Дослідження [64] присвячене огляду та систематизації існуючих методів моделювання поведінки користувачів для симуляції енергоспоживання будівель, з метою визначення їхніх переваг та недоліків. Розглядаються статистичні методи, які аналізують статистичні дані щодо поведінки користувачів; агентні моделі, що враховують кожного користувача як окремого агента з індивідуальними рішеннями; та моделі машинного навчання, які використовують алгоритми для аналізу великих обсягів даних і виявлення закономірностей. Дослідження підкреслює складність цієї задачі та необхідність комбінування різних підходів для досягнення максимальної точності та ефективності. Для подальшого розвитку цієї області потрібно продовжувати роботу над оптимізацією методів та врахуванням різних факторів, що впливають на поведінку користувачів у будівлях.

Ці джерела демонструють різні підходи та методи для оцінювання впливу поведінково-експлуатаційних факторів на енергоефективність будівель, які можуть бути застосовані для різних типів будівель, користувачів, кліматичних умов, сценаріїв тощо. Варто зазначити, що не зважаючи на значний обсяг робіт присвячених енергоефективності, комфорту та енергоспоживанню, питання щодо енергоефективності та комфорту в будівлях з частковою зайнятістю залишається погано висвітленим, роблячи його перспективною темою дослідження.

1.3 Вибір програмного продукту для моделювання енергетичних характеристик будівлі

Оскільки дослідження проводиться на базі енергетичного моделювання будівлі, одним з етапів написання роботи став вибір програми моделювання.

Для аналізу та вибору оптимального програмного забезпечення, яке задовольняє потреби моделювання енергетичних характеристик будівлі, було розглянуто кілька програм: RemRate [65], WUFI Passive [66], eQUEST [67] та DesignBuilder [68].

Кожен застосунок було детально проаналізовано на предмет гнучкості налаштувань, легкості використання, доступності та вихідних даних, та порівняно на предмет можливості використання в даному дослідженні.

До таблиці 1.1 зведено оцінку переваг та недоліків кожної програми, а також причини, чому деякі з них не були обрані:

Таблиця 1.1 – Порівняння програмного забезпечення для енергетичного моделювання будівель:

Продукт	Ядро	Сфера застосування	Переваги	Недоліки	Висновок
RemRate	Власне	Енергетичний аналіз житлових будівель, сертифікація відповідно до програм Energy Star [69], LEED for Homes [70], NGBS [71]	Швидкість, простота	Обмежена гнучкість, неможливість модернізувати графіки експлуатації, не підходить для нежитлових будівель	Не була обрана через її негнучкість та непридатність для моделювання нежитлових будівель, а також відсутність можливості проводити погодинні моделювання

Продовження таблиці 1.1

Продукт	Ядро	Сфера застосування	Переваги	Недоліки	Висновок
WUFI Passive	Власне	Енергетичний аналіз будівель, сертифікація пасивних будівель	Гнучкий графічний інтерфейс, інтегрований з SketchUp [72], аналіз вологості, швидкість	Обмежена гнучкість, неможливість модернізувати графіки експлуатації, не надає достатньої кількості вихідних параметрів	Не була обрана через обмеження в налаштуваннях і недостатньо детальних вихідних даних для дослідження.
eQUEST	DOE-2	Енергетичний аналіз будівель	Безкоштовна, швидкість, наявність графічного інтерфейсу, гнучкість моделювання, широкий спектр можливостей аналізу	Обмежені можливості для роботи в метричній системі мір, негнучкий графічний інтерфейс	Не була обрана через недоліки у підтримці метричної системи
DesignBuilder	EnergyPlus	Енергетичний аналіз будівель	Інтеграція з EnergyPlus [73], велика кількість налаштувань і опцій	Вимоги до ресурсів комп'ютера, повільна	DesignBuilder, завдяки своїй інтеграції з EnergyPlus і розширеним можливостям налаштування, була обрана як найкращий варіант для потреб даного проекту, незважаючи на вищу складність і вимоги до апаратного забезпечення.

DesignBuilder, завдяки своїй інтеграції з EnergyPlus [73] і розширеним можливостям налаштування, була обрана як найкращий варіант для потреб даного проекту, незважаючи на вищу складність і вимоги до апаратного забезпечення.

Висновки до розділу 1

В розділі надано детальний аналіз українських та закордонних нормативів, що регулюють енергоефективність будівель. Аналіз показує, що українська нормативна база є близькою до вимог Європейського союзу, що окреслює стан вимог до енергоефективності в Україні як сучасний. Регулярне оновлення як вітчизняних, так і закордонних вимог дозволяє підходам враховувати наукові надбання, та постійно підвищувати енергоефективність країн, роблячи вимоги більш жорсткими з часом, а також впроваджуючи, в обов'язковому порядку, сучасні технічні рішення на практиці.

Нормативна база, розглянута вище лягла в основу подальшого дослідження, що дозволить наданим результатам та рекомендаціям не суперечити нормативним вимогам до енергоефективності будівель, та пропонувати впровадження на практиці.

Також, проаналізовані директиви європейського союзу щодо підвищення енергоефективності та зменшенню викидів парникових газів в досяжному майбутньому. Даний аналіз дозволяє краще зрозуміти поточні тенденції в цій сфері.

У першому розділі дисертації, також, було розглянуто сучасні наукові роботи присвячені енергоефективності будівель та споруд. Вчені, як українські, так і закордонні приділяють значну увагу питанню енергоефективності будівель та термічному комфорту в них. Споруди, що досліджуються включають в себе житлові та комерційні будівлі, а також будівлі державних підприємств, проте житловому фонду присвячено найбільше досліджень, що можна пояснити тим, що житлові будівлі споживають найбільше енергії, як група споживачів.

В дослідженнях можна висвітлити декілька основних напрямків:

- аналіз та порівняння типових технічних рішень з поліпшення енергоефективності, їх ефективність, доцільність та вплив на людей що експлуатують будівлю;
- дослідження присвячені нетиповим заходам з енергозбереження;

- оцінка впливу експлуатації будівлі на її енергоспоживання;
- дослідження комфорту людей, що перебувають в приміщеннях;
- аналіз пасивних будівель та будівель з нульовим споживанням.

Аналіз останніх наукових робіт в цій сфері показує важливість вирішення загальної проблеми енергоефективності будівель за допомогою комплексного підходу з врахуванням поведінкових, експлуатаційних та кліматичних аспектів на рівні з технічними рішеннями.

Варто зазначити, що більшість досліджень присвячена вивченню нормальних режимів використання будівлі, тема споживання енергії та комфортності перебування в приміщеннях будівлі в режимі часткової експлуатації досліджена недостатньо, що надає додаткової актуальності даній роботі.

Енергетичне моделювання є інструментом, що широко використовується в сучасних дослідженнях. В розділі проведений огляд продуктів з енергетичного моделювання будівель, висвітлені їх основні параметри, сфера застосування та математичний апарат.

Продукти були проаналізовані на можливість використання в даній роботі, це дозволило обрати оптимальний інструмент для подальшого дослідження. Продукт, що було обрано – програма з енергетичного моделювання будівель DesingBuilder.

Основні результати та висновки розділу демонструють необхідність інтеграції різних дисциплін та секторів вивчення, від теоретичних аспектів дизайну та конструкцій до практичних аспектів експлуатації та поведінки користувачів, а також врахування існуючої нормативної бази для ефективного підвищення рівня енергоефективності в будівлях. Ця інтеграція дозволяє більш ефективно вирішувати задачі з підвищення енергоефективності та комфорту будівель, сприяючи, при цьому, сталому розвитку та зниженню впливу на довкілля.

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІВНЯ ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ БУДІВЛІ НА РІВЕНЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДІВЛІ

2.1 Характеристики об'єкту дослідження

Дослідженням охоплено імітаційну модель будівлі середньої загальноосвітньої школи, що базується на реально існуючій будівлі СЗШ розташованої в Івано-Франківській області. Школа має три поверхи та типову для шкіл Н-подібну форму. Рік побудови 1966. Загальна площа будівлі 1959,35 м².

Школа, як об'єкт для дослідження енергоефективності будівель, має ряд особливостей, що відрізняють їх від інших типів будівель, таких як житлові будинки, лікарні, дитячі садочки та громадські будівлі. Основні аспекти, які роблять школи унікальними:

- робота відповідно до затвердженого розкладу;
- легкість впливу на графік експлуатації;
- висока щільність заповнення людьми;
- високі вимоги до умов комфортності;
- великий відсоток закладів розміщені в старому фонді будівель, що вимагають модернізації для підвищення енергоефективності.

Саме передбачуваність та можливість впливу на графік експлуатації (наприклад зміною шкільного розкладу), стало ключовим фактором вибору школи як об'єкту дослідження.

Більшість приміщень виконують функцію навчальних класів. В школі також присутні повноцінна кухня та їдальня, великий спортивний зал, душові та приміщення обслуговуючого персоналу.

За нормального графіку експлуатації, будівля працює з 8 до 18, проте більшість користувачів залишає школу до 16.

Графік навчання наведений в додатку 1.

Максимально, в школі може перебувати близько 500 учнів.

Інформація стосовно непрозорих огорожувальних конструкцій будівлі зведена до таблиці 2.1:

Таблиця 2.1 – склад непрозорих огорожувальних конструкцій

Елемент огорожувальної конструкції	Матеріал	Товщина, м	λ_p , Вт/(м·К)
Стіни	Штукатурка цементно-піщаному	0.01	0.81
	Цегла керамічна порожниста	0.525	0.58
	Штукатурка цементно-піщаному	0.01	0.81
Підлога по ґрунту	Плита залізобетонна	0.25	2.04
	Стяжка цементно-піщана	0.07	0.81
	Фінішне покриття	0.03	0.18
Суміщене перекриття	Бітум	0.025	0.22
	Плита залізобетонна	0.25	2.04

Вікна — металопластиковий профіль, двокамерні, 4M1-16-4M1-16-4M1 (заміна вікон проводилася нещодавно).

Опір огорожень будівлі представлений в табл.1.

Опалення забезпечене власною газовою котельнею, система опалення - водяна, двотрубна, система механічної вентиляції та рекуперації відсутня.

Система опалення прийнята при симуляції – електронагрівачі в кожному приміщенні для зменшення впливу втрат в механічних системах при аналізі, а також пришвидшення часу симуляцій. Також, необхідно зазначити, що надходження свіжого повітря відбувається за рахунок природної вентиляції, системи механічної вентиляції та рекуперації відсутня.

Система гарячого водопостачання організована за допомогою електричних водонагрівачів, розташованих безпосередньо біля точок споживання. Важливо зауважити, що ця система призначена лише для задоволення потреб шкільної кухні.

З метою більш широкого дослідження було досліджено кілька сценаріїв теплозахисту будівлі, що відповідають трьом найбільш типовим станам будівель закладів загальної середньої освіти в Україні. А саме:

- базова модель – школа що не пройшла термомодернізацію;
- ДБН В.2.6-31:2016 [74] – школа що пройшла термомодернізацію раніше;
- ДБН В.2.6-31:2021 [8] – школа що пройшла сучасну термомодернізацію.

Теплофізичні характеристики огорожувальних конструкцій, що були використані при моделюванні наведені в таблиці 2.2:

Таблиця 2.2 – Коефіцієнт теплопередачі огорожувальних конструкцій, використані в моделях, Вт/(м²К)

Тип огородження	Існуючий стан	ДБН В.2.6-31:2016	ДБН В.2.6-31:2021
зовнішні стіни	0,8	0,303	0,25
вікна	1,67	1,33	1,11
Суміщенні перекриття	0,89	0,167	0,143

2.2 Основні параметри математичної моделі в DesignBuilder

Дослідження проводилось на основі енергетичного моделювання будівлі в програмному середовищі DesignBuilder [68].

DesignBuilder дозволяє проводити динамічне моделювання енергоспоживання будівлі з урахуванням детального відображення графіків присутності людей, обладнання та освітлення. Також, програма враховує перетопи між приміщеннями, що критично для подальшого дослідження.

Використання динамічної енергетичної моделі в програмі DesignBuilder дозволяє враховувати взаємодію між різними аспектами енергоспоживання будівлі, сприяючи глибокому аналізу впливу оновлених мінімальних норм ізоляції на енергоефективність шкільних приміщень. Це допомагає розробити оптимальні стратегії підвищення енергоефективності конкретного об'єкта.

Кліматичні дані для моделювання в енергетичних розрахунках були взяті з бази даних International Weather for Energy Calculations 2 (IWEC2) [75],

розробленої спеціально для потреб енергетичного моделювання будівель. Дані IWEC2 засновані на реальних метеорологічних спостереженнях і включають середні місячні та годинні показники, такі як:

- температура повітря, представлена середньомісячними максимальними, мінімальними та середніми значеннями, а також годинними даними;
- відносна вологість, зібрана в середньомісячних та годинних значеннях;
- сонячна радіація, включаючи горизонтальну та вертикальну на різні орієнтації будівель, в середньомісячних та годинних вимірах;
- опади, де зазначено середньомісячні кількості та дні з опадами;
- швидкість вітру, представлена середньомісячними та годинними значеннями, з вказівкою напрямку вітру;
- небесна хмарність, що вимірюється у відсотках покриття неба хмарами на місячному та годинному рівні.

Переваги використання кліматичних баз IWEC висвітлені в [76-78]

Програма використовує продвинутий математичний апарат для розрахунку енергетичних параметрів будівлі, що значно підвищує точність вихідних параметрів. [79]

Розрахунок тепловтрат через огорожуючі конструкції.

Провідність через стіни є процесом, при якому тепло передається через тверді матеріали, що складають стіну. Це включає в себе передачу тепла від внутрішньої поверхні стіни до зовнішньої, і навпаки. В програмі EnergyPlus для моделювання цього процесу метод передавальних функцій для провідності (Conduction Transfer Function Method, CTF):

$$q(t) = \sum_{j=0}^J Y_j \cdot T_{in}(t - j\Delta t) + \sum_{k=0}^K Z_k \cdot q(t - k\Delta t), \quad (1)$$

де:

$q(t)$ – тепловий потік у момент часу t (Вт/м²);

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

Y_j, Z_k – коефіцієнти передавальної функції для провідності;

Δt – часовий крок (с);

J, K – кількість часових кроків для температури та теплового потоку відповідно.

Формули для коефіцієнтів Y_j , та Z_k у рівняннях передавальної функції провідності (Conduction Transfer Function, CTF) визначаються шляхом розв'язання системи рівнянь, отриманих з використанням числових методів і теорії теплопередачі. Ці коефіцієнти зазвичай розраховуються програмно під час підготовки даних для моделювання.

Розрахунок коефіцієнтів здійснюється за допомогою числових методів, таких як метод кінцевих різниць (Finite Difference Method) або метод скінченних елементів (Finite Element Method). Ці методи розбивають стіну на невеликі елементи і розраховують теплопередачу через кожен з них.

Для розрахунків коефіцієнтів Y_j , та Z_k використовуються такі основні формули, які описують теплопередачу через багатошарові конструкції:

коефіцієнт Y_j , розраховується як частина передавальної функції, що враховує вплив температур на внутрішній поверхні стіни:

$$Y_j = \sum_{i=0}^N a_i \cdot h_{i,j}, \quad (2)$$

де:

a_i – коефіцієнти теплопередачі;

$h_{i,j}$ – імпульсна відповідь системи.

коефіцієнт Z_k розраховується як частина передавальної функції, що враховує вплив теплового потоку через стіну:

$$Z_k = \sum_{m=0}^M b_m \cdot g_{m,k}, \quad (3)$$

де:

b_m – коефіцієнти теплопередачі;

$g_{m,k}$ – імпульсна відповідь системи.

Для визначення коефіцієнтів використовується зведена система рівнянь, що описує теплопередачу через багатошарові конструкції. Зазвичай, це система лінійних алгебраїчних рівнянь, яка розв'язується методом Гаусса або іншими числовими методами.

Розрахунок температури повітря в зоні.

Температура повітря в зоні визначається за допомогою енергетичного балансу, який враховує всі джерела теплових надходжень та тепловтрат. Основне рівняння для розрахунку температури повітря в зоні виглядає так:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{sur\ faces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys}, \quad (4)$$

де:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$ – міна внутрішньої температури зони з часом, де:

C_z – теплоємність зони (Дж/К);

T_z – температура зони (°C);

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ – сума внутрішніх теплових надходжень від різних джерел, таких як прилади, освітлення та люди;

$\sum_{i=1}^{N_{sur\ faces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ – конвективний теплообмін від поверхонь зони, де:

h_i – коефіцієнт тепловіддачі для поверхні i (Вт/м²К);

A_i – площа поверхні i (м²);

T_{si} – температура поверхні i (°C);

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ – теплообмін при міжзонному перемішуванні повітря,

де:

\dot{m}_i – масова витрата повітря з зони i (кг/с);

C_p – питома теплоємність повітря (Дж/кг·К);

T_{zi} – температура повітря в зоні i (°C);

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ – тепловіддача за рахунок інфільтрації зовнішнього повітря,

де:

\dot{m}_{inf} – масова витрата інфільтраційного повітря (кг/с);

T_{∞} – температура зовнішнього повітря (°C);

\dot{Q}_{sys} – системи вентиляції та опалення, які додають або віднімають тепло від зони.

Це рівняння дозволяє точно визначити температуру повітря в зоні, враховуючи всі джерела теплових надходжень та тепловтрат. Воно є ключовим для моделювання теплового комфорту та енергоефективності будівель у програмних комплексах, таких як EnergyPlus та DesignBuilder.

Розрахунок середньої радіаційної температури (MRT)

EnergyPlus використовує метод зваженого усереднення по поверхні (Surface Weighted MRT) для розрахунку середньої радіаційної температури. Цей метод враховує температуру найближчої поверхні і середню температуру всіх поверхонь у зоні, щоб забезпечити більш точну оцінку радіаційного теплового комфорту для людини, яка знаходиться близько до певної поверхні.

Цей метод передбачає, що MRT є середнім значенням температури найближчої поверхні і середньої температури всієї зони:

$$T_r = \frac{1}{2}(T_{closest\ surface} + T_{zone\ average}), \quad (5)$$

де:

$T_{closest\ surface}$ – температура найближчої поверхні;

$T_{zone\ average}$ – усереднена температура по зоні.

Усереднена температура поверхонь у зоні розраховується як середньозважене значення температур усіх внутрішніх поверхонь у приміщенні за формулою:

$$T_{zone\ average} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \epsilon_i T_i}{\sum_{i=1}^n A_i \epsilon_i}, \quad (6)$$

де:

A_i – площа поверхні i ;

ϵ_i – випромінювальна здатність поверхні i ;

T_i – температура поверхні i ;

n – кількість поверхонь.

При розрахунку параметра T_i враховуються наступні фактори: теплопровідність матеріалів, Товщина конструкцій, внутрішні та зовнішні теплові умови, сонячна радіація, коефіцієнти теплопередачі, випромінювальні властивості матеріалів, внутрішні теплові надходження, масова витрата повітря.

Температура поверхні T_i може бути розрахована за допомогою рівняння теплового балансу, що враховує всі теплові потоки:

$$T_i = \frac{q_{rad} + q_{conv} + q_{cond}}{UA}, \quad (7)$$

де:

q_{rad} – радіаційний тепловий потік;

q_{conv} – конвективний тепловий потік;

q_{cond} – теплопровідний потік;

U – коефіцієнт теплопередачі;

A – площа поверхні.

Середня радіаційна температура (MRT) є важливим показником для оцінки теплового комфорту в приміщеннях.

У програмі DesignBuilder, початкові умови для кожного параметра можуть варіюватися в залежності від конкретних налаштувань користувача, проте ряд початкових параметрів, що програма використовує за замовченням є наступними:

- початкова температура приміщення: типові значення: 20°C для опалювального сезону та 24°C для охолоджувального сезону;
- відносна вологість задається в діапазоні від 30% до 60%, залежно від кліматичних умов і типу будівлі;
- температура зовнішнього повітря варіюється від клімату, в якому розташована будівля, та місяця моделювання, інформація отримується з кліматичного файлу.

Варто зазначити, що програма DesignBuilder використовує "прогрів" (warm-up) період для стабілізації внутрішніх умов будівлі перед початком основних розрахунків, щоб нівелювати вплив початкових умов на результати. Це включає повторне моделювання одного і того ж періоду (зазвичай кількох днів) до досягнення стабільності в температурах і інших параметрах. Зазвичай потрібно 25-30 циклів для досягнення стабільності. Цей процес забезпечує точніші та достовірніші результати енергетичного моделювання будівлі.

Граничні умови, в залежності від розрахунку, можуть бути наступними:

- кліматичні умови;
- внутрішні теплові надходження;
- Інфільтрація і вентиляція та інші.

2.3 Основні параметри енергетичної моделі в DesignBuilder

З метою моделювання, була побудована геометрія будівлі, за даними з технічного паспорту будівлі. Геометрія будівлі в програмі DesignBuilder наведена на рисунках 2.1-2.4:

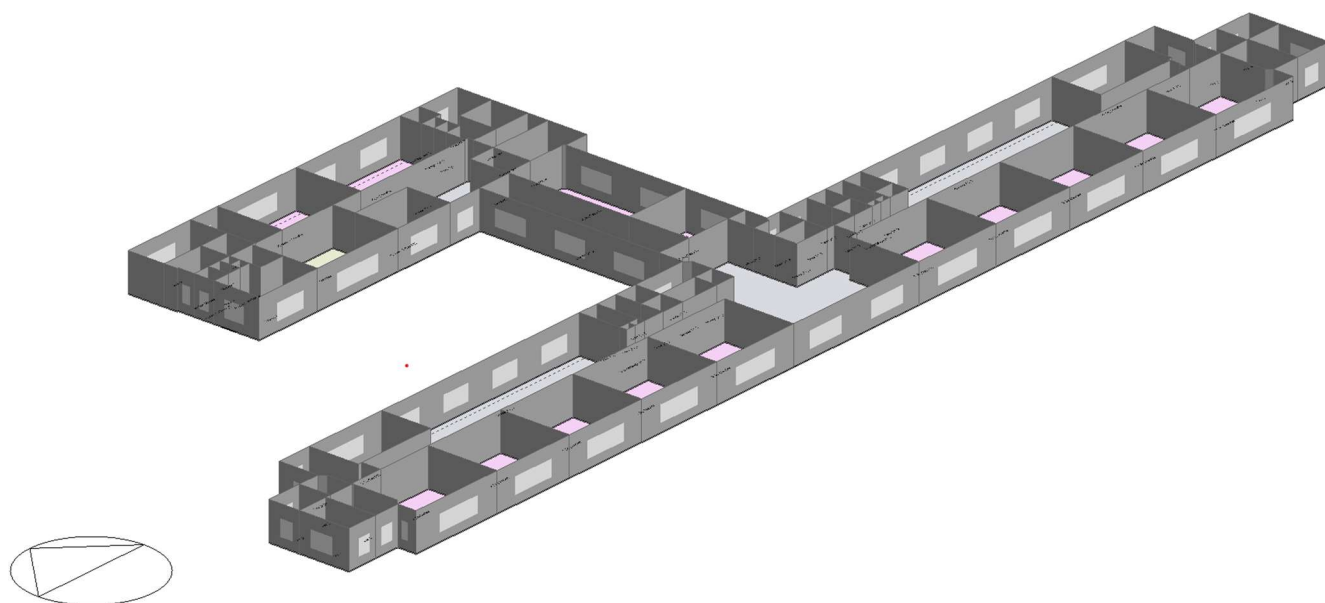


Рисунок 2.1 – Геометрія будівлі у програмі DesignBuilder, перший поверх

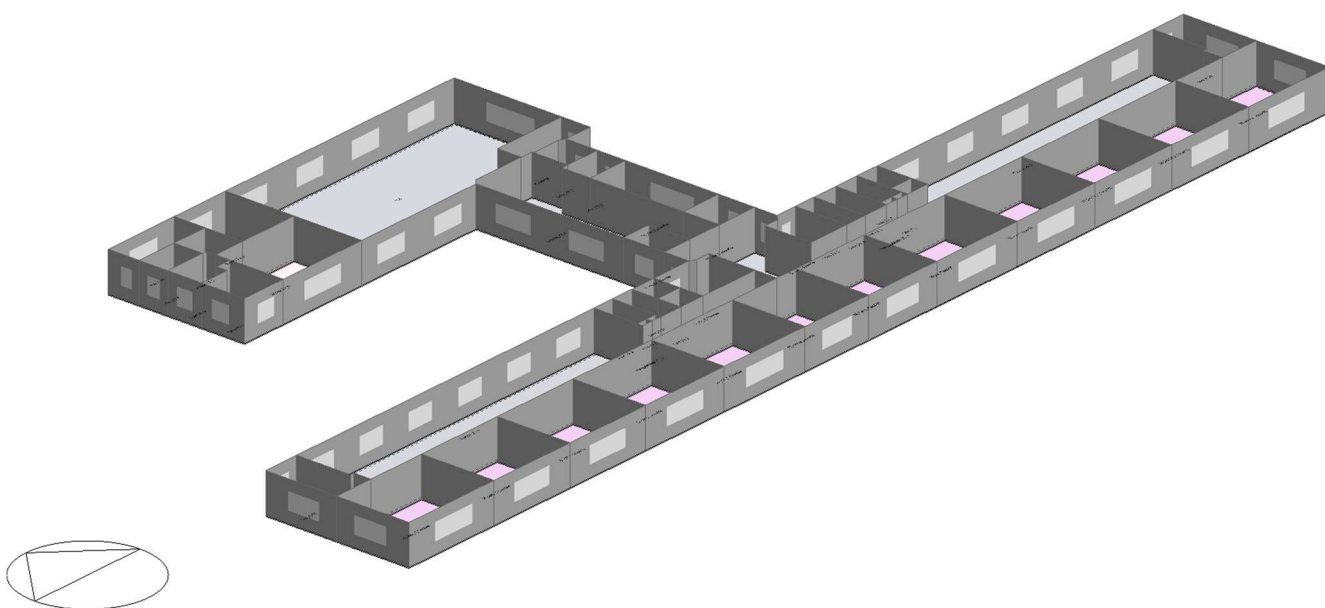


Рисунок 2.2 – Геометрія будівлі у програмі DesignBuilder, другий поверх

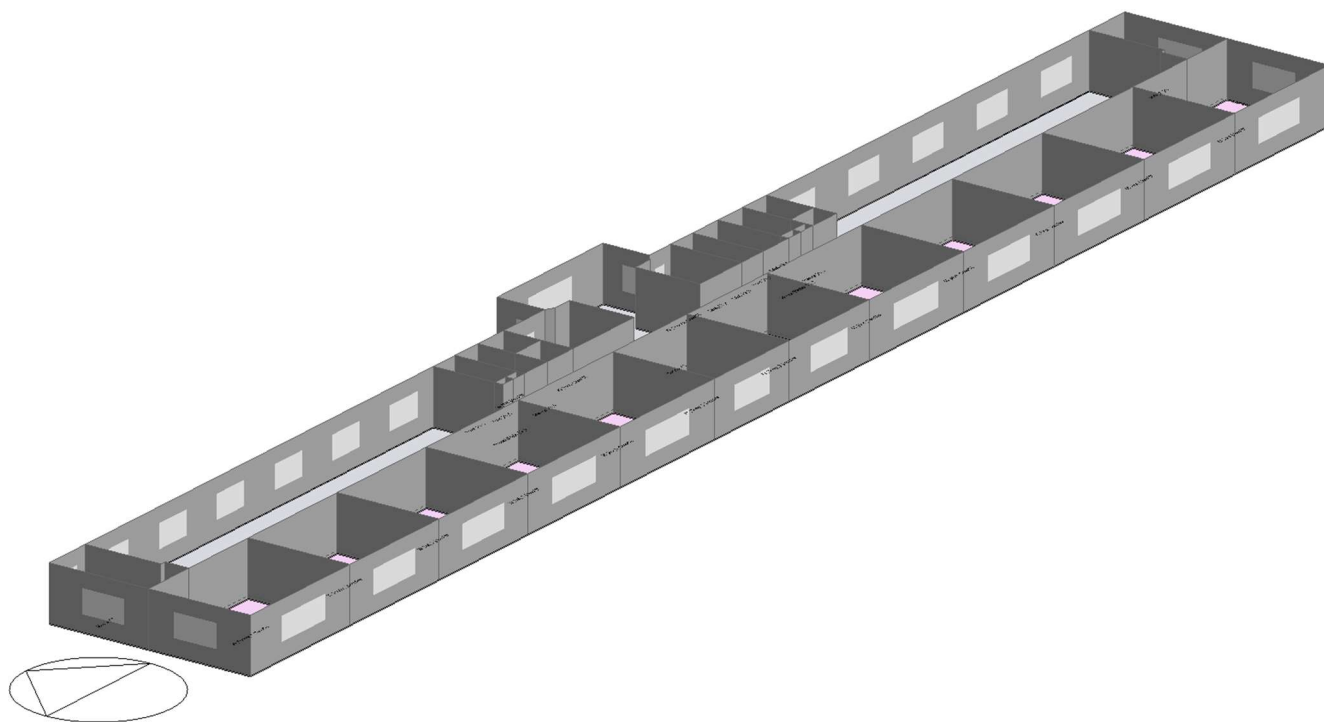


Рисунок 2.3 – Геометрія будівлі у програмі DesignBuilder, третій поверх

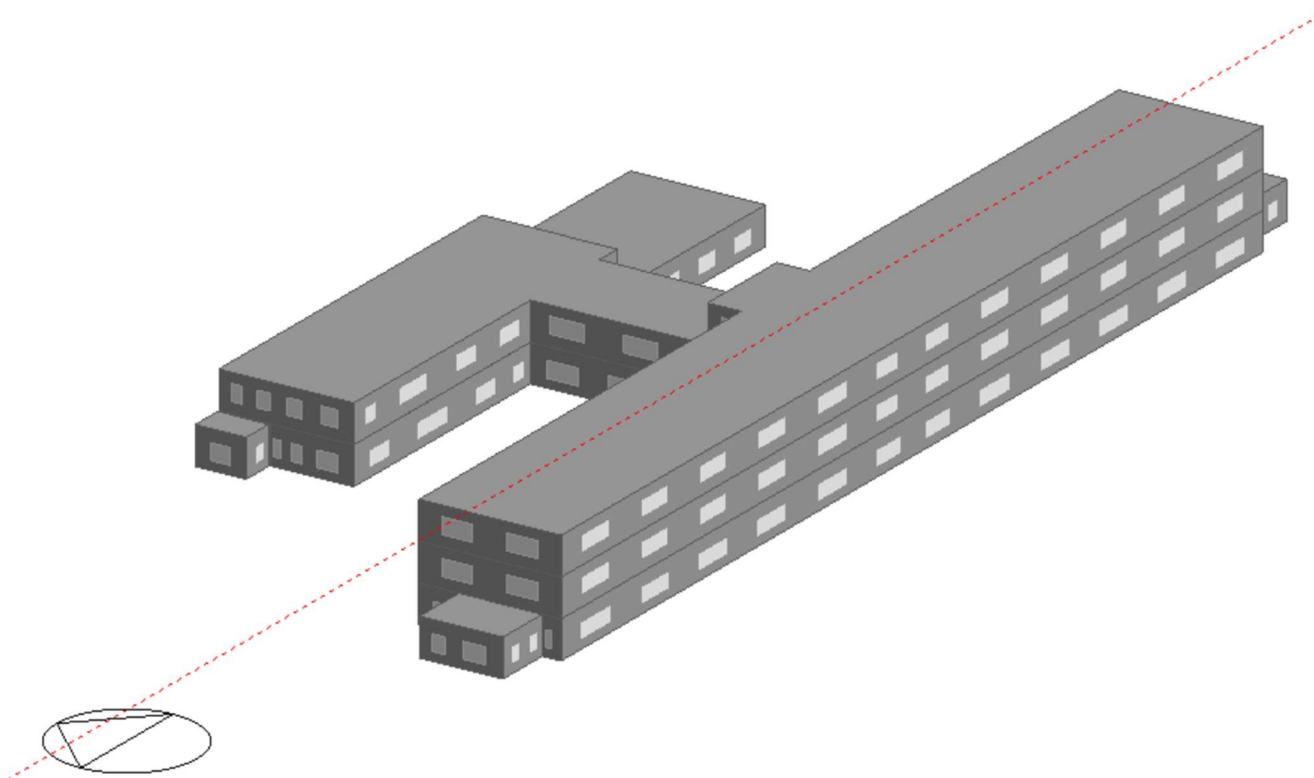


Рисунок 2.4 – Геометрія будівлі у програмі DesignBuilder, загальний вигляд

Огороджувальні конструкції задані за допомогою внутрішньої бібліотеки програми та результатами енергетичного аудиту. При моделюванні

огороджувальних конструкцій враховувались теплофізичні показники та масивність матеріалів, а також масивність огороджувальних конструкцій та товщина шарів. Усі огороджувальні та внутрішні конструкції будівлі були промодельовані відповідно до реально існуючого стану. Дані щодо змодельованих огороджувальних конструкцій зведені до таблиці 2.1.

Приклад огороджувальної конструкції, заданої в DesignBuilder наведено на рисунку 2.5:

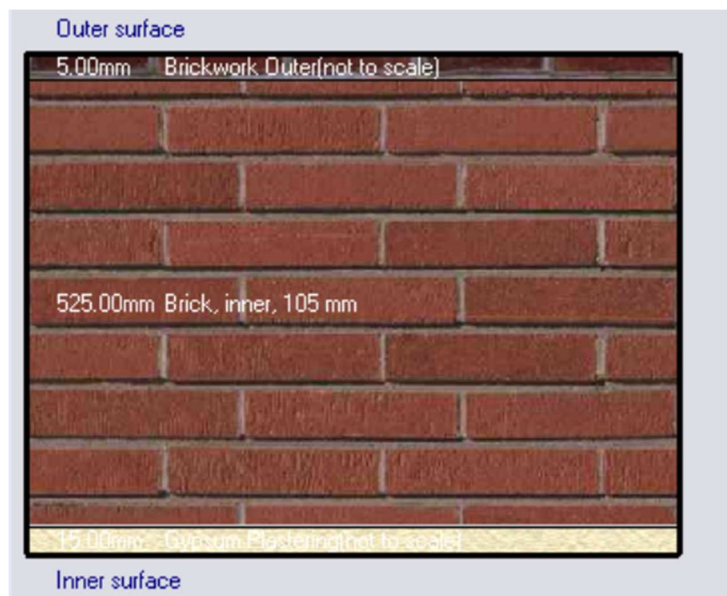


Рисунок 2.5 – Приклад задання огороджувальних конструкцій в програмі DesignBuilder, зовнішня стіна, існуючий стан

Також, в моделі враховані теплонадходження від людей, електричних приладів та освітлення, за допомогою середньозважених показників надходжень згідно з бібліотекою програми та погодинних графіків перебування людей та використання обладнання. В базовій моделі використані графіки, що базуються на ASHRAE 90.1, модифіковані для врахування Українських свят та канікул. Дані в ASHRAE 90.1 базуються на аналізі споживання енергії для різних категорій будівель, даних з реальних об'єктів та лабораторних вимірювань та вивчення фізіологічних показників тепловиділення людиною у різних умовах діяльності та температурних режимах [80].

Система опалення базової моделі промодельована як водяна з індивідуальною котельнею та термостатами на індивідуальних опалювальних приладах. Графік опалення – постійний. Ефективність нагрівача 73%. Програма не враховує втрати в системі постачання. Система опалення в програмі DesignBuilder представлена на рисунку 2.6:

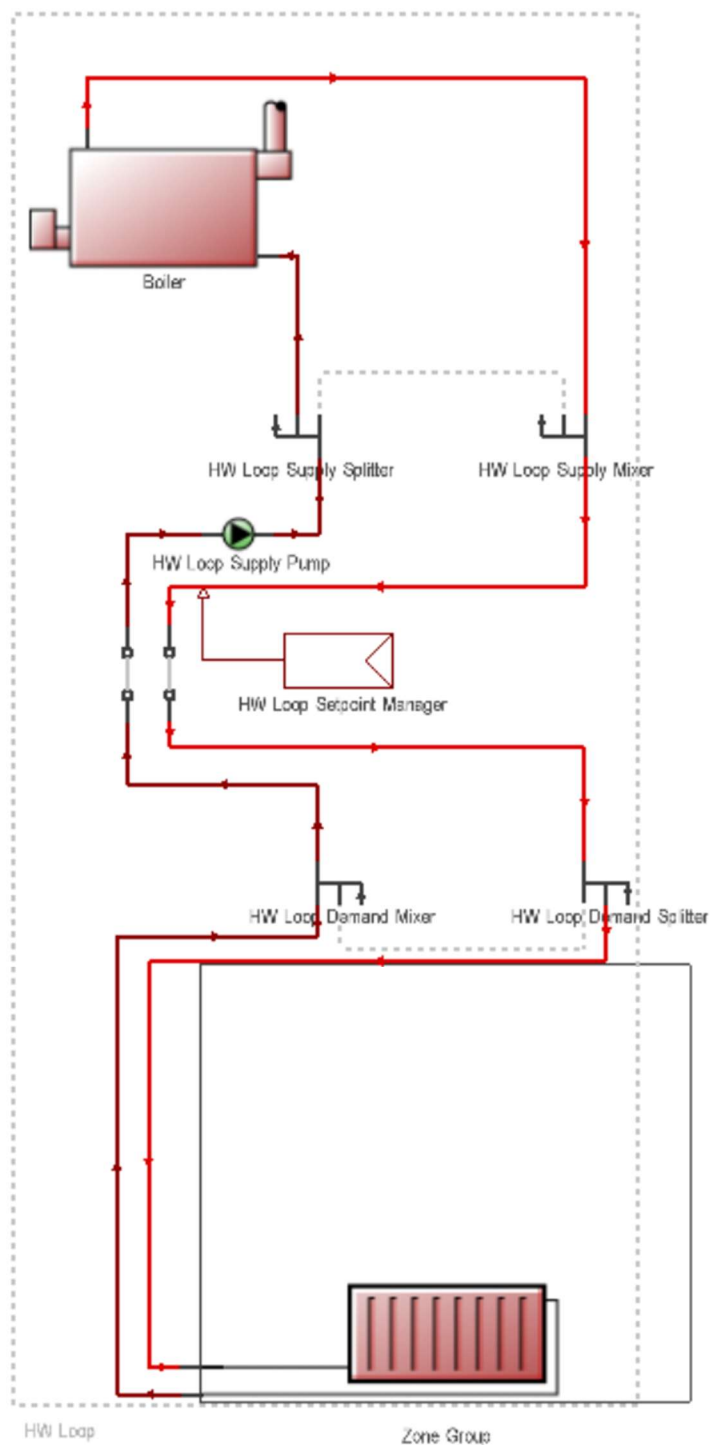


Рисунок 2.6 – Система опалення в програмі DesignBuilder

Основні параметри, що були задані до базової моделі, а також вихідні дані, що використовувались в дослідженні наведені на рисунку 2.7:

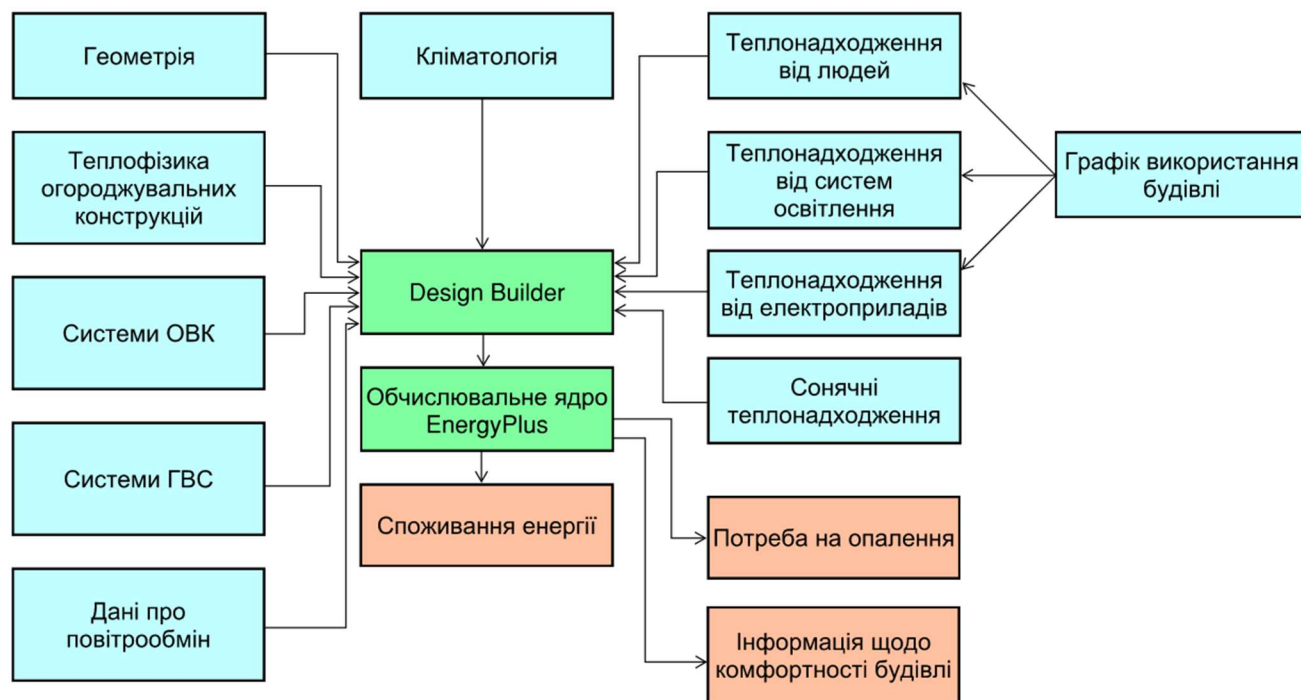


Рисунок 2.7 – Основні вхідні та вихідні дані в енергетичній моделі

Верифікація моделі була проведена шляхом порівняння результатів потреби на опалення вихідних даних моделювання з розрахунком потреби на опалення відповідно до ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 Енергетична ефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання на опалення та охолодження. Отримані дані: 867733,26 кВт при моделюванні, 863816,4 кВт за нормативом, похибка 0,45%.

2.4 Оцінювання енергоефективності школи при зміні вимог до теплового захисту за допомогою динамічного моделювання

Першим кроком дослідження стало визначення впливу підвищення рівня теплового захисту будівлі на енергоспоживання. Для цього, базова модель була модифікована шляхом покращення огорожувальних конструкцій згідно таблиці 2.1.

Згідно результатів моделювання побудовано ряд графіків споживання енергії на опалення для різних часових інтервалів.

Енергоспоживання системою опалення будівлі в річному зрізі представлено на рисунку 2.8:

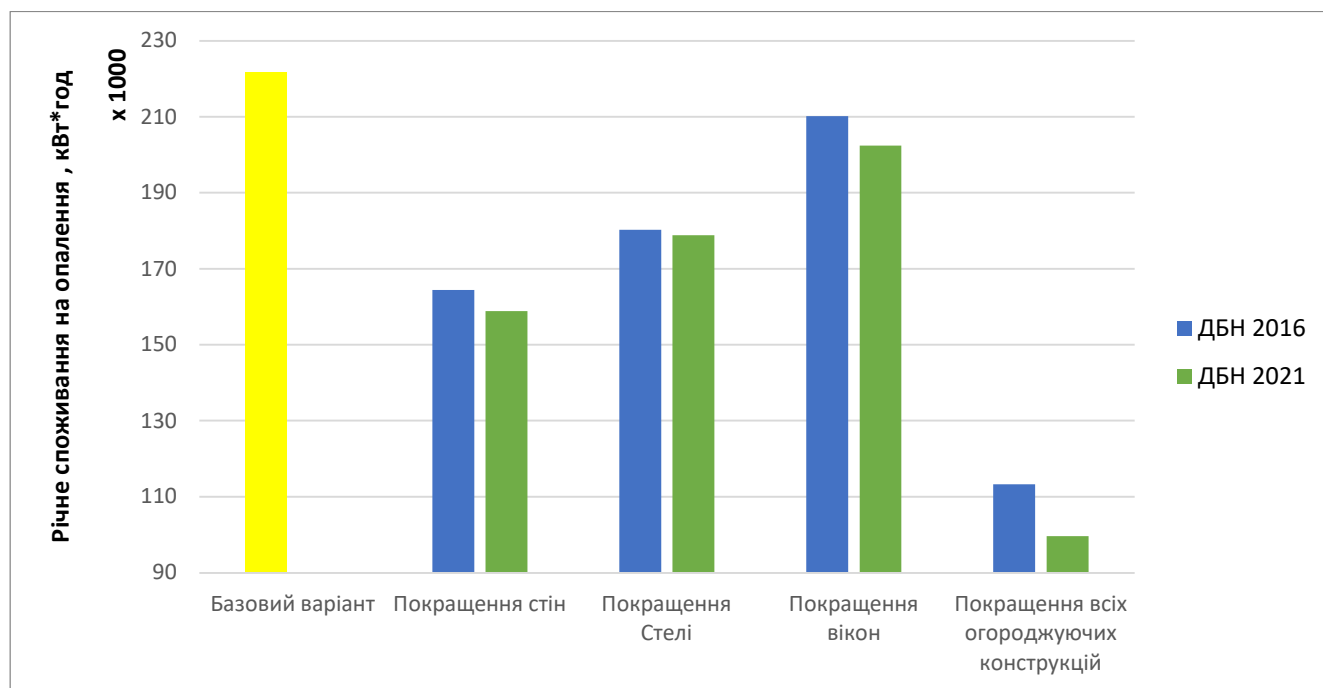


Рисунок 2.8 – Річне споживання енергії на опалення

Результати вказують на те, що вдосконалення теплового захисту відповідно до вимог ДБН 2.6-31 2016 та 2021 може значно знизити щорічне споживання енергії для опалення. Виявлено, що найбільш виразний ефект досягається за рахунок покращення ізоляції стін та стелі. Зокрема, удосконалення теплової ізоляції стін до вимог ДБН 2.6-31 2016 дозволяє знизити річне споживання на опалення на 25,8%, а покращення стелі - на 18,7% у порівнянні з базовим варіантом. Перехід до вимог ДБН 2.6-31 2021 підвищує ці показники до 28,3% та 19,3% відповідно.

Варто відзначити, що кумулятивне впровадження заходів по покращенню теплового захисту оболонки будівлі до мінімальних вимог ДБН 2.6-31 2016 зменшує щорічне споживання на опалення на 48,9% порівняно з базовим

варіантом. При переході до вимог ДБН 2.6-31 2021 спостерігається зниження на 55% відносно базового варіанту.

Результати підкреслюють важливість інтегрованого підходу до підвищення енергоефективності шкільних будівель та переходу до сучасних стандартів теплозахисту для ефективного зменшення енергоспоживання для опалення.

Найменшу економію для обох випадків показав захід з заміни вікон. Це можна пояснити тим, що вікна в базовому варіанті мають достатньо близькі до нормативних вимог теплофізичні властивості. Теплофізичні властивості вікон були визначені за паспортами, наявними на деяких вікнах.

Результати отримані в ході дослідження є близькими до попередніх досліджень[81], де утеплення будівлі показало підвищення рівня енергоефективності на 40%-50%. Відповідність результатів дозволяє, також, додатково верифікувати модель.

Для подальшого порівняння з українськими стандартами також було проведено аналіз енергоспоживання системою опалення будівлі в помісячному зрізі, результати представлено на рисунку 2.9:

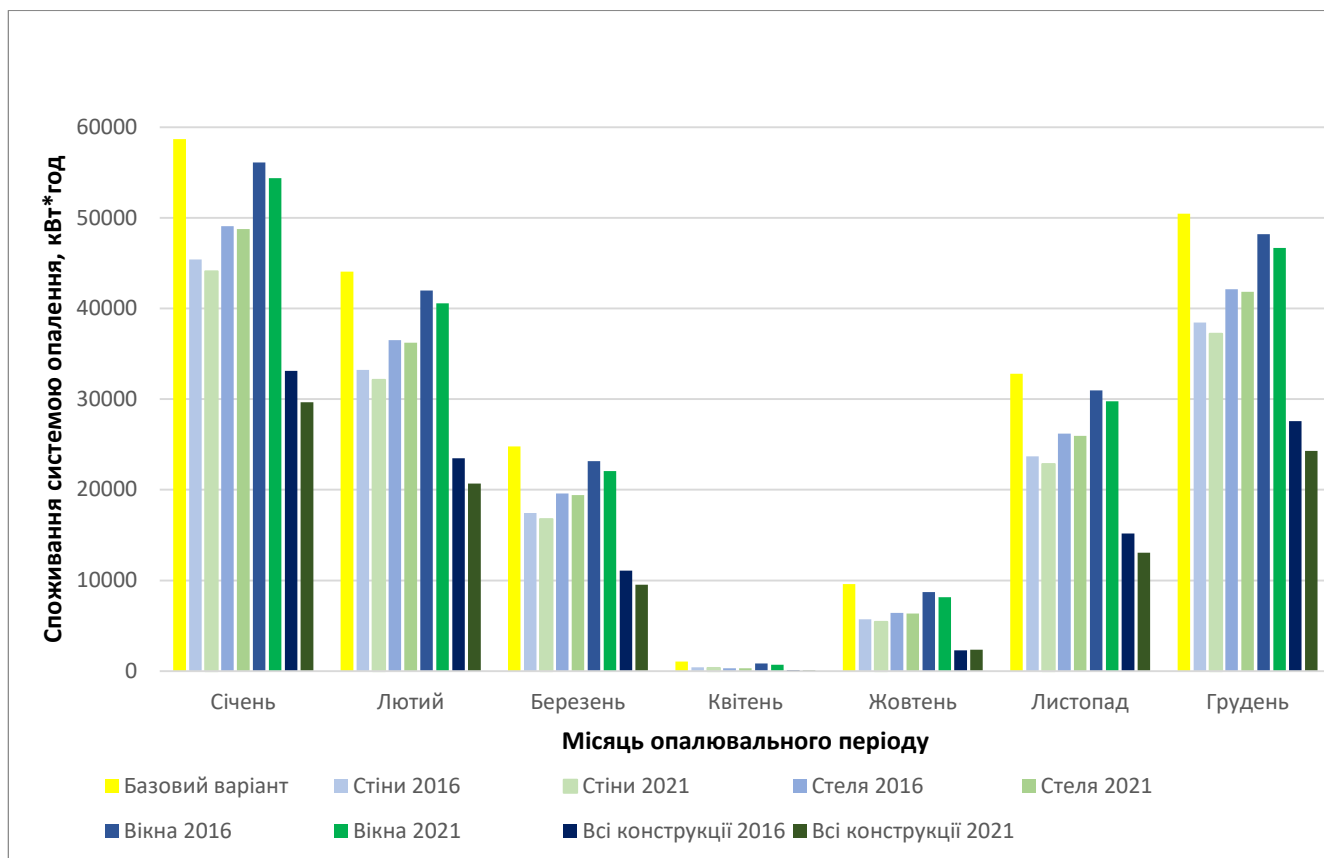


Рисунок 2.9 – Помісячне споживання енергії на опалення для опалювального періоду

Результати аналізу, проведеного на помісячній основі, показують, що оптимізація теплового захисту будівлі, відповідно до вимог державних будівельних норм ДБН В.2.6-31 за 2016 та 2021 роки, найефективніша не в найхолодніші місяці року, а в періоди з температурними коливаннями. Зокрема, у листопаді відносна економія енергії на опалення при утепленні всіх огорожувальних конструкцій становить 53,74% та 60,23% за вимогами ДБН 2016 та 2021 років відповідно, тоді як у грудні ці показники складають 45,32% та 51,8%.

Отримані дані вказують на важливість дослідження перехідних процесів зниження та підвищення температури навколишнього середовища, та врахування інерційності будівлі при термомодернізації.

Результати добового моделювання для ДБН 2.6-31 2016 та 2021 років представлені на рисунках 2.10 та 2.11:

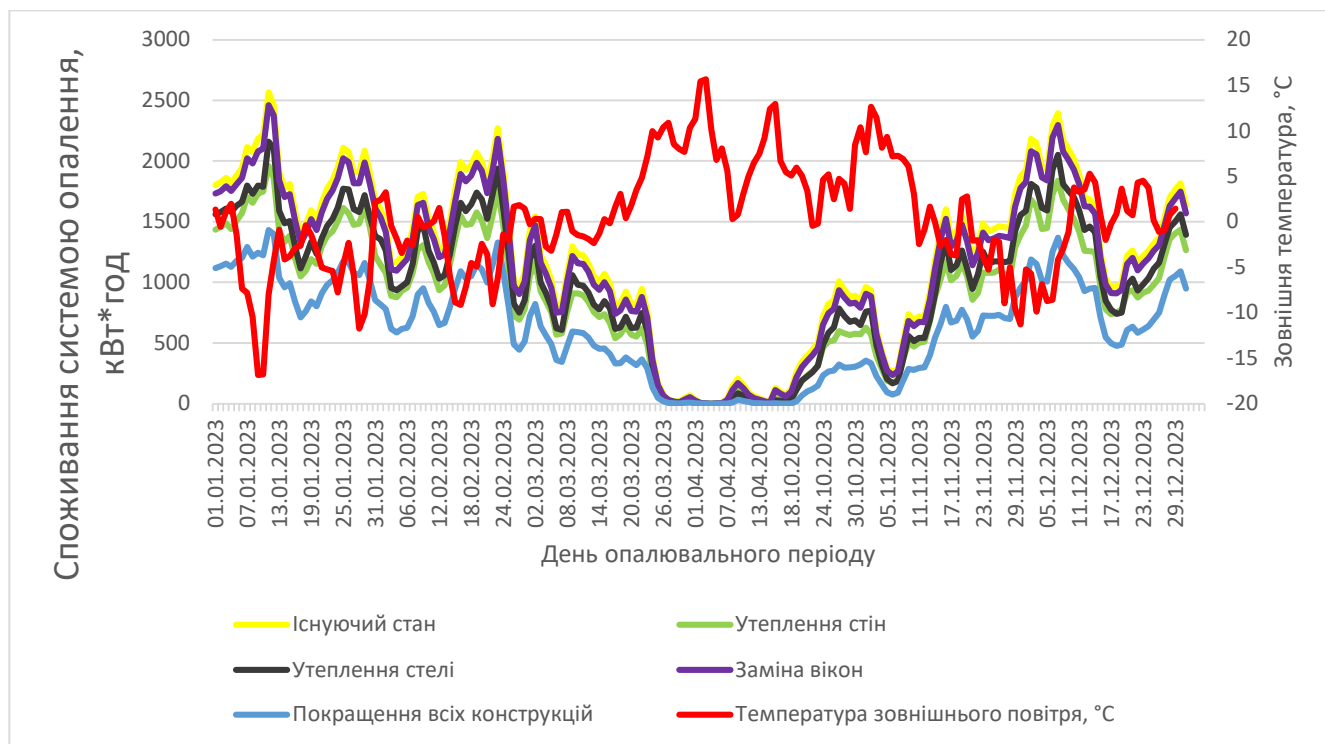


Рисунок 2.10 – Поденне споживання енергії на опалення для опалювального періоду, для існуючого стану будівлі та покращенні теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій до рівня ДБН 2016

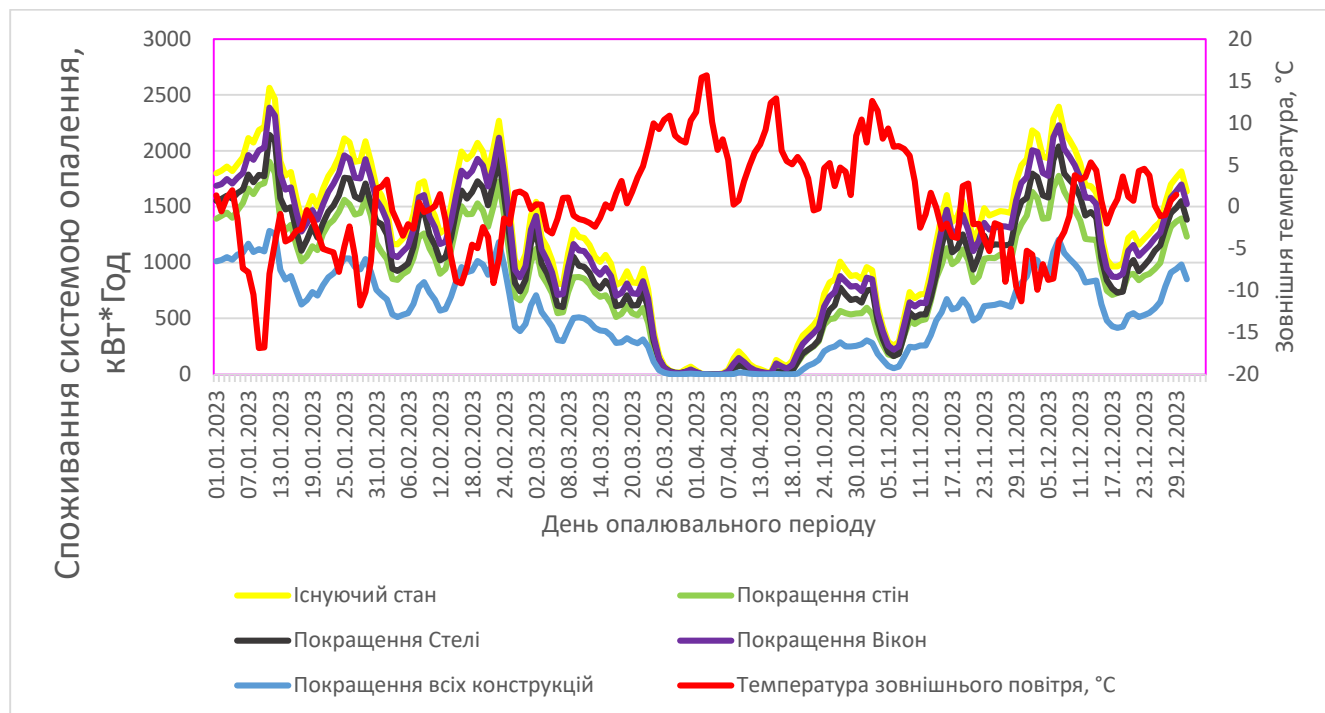


Рисунок 2.11 – Поденне споживання енергії на опалення для опалювального періоду, для існуючого стану будівлі та покращенні теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій до рівня ДБН 2021

Аналіз добових графіків, що відображають залежність відносної економії енергії на опалення від амплітуди зниження температури, не продемонстрував очікуваної кореляції. Це вказує на вплив більшої кількості взаємопов'язаних факторів на ефективність теплоізоляційних заходів.

Дослідження підтверджує, що споживання енергії системою опалення залежить від зовнішньої температури, і ця залежність є обернено пропорційною. Такий взаємозв'язок чітко ілюструється на рисунках 2.1 та 2.11, де графіки споживання енергії та зовнішньої температури відображені як дзеркальні відносно один одного, підтверджуючи обернену кореляцію між ними. Це свідчення підкреслює складність взаємодій між теплофізичними властивостями огорожувальних конструкцій та реальним енергоспоживанням, що вимагає подальшого аналізу для оптимізації енергетичної ефективності будівель.

Варто зазначити, що окрім позитивного впливу на енергоспоживання будівлі, утеплення, також, зменшує пікове навантаження на систему опалення, таким чином знижуючи піки споживання теплової та електричної енергії, що позитивно впливає на енергетичну систему району/міста/країни.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було детально описано об'єкт дослідження, який представляє собою трьох-поверхову шкільну будівлю, н-подібної форми, розміщену в Івано-Франківській області, з типовим для шкільної будівлі графіком експлуатації. Тепловий захист будівлі не відповідає мінімальним нормативним вимогам. Опалення забезпечується індивідуальною котельнею з ефективністю 73% та водяною системою опалення.

Характеристики існуючої будівлі були покладені в основу побудови базової моделі будівлі для подальшої модифікації та моделювання варіацій теплового захисту будівлі.

В розділі наведений опис математичних моделей для визначення основних параметрів, що впливають на енергоефективність та показників комфортності, які

використовуються програмою DesignBuilder, початкові та граничні умови при розрахунках.

Описані основні вхідні дані в енергетичній моделі будівлі та вихідні дані моделювання, що будуть використані в дослідженні.

Розроблена модель дозволила оцінити ефективність підвищення теплового захисту до рівня ДБН 2.6.-31 2016 та 2021, враховуючи такі параметри як: теплофізичні властивості огорожувальних конструкцій, система опалення, графіки присутності людей, обладнання та освітлення, а також детальну кліматологію згідно міжнародної бази даних IWEC2.

Отримані результати показують, що підвищення теплоізоляції будівлі до мінімальних вимог ДБН 2.6.-31 2016 року дозволить знизити споживання енергії на опалення будівлі на 48,9%, а до вимог ДБН 2.6.-31 2021 року на 55%. Отримані результати відповідають розглянутим попереднім дослідженням[81].

РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ВИКОРИСТАННЯ РОЗКЛАДУ ЗАНЯТЬ ДЛЯ ПРОГРАМУВАННЯ ТЕРМОСТАТІВ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДІВЛІ ШКІЛЬНОГО ЗАКЛАДУ

3.1 Методологія досліджень використання шкільного розкладу занять для програмування термостатів

Переривчасті режими опалення дозволяють значно скоротити споживання енергії на опалення, в порівнянні з постійним опаленням [82-85].

Використання сучасних приладів опалення дозволяє використовувати програмовані термостати для регулювання внутрішньої температури в приміщеннях.

Програмовані термостати - це термостати, які можна налаштувати на певні графіки опалення, що залежать від режиму використання будівлі, добового та тижневого циклів, кліматичних умов тощо. Використання програмованих термостатів має такі переваги:

- енергозбереження: програмовані термостати дозволяють знизити енергоспоживання в періоди невикористання будівлі, наприклад, вночі або вихідні дні, шляхом пониження температури до мінімально необхідного рівня. Згідно досліджень [86-87], це може зекономити від 5% до 15% енергії на опалення;
- комфорт: програмовані термостати дозволяють підтримувати комфортну температуру в приміщеннях в залежності від потреб та бажань користувачів. Наприклад, можна встановити поступове підвищення та пониження температури вранці та ввечері, з метою забезпечення комфортних умов для дітей що приходять вранці, та/або пізніше лишають школу. Такий підхід враховує інерційність будівлі та підвищує комфортність перебування в приміщеннях;
- економічність: виходячи з першої переваги, програмовані термостати дозволяють зменшити витрати на опалення, оскільки вони зменшують енергоспоживання та підвищують енергоефективність будівлі.

Враховуючи переваги зазначені вище, термостати з можливістю програмованого налаштування є перспективним заходом з енергозбереження, що набуває додаткової актуальності в умовах неповної зайнятості будівель, проте ефективне використання таких приладів потребує додаткових досліджень в напрямку графіків опалення, оскільки більш стандартний підхід в вигляді вимкнення системи опалення в неробочі години та вихідні [86-87] не дозволяє в повній мірі розкрити потенціал приладу.

З метою дослідження ефективних підходів до програмування термостатів пропонується використати тижневий графік шкільного розкладу як базис для графіку опалення. В дослідженні пропонується розглянути вплив даного графіку опалення на енергоефективність будівлі та комфортність перебування учнів в навчальних кімнатах.

Енергетична модель будівлі описана вище надалі була використана як базова для аналізу переваг та недоліків використання розкладу шкільних занять в якості базису програмування термостатів в опалювальний період року.

Для порівняння також запропоновано розглянути графік опалення з пониженням температури опалення строго в неробочі години закладу, вихідні та святкові дні, як той що відносно легко реалізувати та забезпечує значну кількість годин пониженого опалення.

На основі реального розкладу занять, що наведений в Додатку 1 та інформації щодо призначення шкільних приміщень було розроблено графік опалення для кожного шкільного класу (всього 51 графік опалення). В години невикористання пропонується понижувати температуру в приміщенні з 20°C до 16°C. Приклад графіку опалення для класу музичного мистецтва представлено на рисунку 3.1:

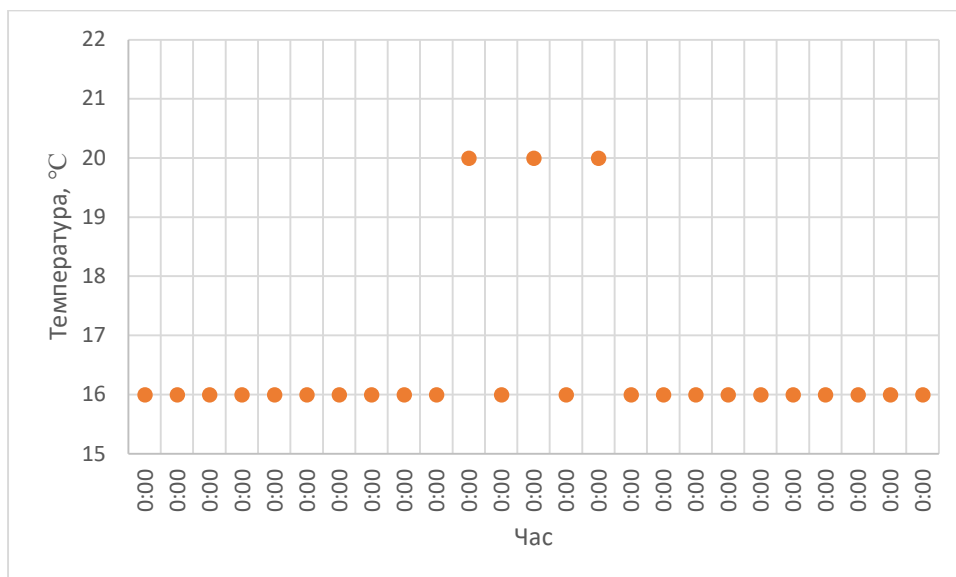


Рисунок 3.1 – Графік опалення класу музичного мистецтва для п'ятниці

Графік з використанням розкладу занять дозволяє скоротити години повного опалення приміщень з 1497 годин на тиждень для режиму 2 до 1032 годин на тиждень для режиму 3. Такі дані дозволяють припустити, що запровадження режиму за розкладом шкільних занять, потенційно, дозволяє значно знизити години повного опалення.

Повітрообмін встановлено на рівні 1 год^{-1} .

Отже, в дослідженні порівнюються наступні режими:

1. постійне опалення 20°C ;
2. пониження температури внутрішнього повітря на 4°C в неробочі години;
3. опалення згідно з розкладом занять, з пониженням температури внутрішнього повітря на 4°C в години відсутності людей.

Провал в 4°C було обрано згідно рекомендацій наданих в попередніх дослідженнях переривчастого опалення [83-84].

З метою узагальнення результатів, теплозахист огорожувальних конструкцій будівлі був доведений до мінімальних значень згідно ДБН В.2.6-31:2016 та ДБН В.2.6-31:2021 [8, 74] як типових представників наступних будівель:

- неутеплена будівля – представник будівлі, що не проходила термомодернізацію;
- ДБН В.2.6-31:2016 – будівлі що проходили термомодернізацію з 2017 до 2022 року;
- ДБН В.2.6-31:2016 – будівлі що пройшли сучасну термомодернізацію.

Різниця між теплофізичними властивостями серед промодельованих будівель представлена в таблиці 2.1.

Такий комплексний підхід дозволить узагальнити результати, а також навести більш точні рекомендації щодо використання графіків опалення для будівель з різним рівнем утеплення.

3.2 Результати впровадження регулювання за розкладом шкільних занять

За результатами моделювання були отримані погодинні, помісячні, поденні, погодинні дані споживання енергії системою опалення, внутрішніх температур повітря та внутрішньої середньої радіаційної температури для будівлі в цілому та кожного окремого приміщення.

Річне споживання енергії системою опалення наведено на рисунку 3.2.

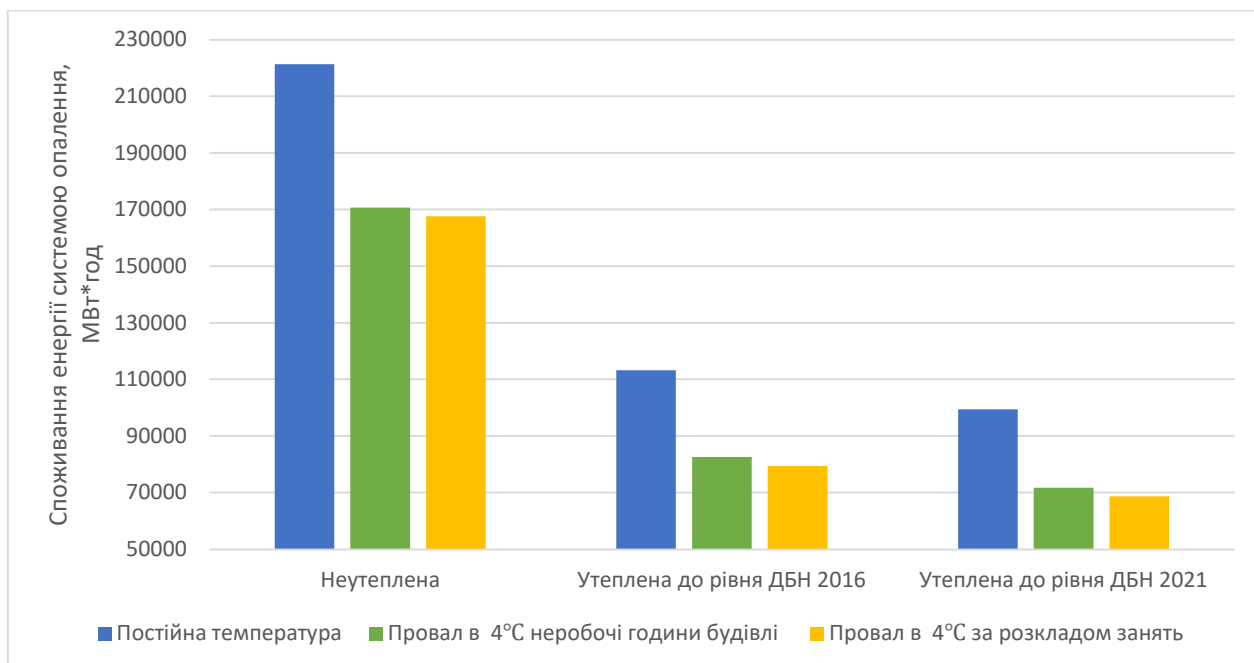


Рисунок 3.2 – Річне споживання енергії на опалення

При аналізі різних режимів опалення, було встановлено, що врахування можливості обмеження опалення приміщень в неробочі години забезпечує значну економію енергії. Наприклад, у випадку не утепленої будівлі цей підхід дозволив знизити річне енергоспоживання з 221,29 МВт*год до 170,66 МВт*год, тобто на 22,9%.

При впровадженні графіка опалення, який враховує розклад занять, спостерігається додаткове зниження споживання енергії. Для тієї ж неутепленої будівлі річне споживання знизилося до 167,58 МВт*год. Серед інших потенційних переваг, такий графік опалення дозволяє забезпечити оптимальний мікроклімат в приміщеннях, залежно від їх функціонального призначення, кількості людей, розташування в будівлі тощо. Це також дозволяє зменшити пікове електронавантаження в випадках електричної системи опалення, оскільки не потрібно підтримувати високу температуру в приміщеннях, в години невикористання приміщень, частина з яких припадає на години пікового електроспоживання країни.

Згідно з результатами моделювання, режим 3 (графік, що враховує розклад занять) дозволяє зменшити споживання енергії на опалення на 1,8-4,2% відносно

режиму 2 (провал в неробочі години), при чому, відносна економія зростає з покращенням рівня ізоляції будівлі. Абсолютна відносна економія енергії на опалення при впровадженні режиму 3 відносно 2 становить $0,2 \text{ кВт*год/м}^3$ для розглянутих рівнів теплозахисту будівлі. Даний результат дозволяє рекомендувати провадження режиму 3, в першу чергу, в будівлях які проходили термомодернізацію, особливо, якщо брати до уваги те, що цей режим вимагає наявності сучасної системи опалення.

Отримані результати аналізу річного споживання свідчать про те, що, незважаючи на складність впровадження та необхідність щорічного оновлення, графіки опалення з урахуванням шкільного розкладу представляють собою ефективний підхід як з точки зору окремої будівлі, так і з точки зору загальної енергосистеми країни. Цей підхід набуває особливої актуальності в контексті будівель, що проходять модернізацію системи опалення, і може стати важливим елементом в стратегіях підвищення енергоефективності та екологічної сталості.

Надалі було проаналізовано помісячне споживання на опалення для розглянутих рівнів теплозахисту будівлі та режимів регулювання системи опалення, описаних вище. Результати помісячного моделювання наведені на рисунку 3.3:

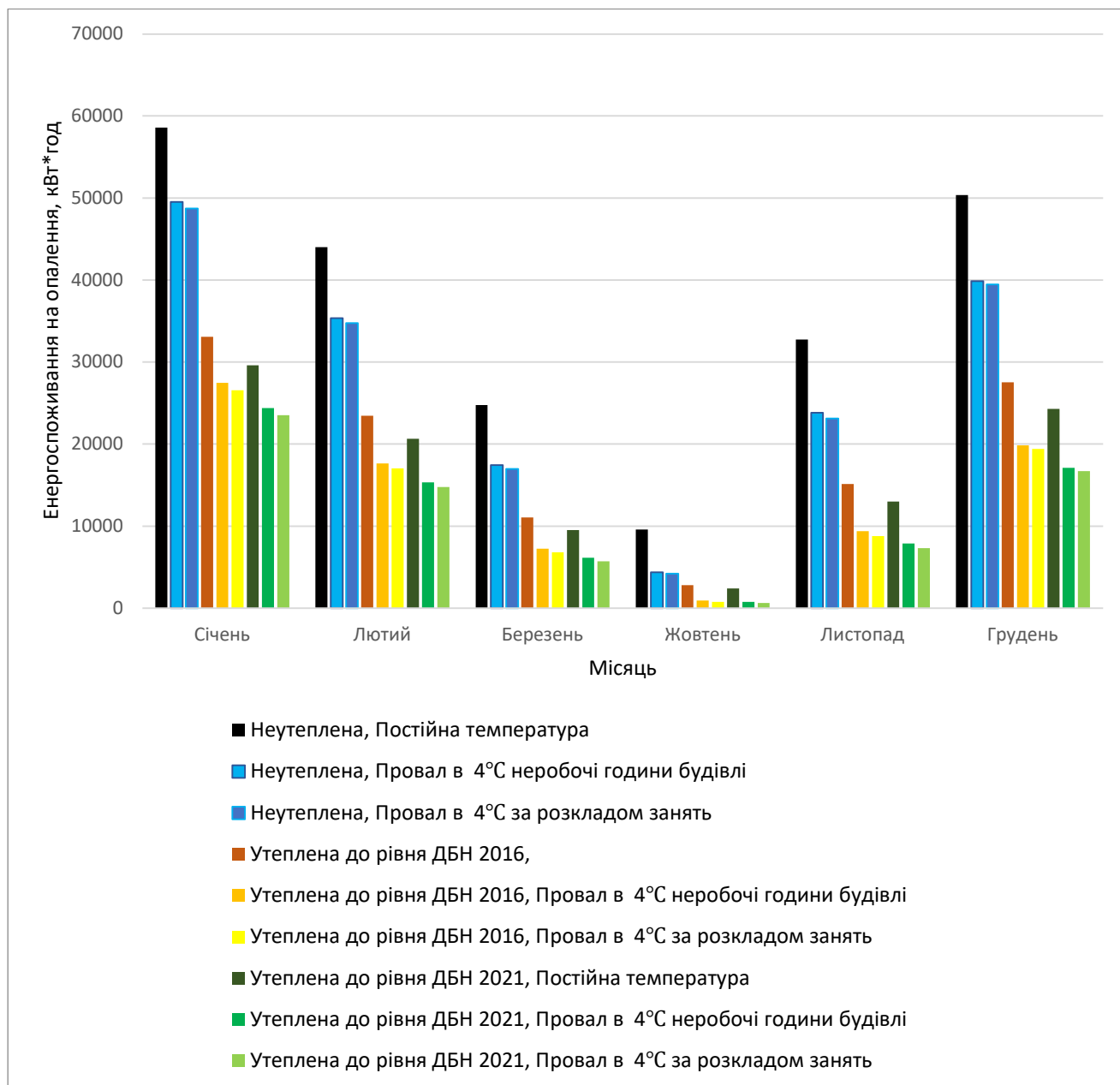


Рисунок 3.3 – Помісячне споживання енергії на опалення

Аналіз помісячного споживання підтвердив отримані висновки за результатами аналізу річного споживання, проте, даний аналіз може бути корисним в подальших дослідженнях для порівняння з українськими стандартами.

Для більш ретельного дослідження впровадження енергоефективних режимів опалення, варіації описані вище, було також промодельовано з поденним та погодинними кроками. Результати поденних моделювань наведені на рисунках 3.4-3.6:

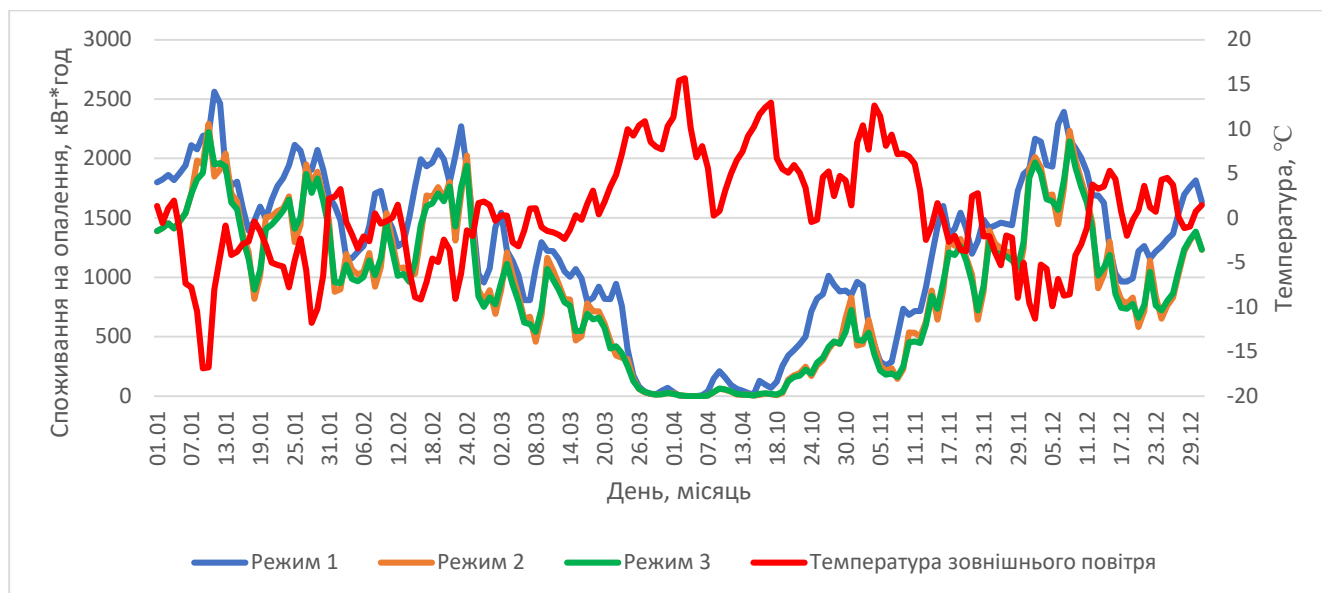


Рисунок 3.4 – Поденне споживання на опалення для випадку будівлі без додаткової ізоляції (існуючий стан)

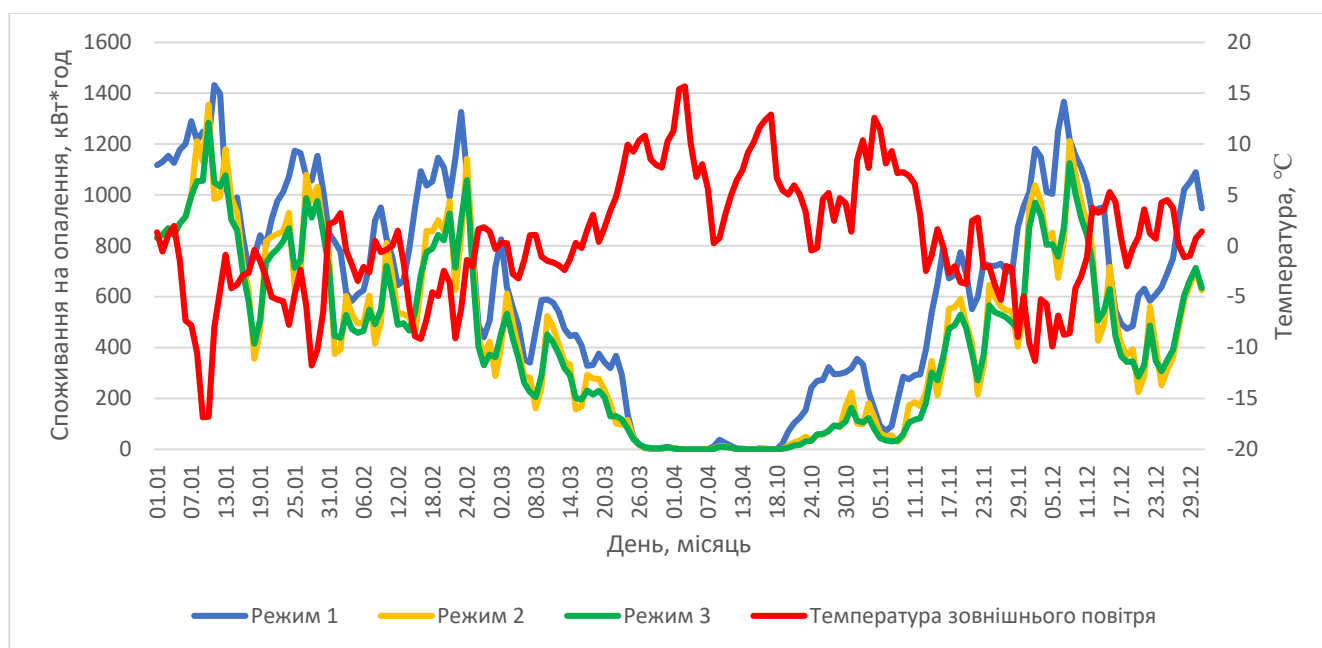


Рисунок 3.5 – Поденне споживання на опалення для випадку будівлі з огорожувальними конструкціями доведеними до рівня ДБН В.2.6-31-2016

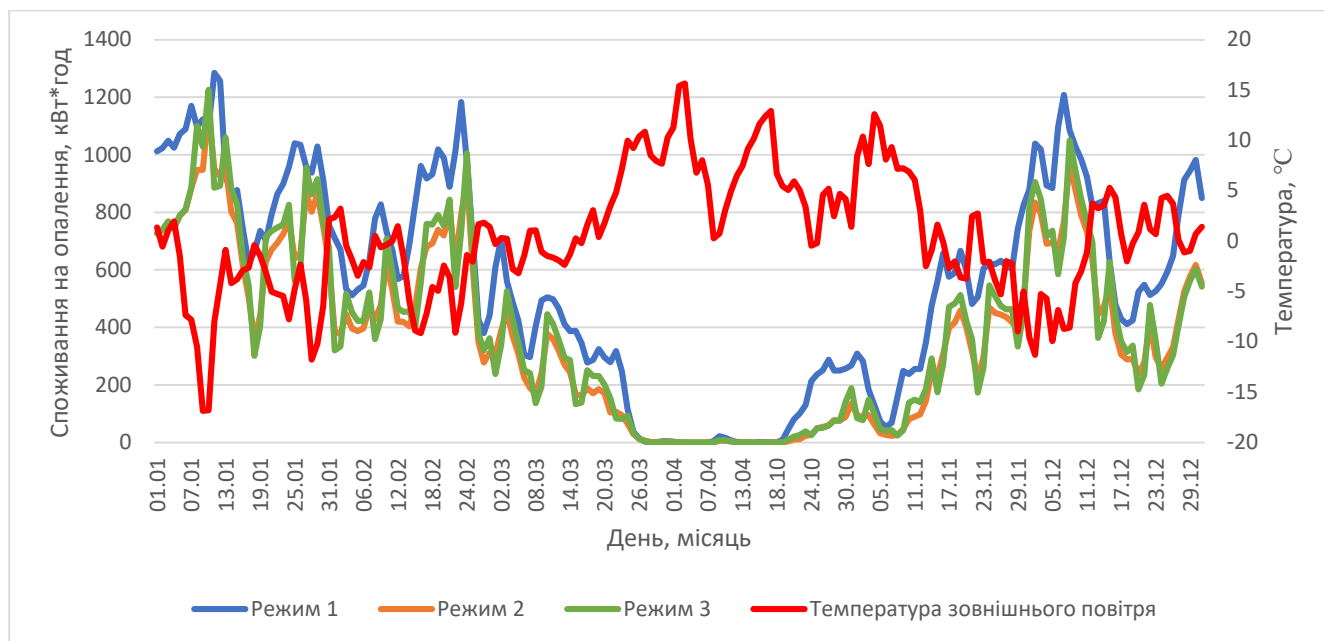


Рисунок 3.6 – Поденне споживання на опалення для випадку будівлі з огорожувальними конструкціями доведеними до рівня ДБН В.2.6-31-2021

Аналіз поденних результатів аналізу енергоспоживання під час використання різних режимів опалення виявив наявність додаткових піків споживання енергії, особливо виражених у режимах 2 та 3. Ці пікові навантаження, що подекуди навіть перевищують аналогічні значення для режиму без регулювання, виявилися зосередженими переважно в понеділки та післясвяткові дні. Наявність таких піків в однакові дні для обох режимів з регулюванням не тільки демонструє їхню сталість, але й вказує на певні закономірності в споживанні енергії, зумовлені поведінкою системи опалення в специфічні періоди.

Особливу увагу слід звернути на факт, що гострота цих піків споживання (тобто режим з постійним опаленням показує більш пологі підвищення/пониження споживання) свідчать про значне додаткове навантаження на систему опалення під час перехідних періодів. Перехід від пониженої температури приміщення, наприклад 16°C, до робочої температури 20°C, зокрема після вихідних або святкових днів, вимагає від системи опалення значного збільшення виробітку теплової енергії, щоб швидко відновити комфортні умови.

Це, в свою чергу, призводить до високих піків споживання, які можуть впливати на комфортність перебування в будівлі.

3.3 Дослідження впровадження енергоефективних режимів опалення на потужність системи опалення школи

Для компенсації можливого впливу перехідного періоду на комфортність перебування людей в приміщеннях системі опалення потребується додаткова потужність.

Покращення теплозахисту будівлі зменшує описані вище піки. Наприклад, для випадку будівлі без регулювання максимальне денне споживання скоротилось з 2561кВт*год до 1432 кВт*год та 1285 кВт*год при покращенні до рівня ДБН В.2.6-31-2016 та 2021 року відповідно.

Результати моделювання пікового навантаження на систему опалення наведені на рисунку 3.7:

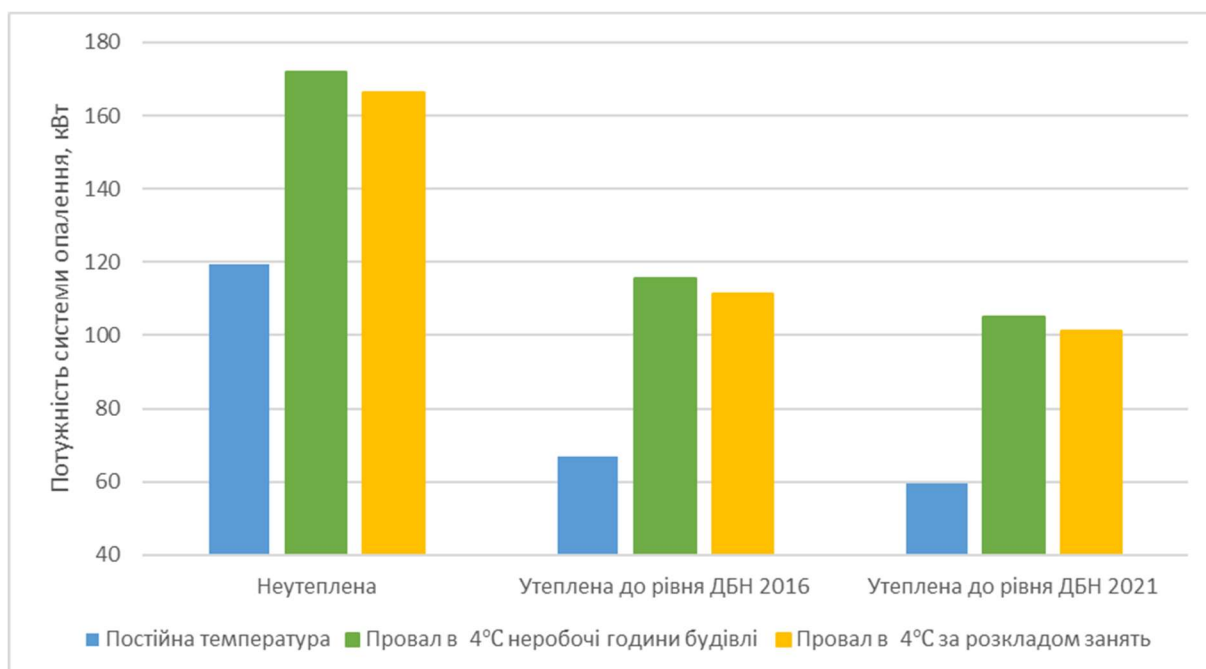


Рисунок 3.7 – Потужність системи опалення

Аналіз результатів дослідження щодо впливу різних режимів опалення на енергоспоживання в шкільних будівлях підтвердив значний вплив термомодернізації на зниження потужності системи опалення. Наприклад, утеплення будівель до рівнів, визначених стандартами ДБН В.2.6-31 2016 та ДБН В.2.6-31 2021, призводить до зменшення необхідної потужності системи опалення в середньому на 36,6% і 42,7% відповідно. Ці дані підкреслюють ефективність утеплення як заходу для підвищення енергоефективності шкільних будівель.

Водночас, введення режимів 2 та 3, які передбачають переривчасте опалення, хоч і сприяє зменшенню загального споживання енергії за рахунок оптимізації робочих періодів системи, збільшує максимальну потребу в потужності системи опалення на 37,7% та 36,5% відповідно для кожного з режимів. Це зумовлено необхідністю швидкого підвищення температури в будівлі після періодів зниження температурного режиму до 16°C, щоб забезпечити комфортні умови для перебування та навчального процесу в будівлі при поверненні до робочого режиму температури 20°C.

З огляду на значне збільшення навантаження на систему опалення при впровадженні переривчастих режимів опалення, особливо важливим стає розгляд можливості модернізації існуючих систем опалення або їх заміни на більш потужні та ефективні. Проте, застосування стратегії поступового підвищення температури, наприклад, від 16°C до 20°C протягом декількох годин до початку навчального дня після вихідних або святкових днів, може пом'якшити ці піки споживання, зменшивши навантаження на опалювальні системи та забезпечивши більш плавний перехід до робочих умов.

Додатково, цікавим аспектом є те, що пікове навантаження при застосуванні переривчастих режимів опалення в утеплених будівлях не перевищує максимальне навантаження для систем опалення в неутеплених школах, що працюють у режимі постійного опалення. Це вказує на можливість впровадження таких режимів без необхідності заміни опалювальних приладів на більш потужні в будівлях, які проходять процес термомодернізації. Таким чином, комбінація заходів з утеплення та введення ефективних режимів терморегулювання стає ще

більш привабливою, оскільки дозволяє досягти значного покращення енергоефективності з мінімальними капітальними витратами.

Слід також зазначити, що режим 2 вимагає дещо більшої потужності опалення порівняно з режимом 3 для будь-якого рівня утеплення будівлі, що може бути пов'язано з менш оптимальним розподілом температурних режимів впродовж дня. Це відкриває перспективи для подальшої оптимізації енергоспоживання за рахунок адаптації графіків опалення до конкретних умов експлуатації будівлі та її функціонального навантаження, наприклад, через врахування різного графіка початку навчальних занять для різних груп учнів.

Загалом, отримані результати аналізу підкреслюють необхідність комплексного підходу до планування систем опалення в шкільних будівлях, який би включав не лише заходи щодо підвищення теплоізоляційних характеристик будівлі, але й впровадження гнучких та адаптивних режимів опалення, здатних забезпечити ефективне та економічне використання енергетичних ресурсів.

3.4 Дослідження впливу енергоефективних режимів опалення на комфортність перебування в приміщеннях школи

Коливання температур, та значне підвищення необхідної потужності вказують на те, що аспект, який також варто розглянути в рамках дослідження, це вплив зниження температури в сусідніх приміщеннях на комфортність перебування дітей в класі. Важливість цього аспекту полягає у тому, що зниження температури повітря в прилеглих класах може суттєво впливати на радіаційну температуру в досліджуваному приміщенні, тим самим змінюючи умови комфорту для учнів та викладачів.

Вплив режимів опалення на комфортність перебування в приміщеннях оцінювався за двома показниками, а саме:

- середня температура повітря в приміщенні;
- середня радіаційна температура.

Програма обчислює середню радіаційну температуру (MRT) як зважене середнє температур поверхонь, що оточують об'єкт, враховуючи теплове випромінювання від цих поверхонь. Цей підхід включає в себе кілька ключових параметрів:

- температура поверхонь: включає температури всіх поверхонь, які обмінюються теплом з розглядуваним простором;
- коефіцієнт перегляду (view factor): це частка радіації, що випромінюється однією поверхнею і поглинається іншою. У випадку з розрахунком MRT, важливі коефіцієнти перегляду між особою і різними поверхнями в приміщенні;
- емісійні властивості матеріалів: різні матеріали мають різні властивості випромінювання тепла, що впливає на загальний обмін тепловою енергією;
- розподіл температури у просторі: неоднорідність температур у просторі також впливає на обчислення MRT, оскільки вона визначає, як тепло розподіляється між різними зонами;
- радіаційні обміни між поверхнями: теплове випромінювання між всіма поверхнями у просторі взаємопов'язане, і ці взаємодії слід враховувати для точного розрахунку MRT.

Сонячна радіація також враховується при розрахунку середньої радіаційної температури. Сонячне випромінювання може істотно вплинути на температуру поверхонь у приміщенні, що безпосередньо впливає на радіаційний обмін тепла між цими поверхнями і людьми.

DesignBuilder моделює вплив сонячної радіації з урахуванням таких аспектів:

- пряме сонячне випромінювання: враховується вплив прямих сонячних променів, що потрапляють в приміщення через вікна;
- розсіяне сонячне випромінювання: включає світло, яке розсіюється в атмосфері та відбивається від земної поверхні та інших об'єктів, перш ніж потрапити в приміщення;

- вплив на поверхні: сонячне випромінювання, що потрапляє на внутрішні та зовнішні поверхні, змінює їх температуру, що впливає на тепловий комфорт;
- динамічні зміни: враховується динамічний характер сонячної радіації протягом дня та року, а також зміни внаслідок погодних умов та геометричних параметрів будівлі. [79]

Радіаційна температура відіграє ключову роль у формуванні сприйняття комфортності середовища, оскільки вона впливає на тепловий баланс тіла людини, а також згідно рівнянь (8)-(12) температура повітря та середня радіаційна температура є визначальними, серед тих на які ми можемо легко впливати системами будівлі, параметрами в розрахунку PMV який, в свою чергу, згідно з [88] використовується для оцінки комфортності.

$$PMV = (0,303e^{-2,100 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}]; \quad (8)$$

де:

M - метаболічний рівень, Вт/м²;

W - ефективна механічна потужність, Вт/м²;

H - чуттєві втрати тепла;

E_c - обмін теплом шляхом випаровування з поверхні шкіри;

C_{res} - обмін теплом конвекцією при диханні;

E_{res} - випаровувальний обмін теплом при диханні.

У рівнянні (8), H , E_c , C_{res} та E_{res} відповідають обміну тепла між тілом і навколишнім середовищем і розраховуються з наступних рівнянь:

$$H = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(f_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (f_{cl} - t_a); \quad (9)$$

$$E_c = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15]; \quad (10)$$

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a); \quad (11)$$

$$E_{res} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a); \quad (12)$$

де:

I_{cl} - ізоляція одягу, m^2K/W ;

f_{cl} - коефіцієнт поверхні одягу;

t_a - температура повітря, $^{\circ}C$;

t_r - середня радіаційна температура, $^{\circ}C$;

v_{ar} - відносна швидкість повітря, m/s ;

p_a - частковий тиск водяної пари, Pa ;

t_{cl} - температура поверхні одягу, $^{\circ}C$.

Для визначення комфортних комбінацій температури внутрішнього повітря та середньої радіаційної температури було використано офіційний калькулятор параметру PMV згідно ASHRAE Standard 55-2023 [82].

Даний онлайн ресурс дозволяє задати параметри відносної вологості, швидкості повітря, метаболізму та одягу, а також параметри температури, щоб перевірити умови в приміщенні на комфортність.

Параметри, на які ми не можемо впливати системами будівлі були прийняті згідно [88].

Були використані наступні припущення:

- відносна вологість – 10%, прийнята за результатами моделювання, як середнє значення на протязі навчальних годин досліджуваної доби;
- швидкість метаболізму (Metabolic rate) – 1,2, що відповідає сидячій інтелектуальній роботі;
- рівень одягу (Clothing level) – 1, що відповідає типовому зимовому одягу для перебування в приміщенні (Typical Winter Indoor Clothing) згідно з [88].

Результат розрахунку надається у вигляді графіку та ряду параметрів, приклад результатів наведений на рисунку 3.8:

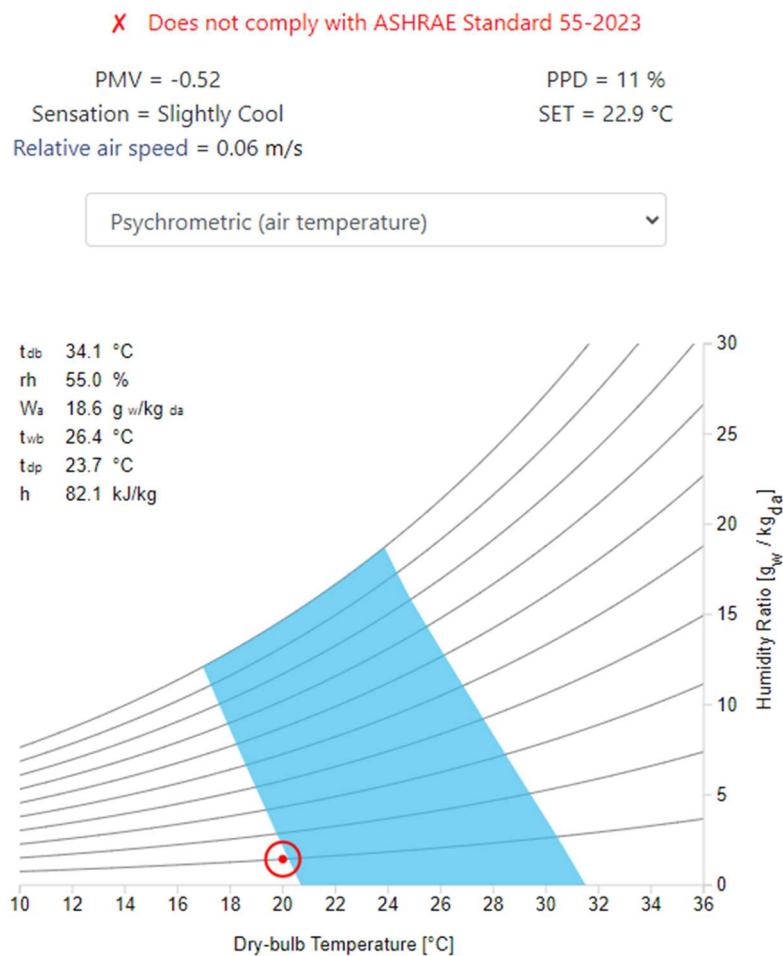


Рисунок 3.8 – Приклад розрахунку параметрів комфортності перебування в приміщенні

Згідно з [89], комфортним вважається параметр PMV в діапазоні -0,5 – +0,5.

Для обґрунтування комфортності перебування в приміщенні було проаналізовано ряд комбінацій температур внутрішнього повітря та середньої радіаційної температури. Результати аналізу зведені до таблиці 3.19. Зеленим виділені комфортні пари температур.

Таблиця 3.9 – Дослідження комфортних показників температури внутрішнього повітря та середньої радіаційної температури

		Температура внутрішнього повітря																
PMV	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23	23.5	24	
	16	-1.36	-1.3	-1.24	-1.18	-1.13	-1.07	-1.01	-0.95	-0.89	-0.84	-0.78	-0.73	-0.67	-0.62	-0.57	-0.52	-0.48
	16.5	-1.32	-1.26	-1.2	-1.14	-1.08	-1.02	-0.96	-0.91	-0.85	-0.79	-0.74	-0.68	-0.63	-0.57	-0.52	-0.47	-0.43
	17	-1.28	-1.21	-1.15	-1.09	-1.04	-0.98	-0.92	-0.86	-0.8	-0.75	-0.69	-0.63	-0.58	-0.53	-0.47	-0.42	-0.38
	17.5	-1.23	-1.17	-1.11	-1.05	-0.99	-0.93	-0.87	-0.81	-0.76	-0.7	-0.64	-0.59	-0.53	-0.48	-0.43	-0.37	-0.33
	18	-1.19	-1.13	-1.06	-1	-0.94	-0.89	-0.83	-0.77	-0.71	-0.65	-0.6	-0.54	-0.49	-0.43	-0.38	-0.33	-0.27
	18.5	-1.14	-1.08	-1.02	-0.96	-0.9	-0.84	-0.78	-0.72	-0.66	-0.61	-0.55	-0.49	-0.44	-0.38	-0.33	-0.28	-0.23
	19	-1.12	-1.03	-0.97	-0.91	-0.85	-0.79	-0.73	-0.68	-0.62	-0.56	-0.5	-0.45	-0.39	-0.34	-0.28	-0.23	-0.18
	19.5	-1.1	-0.99	-0.93	-0.87	-0.81	-0.75	-0.69	-0.63	-0.57	-0.51	-0.46	-0.4	-0.34	-0.29	-0.23	-0.18	-0.13
	20	-1.05	-0.94	-0.88	-0.82	-0.76	-0.7	-0.64	-0.58	-0.52	-0.47	-0.41	-0.35	-0.3	-0.24	-0.19	-0.13	-0.08
	20.5	-1.01	-0.9	-0.84	-0.78	-0.72	-0.66	-0.6	-0.54	-0.48	-0.42	-0.36	-0.3	-0.25	-0.19	-0.14	-0.08	-0.03
	21	-0.96	-0.85	-0.79	-0.73	-0.67	-0.61	-0.55	-0.49	-0.43	-0.37	-0.31	-0.26	-0.2	-0.14	-0.09	-0.03	0.02
	21.5	-0.91	-0.81	-0.74	-0.68	-0.62	-0.56	-0.5	-0.44	-0.38	-0.32	-0.27	-0.21	-0.15	-0.1	-0.04	0.01	0.07
22	-0.82	-0.76	-0.7	-0.64	-0.58	-0.52	-0.46	-0.4	-0.34	-0.28	-0.22	-0.16	-0.1	-0.05	0.01	0.06	0.12	
22.5	-0.78	-0.71	-0.65	-0.59	-0.53	-0.47	-0.41	-0.35	-0.29	-0.23	-0.17	-0.11	-0.06	0	0.06	0.11	0.17	
23	-0.73	-0.67	-0.61	-0.54	-0.48	-0.42	-0.36	-0.3	-0.24	-0.18	-0.12	-0.07	-0.01	0.05	0.11	0.16	0.22	
23.5	-0.68	-0.62	-0.56	-0.5	-0.44	-0.37	-0.31	-0.25	-0.19	-0.13	-0.08	-0.02	0.04	0.1	0.15	0.21	0.27	
24	-0.64	-0.57	-0.51	-0.45	-0.39	-0.33	-0.27	-0.21	-0.15	-0.09	-0.03	0.03	0.09	0.15	0.2	0.26	0.32	
Середня радіаційна температура																		

Отримані результати також були використані для аналізу впливу температури внутрішнього повітря та середньої радіаційної температури на параметр PMV. Даний аналіз, потенційно, дасть змогу надавати більш ефективні рекомендації щодо підвищення комфортності в приміщенні.

Параметр комфортності більш чутливий саме до температури внутрішнього повітря, ще демонструється меншим кутом нахилу кривої. Дана знахідка також демонструє перевагу повітряної системи опалення перед іншими типами з точки зору комфортності, оскільки така дозволяє швидше змінювати температуру повітря, за необхідності. Радіаційна температура, з іншої точки зору дозволить знизити температуру повітря, що є більш енергоефективним.

Детальний аналіз впливу параметрів на суб'єктивне сприйняття комфортності був проведений в [90]. Аналіз результатів моделювань підтверджують висновки в [90].

Як зазначається в [90], температура внутрішнього повітря має більший вплив на параметри комфортності порівняно з середньою радіаційною температурою. У роботі зазначено, що послідовність чутливості умов комфортності до різних параметрів моделі зменшується в ряду: температура внутрішнього повітря, середня радіаційна температура, швидкість обміну речовин, теплоізоляція одягу, тепловий захист будівлі, температура зовнішнього повітря.

Це вказує на те, що оптимальне управління температурою внутрішнього повітря може бути більш ефективним для забезпечення теплового комфорту в порівнянні з регулюванням середньої радіаційної температури, хоча остання також важлива і має помітний вплив на загальні умови комфорту в приміщенні.

Аналіз параметру PMV також вказує на недосконалість поточного підходу до мікроклімату будівель у Україні, оскільки, не зважаючи на значний вплив середньої радіаційної температури на суб'єктивне сприйняття комфортності, [91-92] даний параметр мікроклімату не нормує.

Аналіз впливу запропоновано провести на так званому “найгіршому сценарію”. З цією метою, обрано кутовий клас, що має спільні стіни з

приміщенням, яке у визначений день тижня має постійну температуру 16°C . Кутове приміщення вибрано не випадково, адже саме в них радіаційна температура може найбільше впливати на відчуття комфорту, враховуючи значний об'єм контакту зовнішніх стін з зовнішнім середовищем. Можливі ефекти пониження комфортності перебування в приміщенні особливо актуально для неутеплених будівель, які, як правило, демонструють вищу чутливість до коливань зовнішніх температур, роблячи будь-які зміни в температурних режимах в сусідніх приміщеннях більш відчутними у контексті загальної комфортності перебування.

Розміщення приміщення, що було обрано для аналізу, наведено на рисунку 3.10:

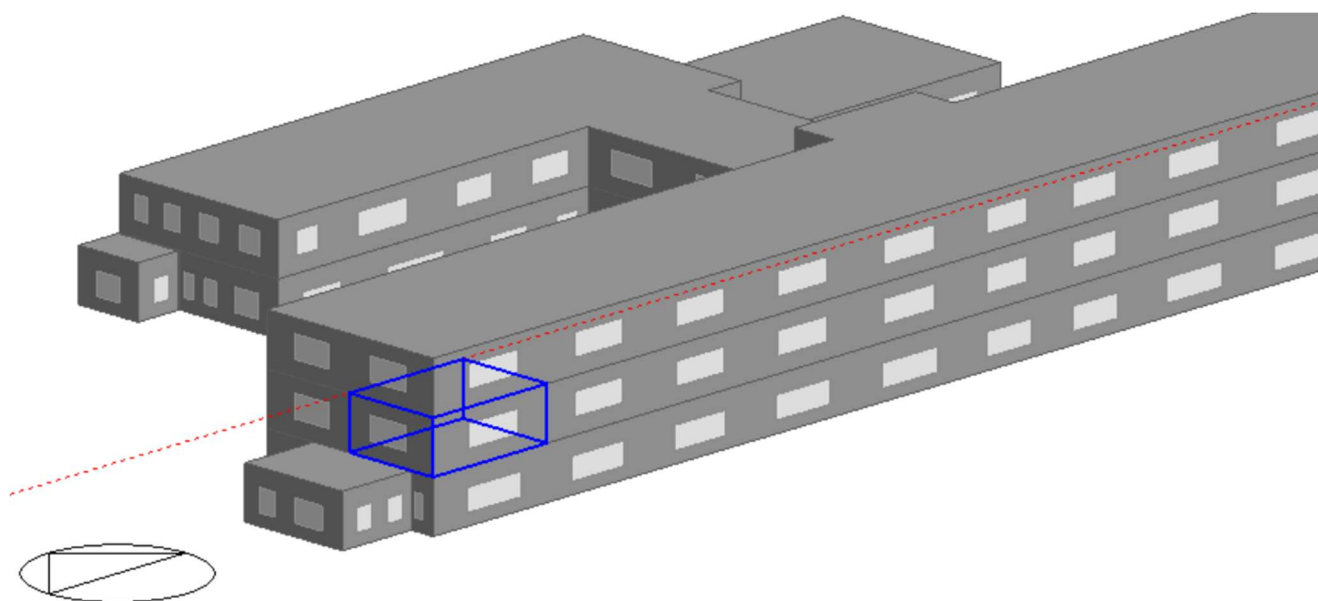


Рисунок 3.10 – Приміщення, що було використано для дослідження комфортності при введенні енергоефективних режимів опалення

Результати моделювань для випадків неутепленої та утепленої будівель представлені у вигляді добового графіку коливання двох згаданих вище температур, для на рисунку 3.10 та 3.11:

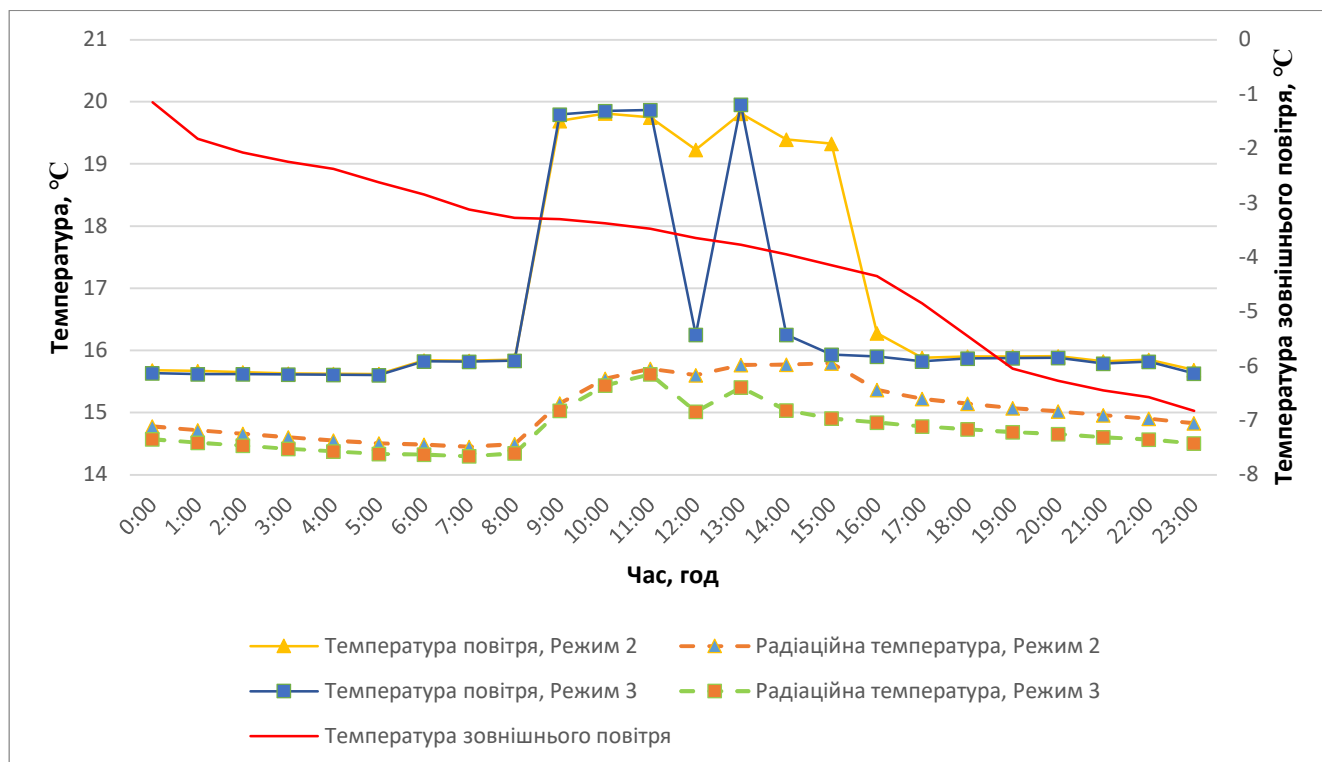


Рисунок 3.11 – Вплив сусіднього приміщення, що не експлуатується на комфортність перебування в класі, випадок поточного стану будівлі

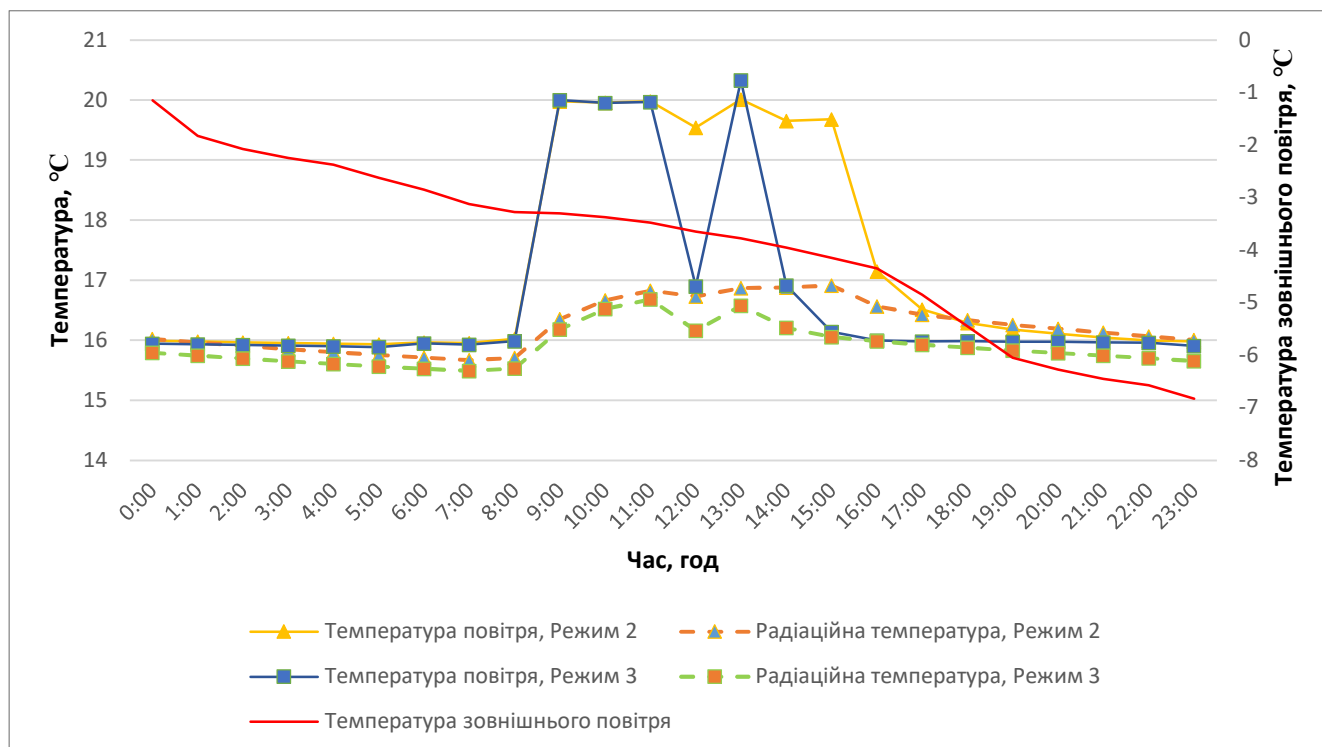


Рисунок 3.12 – Вплив сусіднього приміщення, що не експлуатується на комфортність перебування в класі, випадок будівлі з огорожувальними конструкціями, що відповідають ДБН 2.6-31:2021

Аналіз детально показує, що при використанні режиму 3 спостерігається незначне пониження радіаційної температури порівняно з режимом 2, як для утепленої, так і неутепленої будівлі. Це пониження, хоча і є статистично вимірним, не має значного впливу на суб'єктивне відчуття комфорту людини (коливання температур в такому низькому діапазоні, значного впливу на параметр PMV не спричинить). Така ситуація вказує на те, що зміна режимів опалення може бути використана як інструмент для ефективнішого управління енергоспоживанням без суттєвого зниження комфорту проживання.

Додатково, впровадження додаткової ізоляції в будівлях підвищує радіаційну температуру на приблизно 1°C. Це підкреслює критичну важливість утеплення будівель для підвищення енергоефективності та комфорту проживання. Утеплення не лише сприяє збереженню тепла в холодну пору року, але й дозволяє ефективно нівелювати будь-які незначні пониження температури, що можуть виникати при зміні режимів опалення, зокрема при переході на режим 3.

Таким чином, застосування комплексного підходу, який включає в себе і оптимізацію режимів опалення, і покращення теплоізоляційних характеристик будівель, може слугувати ефективним засобом для досягнення вищої енергоефективності та створення комфортніших умов проживання.

Також, як зазначалось раніше, режими 2 та 3 потребують значного підвищення потужності опалення, що означає необхідність її заміни на більш потужну в випадках впровадження даних режимів. В моделях, що аналізувались вище, необхідна потужність системи опалення автоматично розраховується залежно від потреби. Проте, така модернізація потребує значних капіталовкладень, а також, не є першочерговим заходом з енергозбереження.

Зважаючи на результати аналізу необхідної максимальної потужності системи опалення, цікавим варіантом є модернізація оболонки будівлі з доведенням термічних її показників до рівня 2021 року, разом з впровадженням енергоефективного режиму опалення 2 або 3, що дозволяє не збільшувати потужність інженерних систем будівлі та задовільнити комфортні умови в будівлі.

Ватро зазначити, що згідно з аналізом суб'єктивного сприйняття комфортності проведеним на початку розділу, жоден з розглянутих режимів, для жодного рівня ізоляції не відповідає комфортним умовам перебування в приміщенні.

В першу чергу, це викликано низькими показниками середньої радіаційної температури, на рівні 16-17 °С, протягом дня. Для компенсації впливу такого низького значення середньої радіаційної температури на параметр PMV, температура внутрішнього повітря має досягати 24 °С, що не було враховано в моделюванні, оскільки термостат встановлювався на 20 °С.

Висновки до розділу 3

Дослідження, яке було ініційоване з метою комплексної оцінки впливу варіативності режимів опалення на загальне енергоспоживання та ефективність систем опалення в контексті шкільних будівель, дозволило виявити низку значущих висновків, які мають важливе практичне застосування. Зокрема, було зосереджено увагу на аналізі ефективності переривчастих режимів опалення, які впроваджувались в шкільних закладах, що як проходили термомодернізацію, так і не мали додаткової ізоляції. Були порівняні режим з пониженням температури на 4°C в неробочі години, вихідні та святкові дні, а також аналогічний режим з використанням шкільного розкладу занять для отримання додаткових годин пониження в періоди відсутності уроків в приміщеннях шкільних класів. Дослідження проводилось для будівель школи з трьома рівнями ізоляціями: без додаткового утеплення, з рівнем теплової ізоляції що відповідає ДБН В2.6-31 2016 та 2021, що дало змогу узагальнити отримані результати та надати більш точні рекомендації.

Ретельний аналіз, проведений за допомогою комп'ютерного моделювання, продемонстрував, що імплементація переривчастих режимів опалення значно підвищує енергоефективність об'єктів дослідження. Зокрема, використання таких режимів дозволяє заощадити від 23% до 27% енергії на опалення. Таке

підвищення ефективності є особливо значущим у контексті необхідності зменшення енергоспоживання та оптимізації використання енергетичних ресурсів.

Окрім цього, аналіз режиму опалення, який базується на розкладі занять у школах (режим 3), виявив його вищу ефективність порівняно з більш простими схемами, що передбачають зниження інтенсивності опалення поза робочими годинами (режим 2). Виявлені переваги включають не тільки збільшення енергоефективності на 1,8-4,2% але й зниження пікових навантажень на систему опалення на 3,3-3,7%, що має значний потенціал для покращення стабільності та надійності роботи опалювальних систем.

Важливим аспектом є те, що впровадження режиму 3 не призводить до значного зниження комфортності умов перебування в порівнянні з режимом 2, що робить його привабливим варіантом для застосування в освітніх установах. Проте, необхідно враховувати, що реалізація даного режиму вимагає використання сучасного обладнання та щорічного оновлення графіку занять, що може стати додатковим викликом для шкіл.

За результатами дослідження, режими 2 та 3 сприяють зростанню навантаження на системи опалення в будівлях різного рівня ізоляції. Однак, при впровадженні енергоефективних режимів опалення в будівлях, ізольованих до мінімальних вимог ДБН В2.6-31 2016 та 2021, навантаження не перевищують потужності систем опалення, розрахованої для постійного режиму в неізольованих будівлях. Це дозволяє рекомендувати впровадження зазначених режимів у школах, що проходять процес термомодернізації, без необхідності заміни опалювальної системи, проте варто зазначити, що такий підхід, в випадку водяного опалення, варто застосовувати лише для двотрубних систем, або однокотлових систем з байпасом.

Таким чином, регулювання опалення відповідно до розкладу занять виявилось перспективним заходом для забезпечення енергозбереження в шкільних будівлях незалежно від їх рівня теплоізоляції. Водночас, в аспекті шкіл

без термомодернізації, цей підхід, як правило, вимагатиме модернізації систем опалення для досягнення оптимального рівня енергоефективності.

Зафіксоване зниження навантаження на систему опалення при застосуванні режиму 3 вказує на потенціал для подальшого вивчення та аналізу з метою розробки оптимальних сценаріїв використання навчальних приміщень, що може сприяти зниженню енергетичних витрат у шкільних закладах без необхідності кардинальної зміни існуючих систем опалення. Це дослідження покладає фундамент для майбутніх наукових розробок у цій області, вказуючи на важливість комплексного підходу до енергозбереження в освітніх установах.

РОЗДІЛ 4. ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ШКОЛИ В УМОВАХ НЕПОВНОЇ ЗАЙНЯТОСТІ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ОПАЛЕННЯ ПРИМІЩЕНЬ

Із початком збройного конфлікту та у зв'язку з пов'язаними з ним економічними складнощами, в Україні значно зросла потреба в оптимізації використання енергетичних ресурсів. Спричинені війною перебої у централізованому енергопостачанні ставлять перед освітніми установами виклик підтримувати навчальний процес в умовах неповної зайнятості будівель та обмежених ресурсів. Особливо актуальним стає питання раціонального використання простору та енергії, при цьому забезпечуючи безпеку та комфорт учнів і вчителів.

У контексті сучасних викликів, які постають перед освітніми установами, особливо актуальним стає питання оптимізації використання шкільних приміщень в умовах неповної зайнятості. З огляду на це, останні наукові дослідження в даній сфері відіграють ключову роль у визначенні найбільш ефективних шляхів зниження енергоспоживання шляхом впровадження інноваційних систем опалення, вентиляції, та кондиціонування, які адаптуються до актуальної кількості осіб у приміщенні [93, 94]. Використання таких підходів дозволяє не тільки суттєво скоротити витрати на енергію, але й створити оптимальні умови для здоров'я та комфорту учнів і вчителів, в першу чергу, підтримуючи відповідний мікроклімат у навчальних закладах.

Поглиблені дослідження в області комфортності приміщень акцентують на критичній важливості створення комфортного навчального середовища, з особливим фокусом на контроль якості повітря (включно з рівнем CO₂), температури, вологості, та освітленості приміщень. Окремі наукові роботи зосереджують увагу на тепловому комфорті в дошкільних та шкільних навчальних закладах, аналізуючи вплив теплового захисту та якості повітря на створення оптимальних умов для навчання [94-98]. Ефективний контроль над цими параметрами має значний потенціал для підвищення якості освітнього

процесу, сприяючи поліпшенню здоров'я, благополуччя, та академічної продуктивності учнів.

З іншого боку, відчутний дефіцит досліджень, присвячених гнучкості використання простору в шкільних закладах, особливо у контексті їх неповної зайнятості, вимагає додаткової уваги. Ідея перепланування шкільних приміщень для створення багатофункціональних зон, здатних адаптуватися до різноманітних освітніх та виховних потреб, відкриває нові можливості для ефективного використання шкільного простору в умовах неповної зайнятості будівлі. Такий підхід може включати в себе оптимізацію використання окремих частин приміщень залежно від поточних потреб школи, що сприяє зниженню витрат на утримання та опалення невикористовуваних зон.

Крім того, інтеграція гнучких рішень щодо використання простору може підвищити загальну ефективність навчальних закладів, дозволяючи швидко адаптуватися до змін у кількості учнів, вимог до навчальних програм, а також до інших зовнішніх і внутрішніх факторів. Це також може включати створення спеціалізованих зон для групових занять, індивідуальної роботи, а також просторів для відпочинку та рекреації, що відіграють важливу роль у формуванні цілісного освітнього середовища.

Узагальнюючи вищезгадане, сучасні дослідження у сфері оптимізації умов експлуатації шкільних приміщень, особливо у контексті неповної зайнятості, відкривають широкі перспективи для підвищення ефективності використання ресурсів. Вони пропонують рішення для створення оптимальних умов для навчання та розвитку учнів, що сприятиме підвищенню якості освіти та забезпеченню здорового навчального середовища. Гнучке перепланування простору, та інтеграція сучасних технологій управління будівлями може значно зменшити енергоспоживання і витрати на утримання шкільних приміщень, одночасно покращуючи умови для учнів і персоналу. Додаткової актуальності дослідження набуває якщо врахувати те, що частина учнів не має можливості повноцінно навчатись дистанційно через відсутність зручного місця навчання або доступу до стабільного інтернету.

Враховуючи вище сказане, пропонується розглянути сценарій, за яким об'єкт дослідження - шкільна будівля, описана в розділах вище - перебуває в стані, що можна охарактеризувати як «законсервована». Це означає, що ключові системи, зокрема система опалення та гарячого водопостачання, не задіяні, а значна частина приміщень у будівлі залишаються такими, що не експлуатуються, та без опалення.

Описаний стан будівлі, наприклад, може характеризувати шкільну будівлю, що через пошкодження енергетичної інфраструктури, втратила можливість отримувати централізоване опалення.

Необхідність запроваджувати такий режим опалення можна виправдати соціальними факторами, а саме, частина дітей не має комфортного місця навчання в домашніх умовах, або стабільного інтернет зв'язку.

Таким чином, дослідження в цьому напрямку, не лише дозволяють підвищити енергоефективність, але й дозволяє забезпечувати дітей з уразливих верств населення більш якісною освітою.

План-схема дослідження наведена на рисунку 4.1:

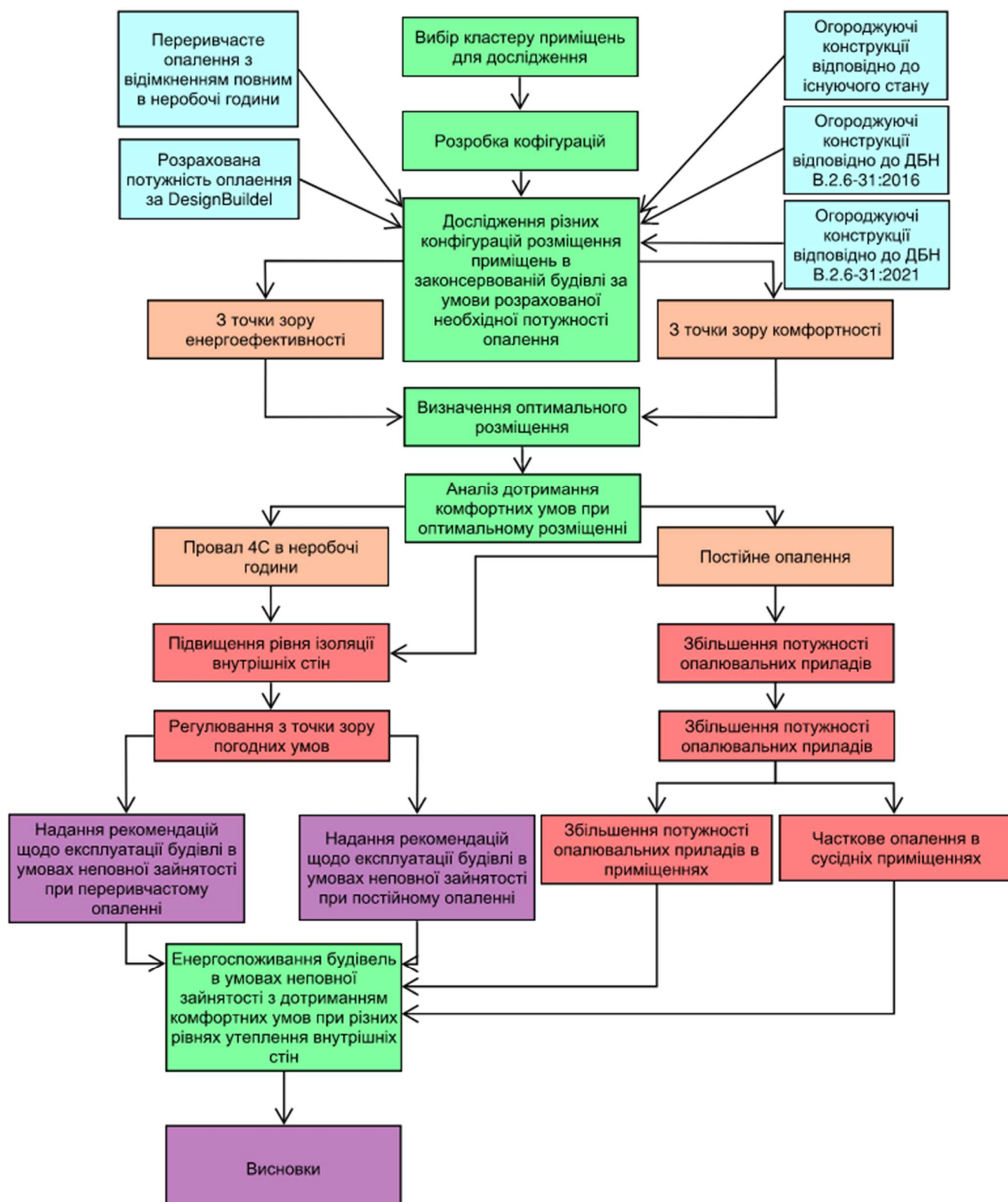


Рисунок 4.1 – План-схема дослідження енергоспоживання школи в умовах неповної зайнятості для різних режимів опалення приміщень

4.1 Методологія досліджень енергоспоживання будівлі школи в умовах неповної зайнятості

З метою дослідження енергоспоживання будівлі школи в умовах неповної зайнятості, модель модифікована таким чином, що з усього її обсягу виділяється специфічний сегмент, що складається з п'яти класних кімнат. Ці приміщення вважаються потенційно придатними для тимчасового перебування учнів, з урахуванням певної адаптації під ці потреби.

Попередньо був проведений аналіз оптимальної орієнтації приміщень з точки зору сонячних теплонадходжень,

Приміщення, обрані з метою дослідження представлені на рисунку 4.2:

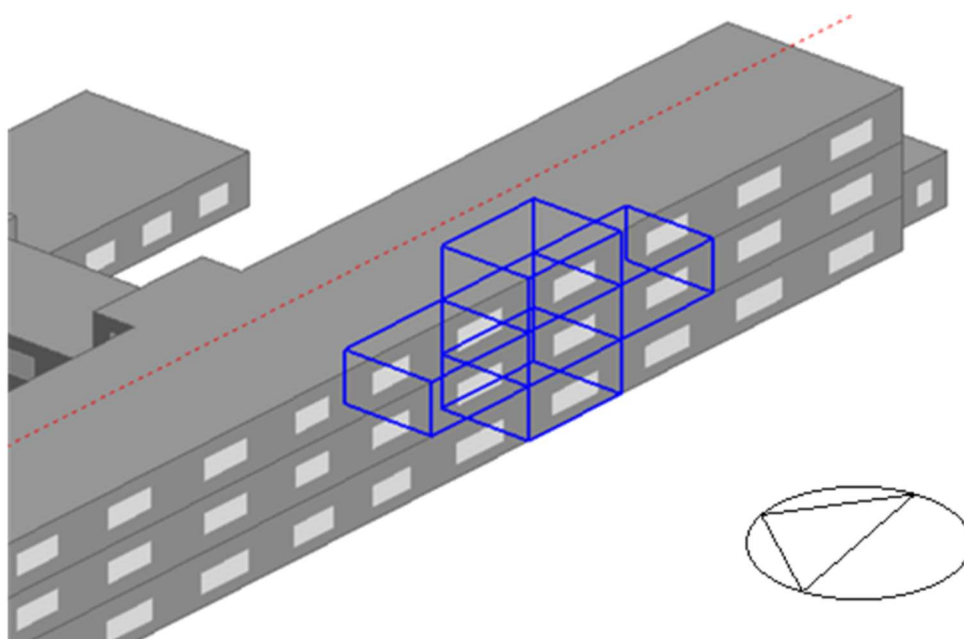


Рисунок 4.2 – Досліджувані приміщення в будівлі

З п'яти описаних вище приміщень, запропоновано експлуатувати лише три кімнати в різних конфігураціях, для визначення оптимального розміщення кімнат що експлуатуються, одна-відносно іншої.

Запропоновані конфігурації приміщень, в схематичному вигляді, наведені на рисунку 4.3:

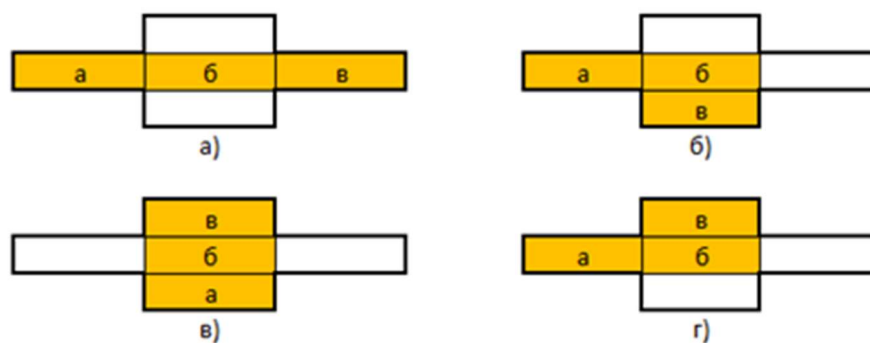


Рисунок 4.3 – Запропоновані приклади розміщених приміщень при неповній зайнятості будівлі: а) Без контакту з дахом та підлогою (конфігурація А); б) контакт з однією внутрішньою неопалювальною стіною та підлогою (конфігурація Б); в) без контакту з внутрішніми неопалювальними стінами (конфігурація В); г) контакт з однією внутрішньою неопалювальною стіною та дахом (конфігурація Г). Приміщення, що розглядаються в якості приміщень, що експлуатуються позначені жовтим кольором.

Кожна з досліджуваних конфігурацій має свої переваги, а саме:

- конфігурація А – приміщення контактують в більшості з неопалювальними приміщеннями, відсутність контакту з дахом та підлогою по ґрунту;
- конфігурація Б – відсутність контакту з дахом будівлі, доступ до одного з приміщень відбувається через перший поверх будівлі;
- конфігурація В – мінімальна кількість контакту з неопалювальними приміщеннями;
- конфігурація Г – відсутність контакту з підлогою по ґрунту, потенційні теплонадходження від даху будівлі.

Забезпечення опалення у вибраних класних кімнатах передбачається реалізувати за допомогою індивідуальних нагрівальних пристроїв. Такий підхід дозволяє створити в приміщеннях умови, комфортні для перебування дітей, без необхідності залучення до експлуатації загальношкільної системи опалення. Це, в свою чергу, сприяє ефективності використання ресурсів та зниженню витрат на

утримання будівлі в період, коли вона використовується не за призначенням або в режимі обмеженої експлуатації.

Як і в дослідженнях вище, аналіз проводився для трьох випадків:

- реальний стан будівлі;
- огорожувальні конструкції будівлі були доведені до мінімальних значень згідно ДБН В.2.6-31:2016;
- огорожувальні конструкції будівлі були доведені до мінімальних значень згідно ДБН В.2.6-31:2021.

Для приміщень, що експлуатуються, були розроблені графіки присутності людей, використання освітлення та обладнання, а також графік опалення з урахуванням типових свят та канікул. Графіки, що були використані, наведені в таблиці 4.1:

Таблиця 4.1 – Графік використаний для приміщень з присутністю людей

Система опалення			Присутність людей, використання обладнання та освітлення		
Година	Пн-Пт	Вихідні та святкові дні	Година	Пн-Пт	Вихідні та святкові дні
00:00-6:00	Вимкнено	Вимкнено	00:00-6:00	0	0
6:00-7:00	16°C	Вимкнено	6:00-8:00	0	0
7:00-15:00	20°C	Вимкнено	8:00-15:00	100%	0
15:00-16:00	16°C	Вимкнено	15:00-16:00	0	0
16:00-24:00	Вимкнено	Вимкнено	16:00-24:00	0	0

В приміщеннях введено регулювання опалювальних приладів з цільовим рівнем температури повітря встановленому на рівні 20°C згідно з [15].

У дослідженні розглянуто будівлю в законсервованому стані, тобто, системи опалення, вентиляції та ГВП повністю вимкнені, теплоносій в системах відсутній.

Опалення забезпечувати пропонується електронагрівачами, таким чином, опалення в приміщеннях буде забезпечуватись без задіяння інженерних систем будівлі.

В цілях економії, пропонується повністю вимикати нагрівачі з 16:00 до 6:00, оскільки будівля законсервована та ризик пошкодження будівлі відсутній, проте, за дві години до початку навчального процесу пропонується прогрівати приміщення для досягнення нормального рівня температури на момент прибуття людей.

4.2 Оптимальне розміщення приміщень в умовах неповної зайнятості з точки зору енергоефективності

Першим кроком в дослідженні стало визначення ефективності розміщення приміщень на основі енергоспоживання системою опалення для будівель з трьома рівнями теплоізоляції згаданими вище. Результати моделювання споживання системою опалення в річному зрізі наведені на рисунку 4.4:

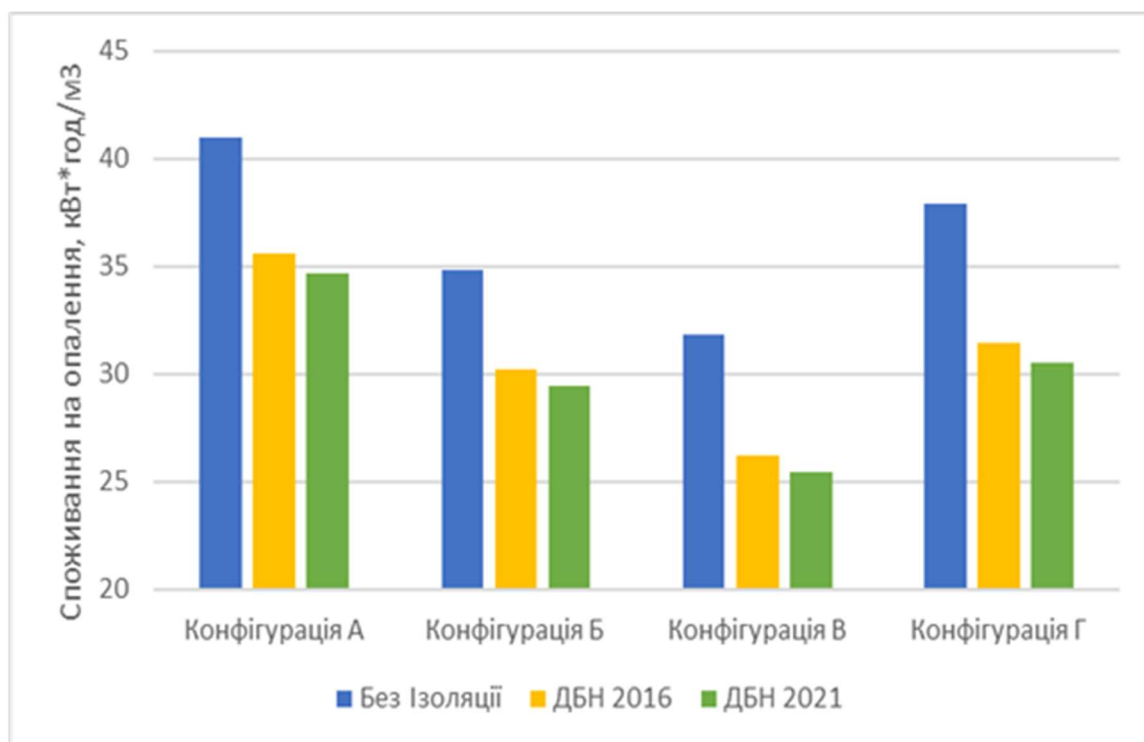


Рисунок 4.4 – Питоме споживання енергії системою опалення для різних конфігурацій розміщення приміщень та різних рівнів ізоляції будівлі

У ході аналізу річного споживання енергії на опалення, для обігріву обраних шкільних приміщень, було виявлено, що конфігурація В вирізняється як найбільш ефективна з точки зору енергоефективності для всіх досліджуваних рівней ізольованості будівлі. Це підтверджується, зокрема, порівнянням з іншими варіантами конфігурацій, де В показує на 8,5% нижче споживання енергії у порівнянні з найближчим конкурентом і до 22,3% менше, порівнюючи з найменш ефективною конфігурацією А. Така значна економія енергії обумовлена оптимізованою площею огорожувальних конструкцій, що мінімізує контакт із неопалювальними просторами, що, своєю чергою, знижує тепловтрати.

Окрім того, встановлено, що конфігурація В більш чутлива до покращення ізольованості будівлі ніж інші конфігурації. Зокрема, оновлення ізоляції до стандартів ДБН 2016 року призводить до зниження споживання енергії на 17,7%, тоді як адаптація до вимог ДБН 2021 року дозволяє досягти ще більшої економії – на рівні 20,2%. Це підкреслює важливість якісної теплоізоляції, особливо для приміщень, що мають інтенсивний контакт із зовнішнім середовищем, таких як дах.

В той же час, конфігурація А виявилася найменш ефективною з погляду енергоспоживання, що ставить під сумнів доцільність експлуатації лише окремих поверхів для оптимізації доступу до навчальних класів. Цей висновок має важливе значення для планування використання простору в шкільних будівлях, особливо зважаючи на те, що експлуатація певного поверху з консервацією інших є популярним підходом в нежитлових будівлях.

Конфігурації Б та Г показують схожі показники споживання енергії, проте аналіз показує, що сонячні надходження на дах не компенсують тепловтрат через огорожувальні конструкції. Проте зі збільшенням рівня теплоізоляції будівлі, різниця між цими двома варіантами зменшується, з 8,2% без ізоляції до 3,6% для будівель, утеплених до нормативу 2021 року. Це дає підстави вважати, що для будівель із високим рівнем теплоізоляції, конфігурація Г може бути більш привабливою в порівнянні з конфігурацією Б.

Оскільки конфігурація В показала найбільшу ефективність, подальше дослідження енергоспоживання будівлі школи в умовах неповної зайнятості проводилось саме при такому розміщенні приміщень одне-відносно-одного.

4.3 Дослідження комфортності перебування в приміщеннях в умовах неповної зайнятості

Важливим чинником, що варто враховувати при впровадженні будь-яких режимів експлуатації будівель є комфортність перебування людей в приміщеннях.

Аналіз температурних умов, зокрема коливань температури повітря та радіаційної температури в приміщеннях для конфігурації В на найхолоднішу добу навчального року (згідно з моделюванням, 9 січня 2020 року), представлений на рисунках 4.5, 4.6 та 4.7.

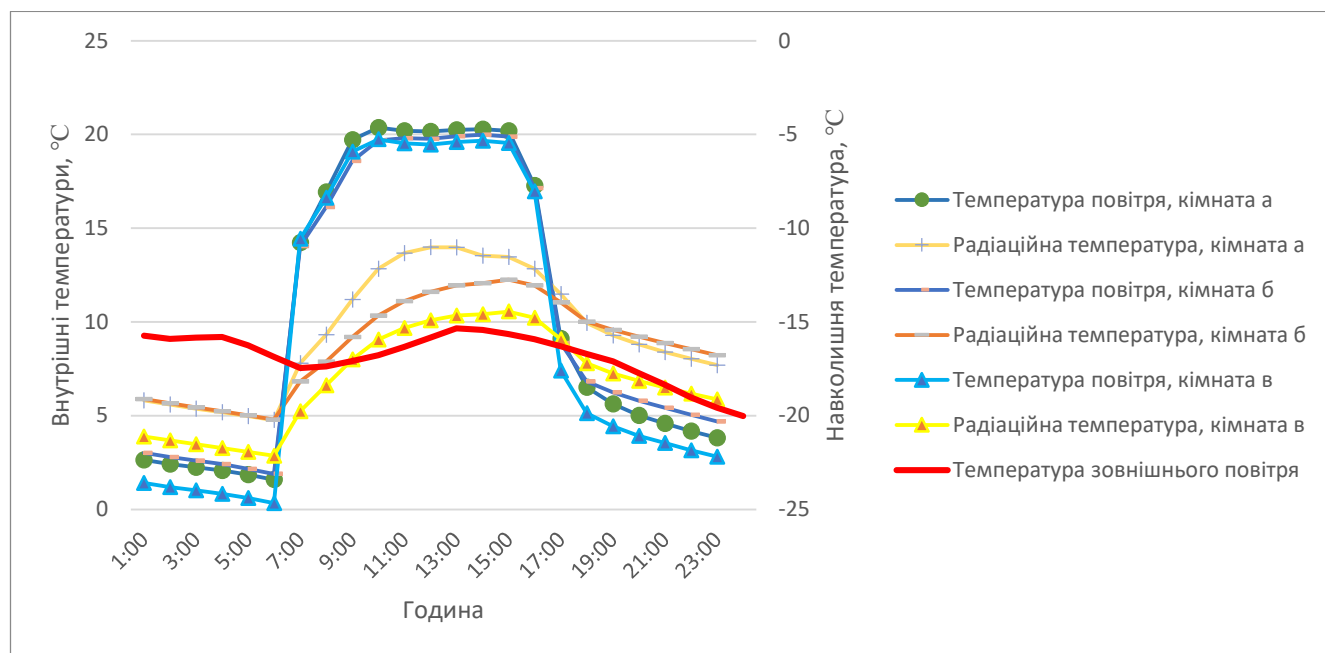


Рисунок 4.5 –Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі без ізоляції

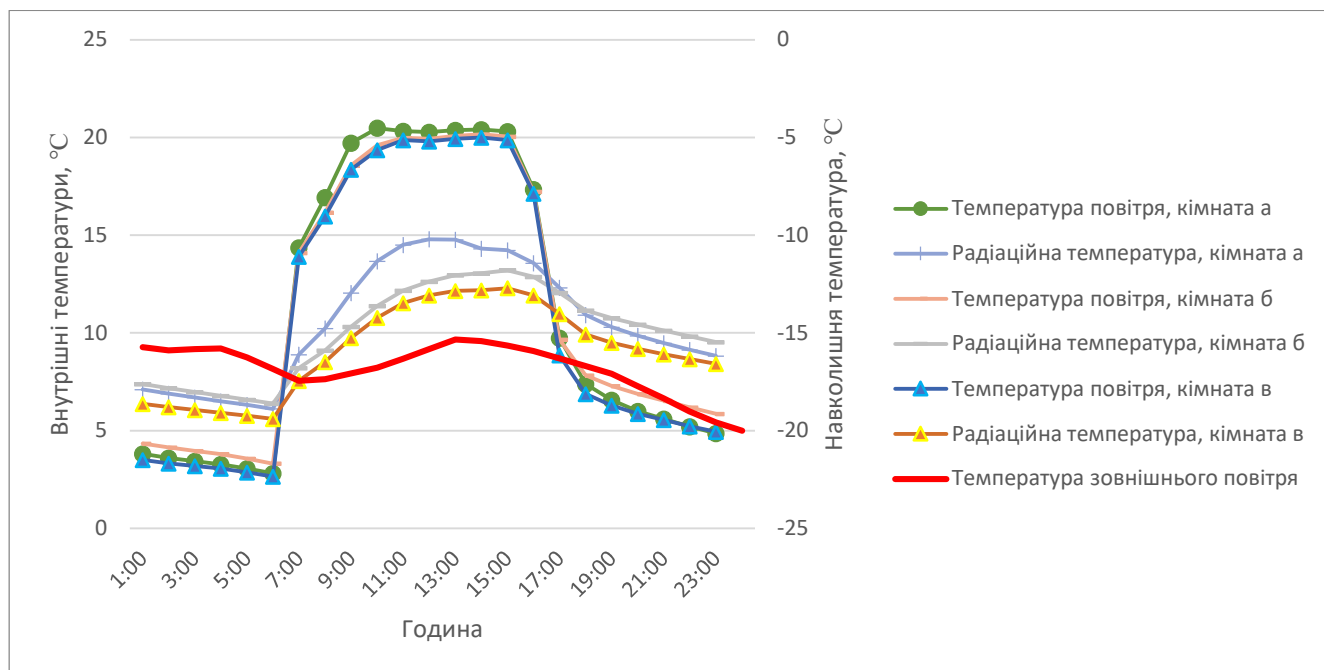


Рисунок 4.6 – Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі утепленої до вимог ДБН 2016 року

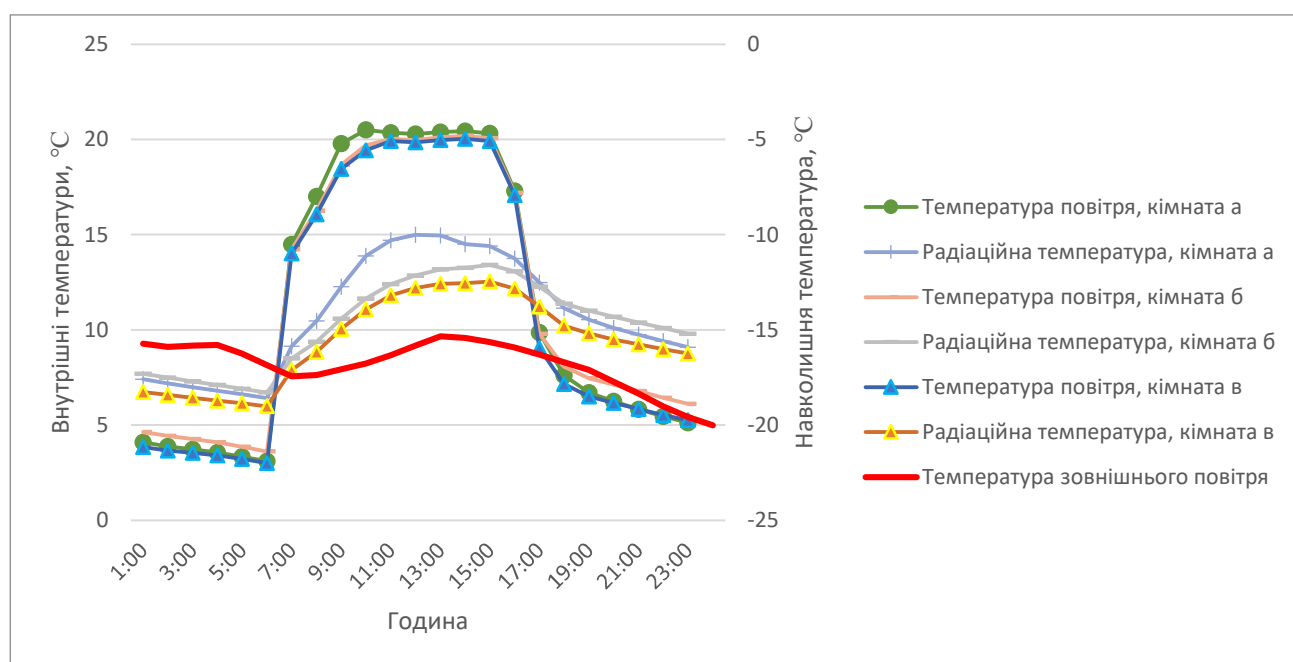


Рисунок 4.7 – Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі утепленої до вимог ДБН 2021 року

Аналіз температурних умов в приміщеннях шкільної будівлі в погодинному зрізі виявив істотно нижчий, порівняно з температурою внутрішнього повітря, рівень радіаційної температури, що є більш виразним в сценаріях, де будівля не

має достатнього рівня теплоізоляції. У найменш сприятливому випадку, зокрема в приміщенні «в» без додаткової ізоляції, середня радіаційна температура може становити 8°C під час перебування людей у будівлі, що очевидно створює некомфортні умови перебування в приміщенні.

Втім, з підвищенням рівня теплоізоляції будівлі, в той самий час та для того самого приміщення, температура встановлюється на рівні 10°C, що все ж таки залишається нижче оптимальних умов.

На основі цих спостережень, рекомендація щодо впровадження режимів зайнятості приміщень без проведення попередньої модернізації будівлі надано бути не може, з точки зору забезпечення комфортних умов для перебування для учнів та вчителів.

Крім того, в ході аналізу було зафіксовано різке зростання температури повітря в досліджуваних кімнатах, що свідчить про високу потужність опалювальних приладів, встановлених у приміщенні.

Цей аспект демонструє, що, незважаючи на потенційну можливість швидкого досягнення необхідного рівня температури повітря в кімнаті, суттєві теплові втрати через недостатню ізоляцію внутрішніх стін та низьку температуру в сусідніх приміщеннях, призводять до некомфортних умов через низьку середню радіаційну температуру.

Оскільки програма DesignBuilder розраховує необхідну потужність опалювальних приладів виходячи з потреби, яка саме враховує тепловтрати в перехідні періоди найхолоднішого дня, таким чином, потужність системи опалення значно вища за типову. Дане твердження було перевірено за допомогою додаткового моделювання.

Результати симуляцій, що демонструють потужність системи опалення для конфігурації А та В (як найменш та найбільш ефективних з запропонованих принципів розміщення приміщень), представлені на рисунку 4.8:

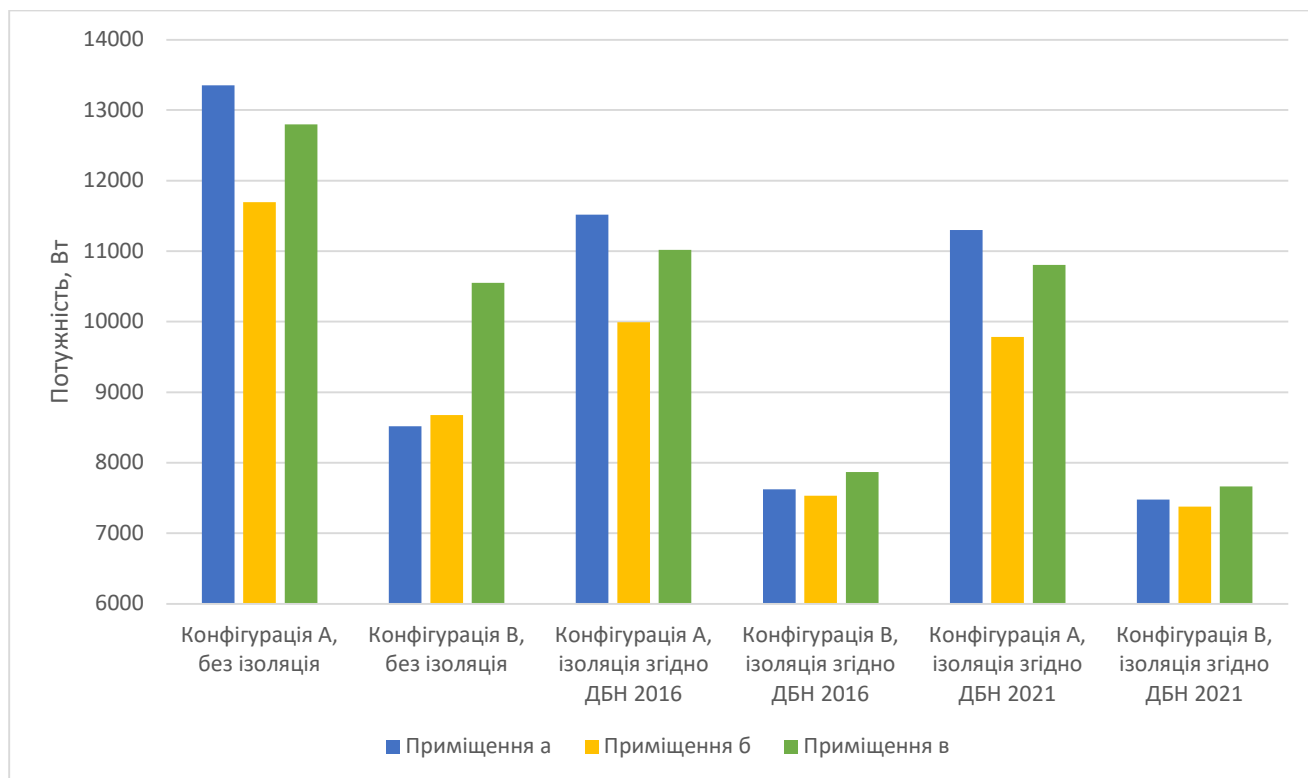


Рисунок 4.8 – Необхідна сумарна потужність системи опалення пілотних приміщень при впровадженні заходу

Аналіз потреби на опалення на основі розрахунку програмою енергетичного моделювання в умовах частково законсервованої шкільної будівлі, показує що необхідна потужність опалення має значний діапазон коливань – від 7,3 до 13,4 кВт. Це дозволяє рекомендувати описані вище режими експлуатації в двох конкретних сценаріях: перший передбачає що в будівлі наявна система централізованого повітряного опалення з регулюванням на приладах опалення; другий сценарій вимагає збільшення потужності локальних нагрівальних приладів, щоб забезпечити достатній рівень тепла в кожному з використовуваних приміщень.

Централізована повітряна система опалення з індивідуальним регулюванням на опалювальних приладах може бути ефективним рішенням для шкільних будівель, оскільки вона забезпечує можливість адаптації до різних теплових вимог у різних частинах будівлі без необхідності додаткової модернізації. Проте, така система не є типовою для шкільних закладів України (але досить типова за кордоном).

У ситуації, коли використання централізованої системи опалення не є можливим (наприклад, водяна система опалення не дозволить значно збільшити потужність на індивідуальних опалювальних приладах, а також, її використання не є доцільним в випадку законсервованої будівлі), альтернативним рішенням є суттєве збільшення потужності локального опалення, шляхом встановлення індивідуальних приладів (наприклад, електронагрівачів). Цей підхід вимагає додаткових інвестицій у придбання та встановлення обладнання з високою сумарною потужністю, що буде здатне забезпечити належний рівень обігріву приміщень навіть при низьких зовнішніх температурах.

Варто зазначити, що питання комфортності перебування в приміщеннях залишається не вирішеним.

В контексті подальшого аналізу стратегій оптимізації використання шкільних будівель, було проаналізовано варіант приміщень з типовою тепловою потужністю опалювальних приладів, що становить приблизно 2 кВт у кожному з приміщень. Як і в випадку вище, опалювальні прилади представляють собою індивідуальні електронагрівачі. На приладах є можливість регулювання за температурою внутрішнього повітря.

Враховуючи отримані вище результати, було проаналізовано внутрішню температуру повітря та середню радіаційну температуру приміщень, розташованих вертикально (конфігурація В), зі встановленими опалювальними приладами зазначеної вище потужності та огорожувальними конструкціями, що відповідають вимогам ДБН 2021 року. Результати цього аналізу, представлені на рисунку 4.9:

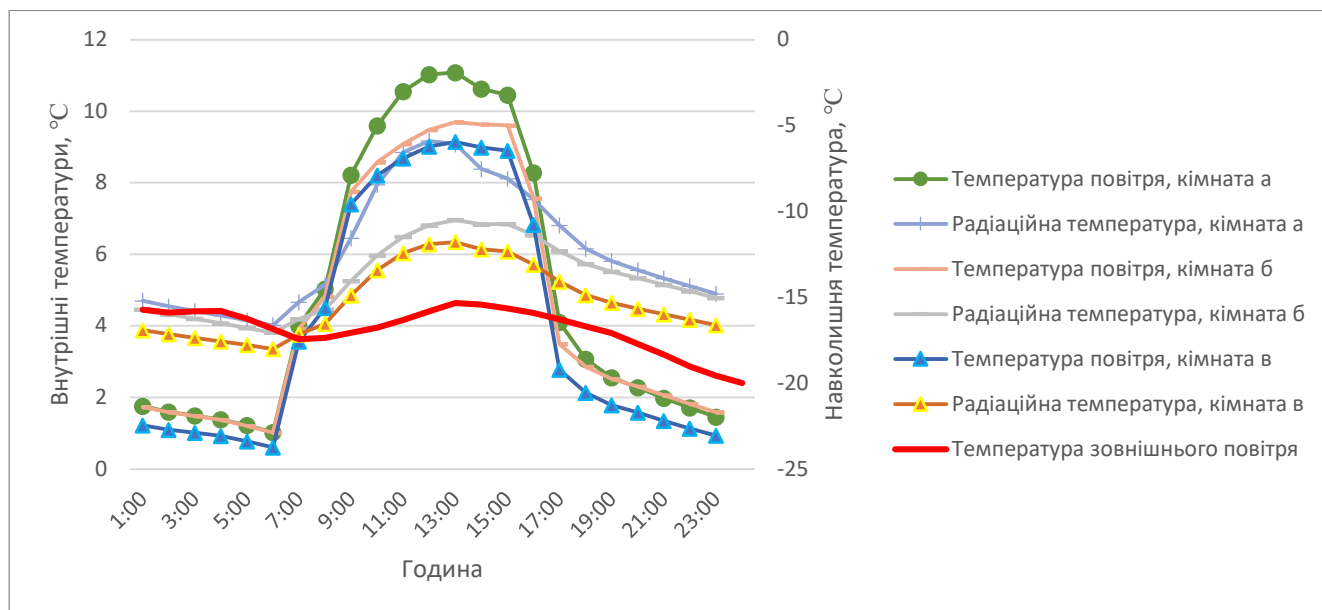


Рисунок 4.9 – Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 2 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021

Згідно з результатів моделювання, в загальному, для всіх приміщень, спостерігається значне зниження температури повітря та середньої радіаційної температури, а в найкращому випадку (приміщення а) температура повітря на піку досягає 11 °C, а середня радіаційна температура 9,2 °C.

Це означає, що при використанні 2кВт опалювальних приладів система опалення не може задовільнити мінімальну температуру повітря при переривчастому режимі, навіть в випадку добре ізольованої будівлі.

Оскільки прилади опалення не можуть задовільнити комфортні умови при переривчастому графіку опалення, також були проаналізовані температури для режиму опалення з провалом на 4 °C в неробочі години (рис. 4.10), а також випадку постійного режиму опалення (рис. 4.11).

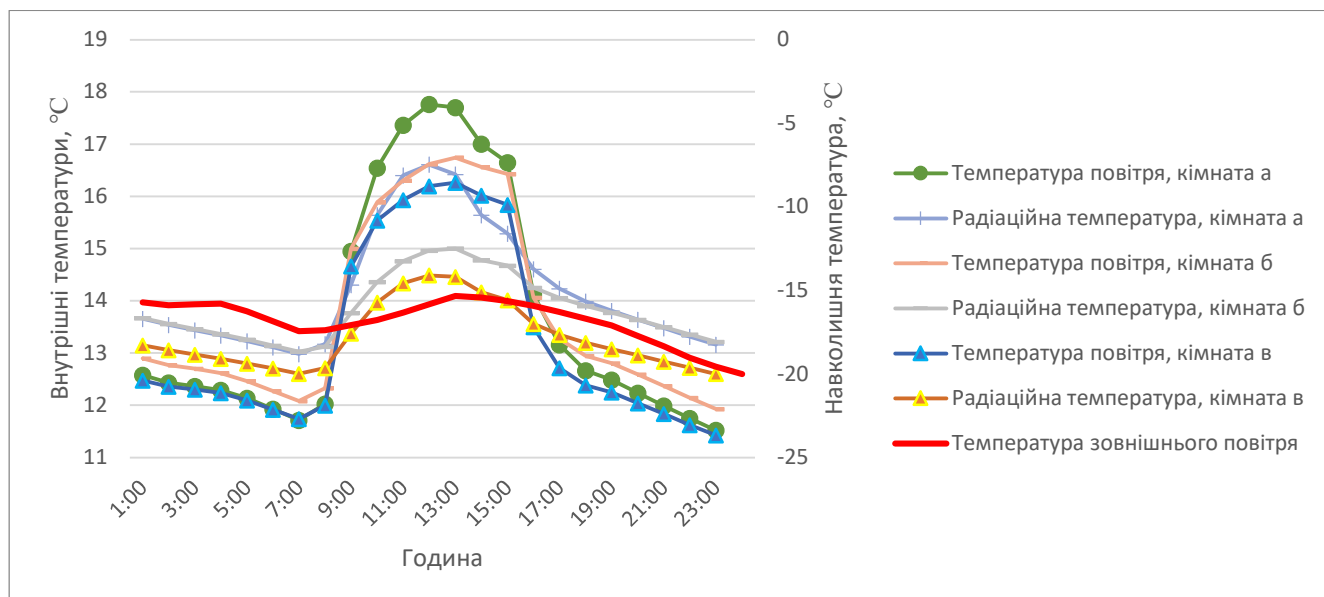


Рисунок 4.10 – Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 2 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2016, випадок з провалом в 4°C в неробочі години

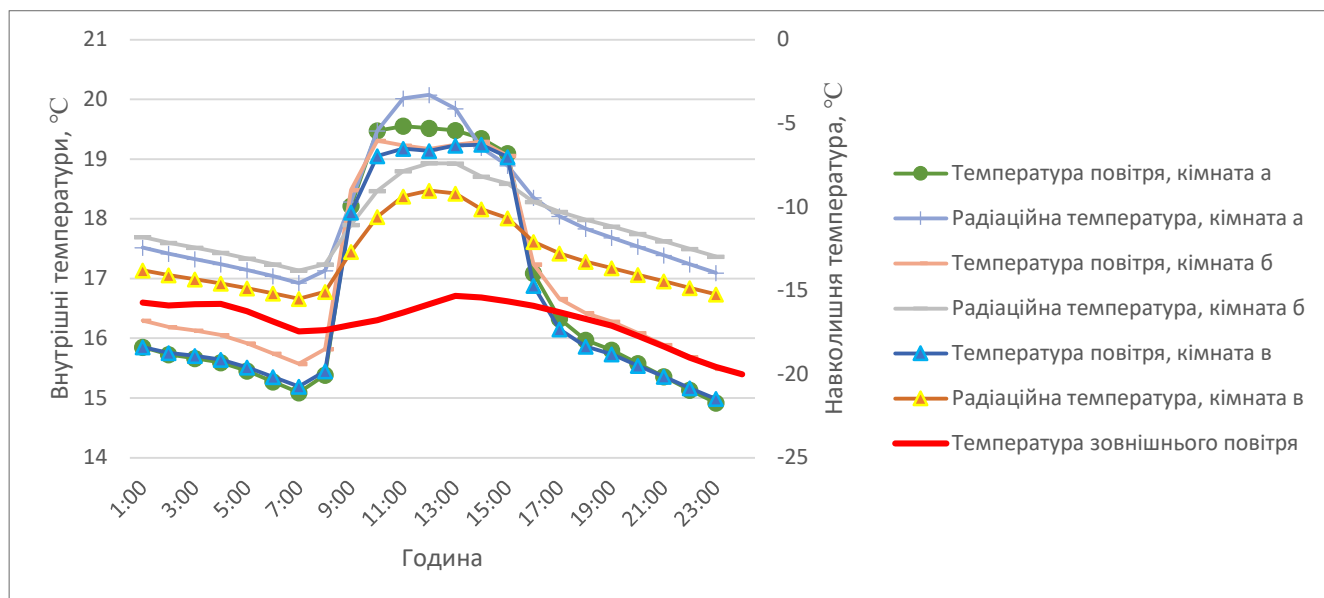


Рисунок 4.11 – Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 2 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021, випадок з постійним опаленням.

Графік опалення з провалами в неробочі години та дні дозволяє значно покращити комфортність перебування в усіх досліджуваних приміщеннях, проте температура повітря та середня радіаційна температура для всіх приміщень з 8 до 11 та з 15 по 16 не є задовільними (температури в цей період коливаються в діапазоні 12-16,5 °C, що не є комфортними умовами).

Впровадження постійного графіку опалення покращує ситуацію. По-перше, спостерігається помітне підвищення обох параметрів для всіх приміщень, що в сумі з додатковими тепловими надходженнями в навчальний період та зростанням зовнішньої температури дозволяє досягати температури повітря в 18 °C та середньої радіаційної температури 16,9 °C для приміщення «а». Проте навіть при постійному графіку опалення, в періоди перебування людей в приміщенні температура повітря не досягає мінімальних нормативних значень.

Додатково, варто зазначити, що впровадження постійного температурного графіку призводить до збільшення споживання енергії на опалення в порівнянні з переривчастим.

Не зважаючи на незадовільні результати моделювання, спостерігається цікава закономірність: постійний графік опалення дозволяє значно підвищити середню радіаційну температуру для всіх приміщень.

Для вирішення проблеми комфортності перебування людей в приміщеннях школи в період неповної зайнятості пропонується дослідити 2 підходи:

- опалювати сусідні приміщення (Опція 1);
- впровадити додаткову ізоляцію внутрішніх стін що контактують з неопалювальними приміщеннями (Опція 2).

Опція 1 є простою в реалізації, проте значно збільшить енергоспоживання.

Опція 2, в свою чергу, є більш енергоефективним рішенням, проте вимагає значної модернізації будівлі, та буде більш актуальною за умови тривалого використання будівлі в режимі часткової зайнятості.

Враховуючи отримані вище результати, дослідження проводилось для конфігурації В, з постійним опаленням.

Для опції 2, додатково, пропонується дослідити оптимальний, з точки зору капіталовкладень, рівень ізоляції внутрішніх стін.

Метою впровадження опцій, на даному етапі, є досягнення комфортних умов в приміщеннях.

При дослідженні опції 1, для всіх приміщень сусідніх до досліджуваних (оточуючі навчальні класи), було додано нагрівальний прилад потужністю 2 кВт. Виключенням стали коридори на кожному поверсі, оскільки обрана потужність приладу не задовольнить потребу в опаленні такого великого приміщення, а більша потужність не є доцільною з точки зору енергоефективності.

Результати моделювання параметрів комфортності для опції 1 наведені на рисунку 4.12:

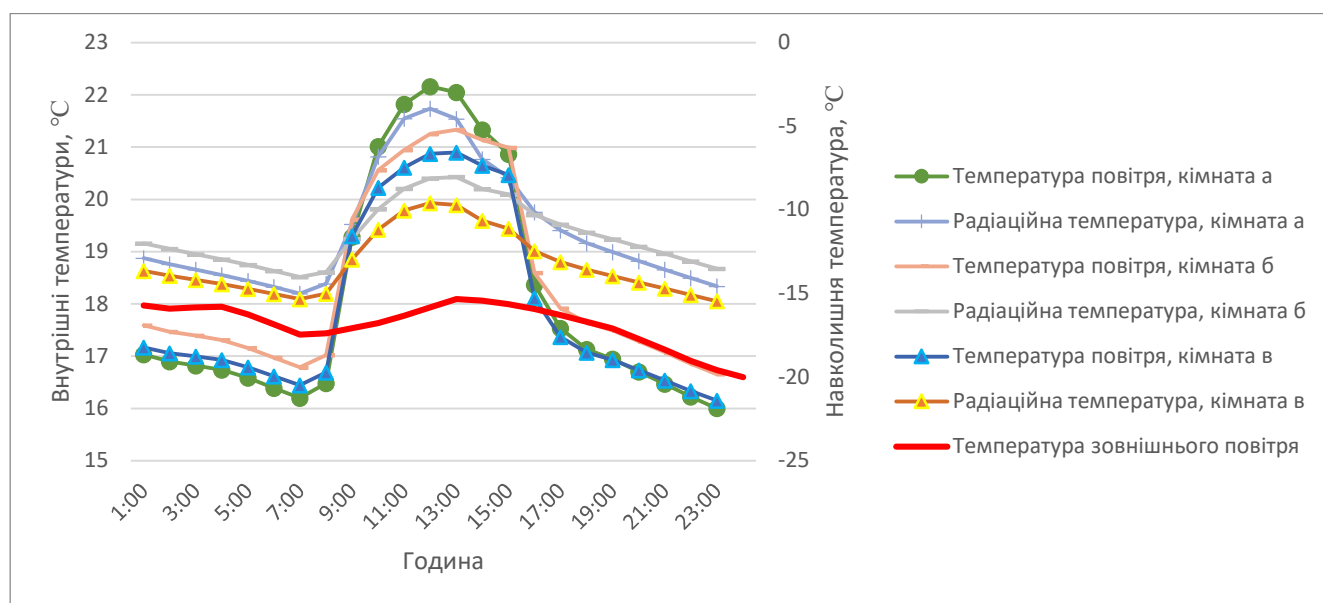


Рисунок 4.12 –Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 2 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021, випадок з постійним опаленням та опаленням судніх приміщень.

Згідно результатів моделювання, при впровадженні додаткового опалення в сусідніх кімнатах, комфортність в приміщеннях що займають учні значно

поліпшується. Температура повітря коливається в межах 16,5-22°C в навчальний період, а середня радіаційна температура – 18,6-21,7 °С, залежно від часу та приміщення (мінімум спостерігається з 8 до 9 години, що пояснюється меншою сонячною активністю, та відсутністю внутрішніх теплонадходжень). При цьому, піки як максимуму, так і мінімум найбільші в приміщенні «а», що контактує з підлогою по ґрунту.

Додатково спостерігається значне підвищення температури повітря та середньої радіаційної температури в сусідніх приміщеннях. Графічне зображення зміни температур в сусідніх до приміщення «в» кімнатах в найхолоднішу добу представлені на рисунку 4.13:

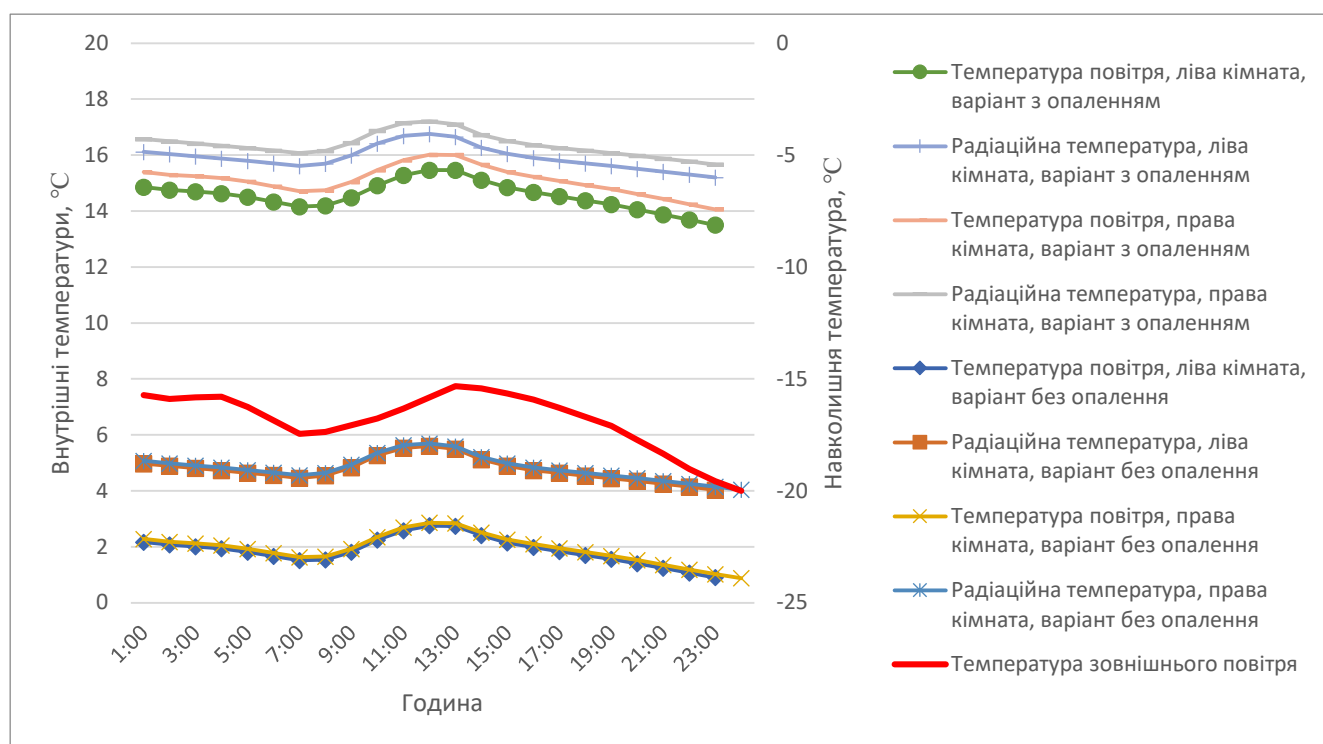


Рисунок 4.13 – Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року в сусідніх неопалювальних приміщеннях, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 2 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021, постійне опалення.

Також, спостерігається значне зростання температур з 8 до 9 години (з 15,2 до 18,1 °C за годину). Це свідчить про те, що значний внесок в комфортність перебування вносять внутрішні надходження від людей та від сонця.

В цілому, така стратегія може бути використана з певним доопрацюванням, наприклад, при більш точному розрахунку приладів опалення.

Як варіант, такий підхід може бути запропонований для часткової експлуатації приміщень в будівлі де функціонує система опалення за зміщення графіку навчання на кілька годин вперед з метою максимізації сонячних теплонадходжень в години навчання.

4.4 Дослідження технічних модернізацій приміщень для досягнення комфортних умов перебування в умовах неповної зайнятості

З метою більш ретельного аналізу також було розглянуто опцію 1.1, яка є модифікацією опції 1 з наступними змінами: потужність опалювальних приладів в досліджуваних приміщеннях 3 кВт, в сусідніх приміщеннях 1 кВт. Така модифікація має збільшити комфортність в приміщенні в ранні години навчального процесу, а також через зменшення загальної потужності опалення дозволить заощадити енергію на опалення в порівнянні з опцією 1.

Оскільки потужність системи опалення була збільшена, для компенсації відносно низької середньої радіаційної температури на суб'єктивний параметр комфортності, температура на термостатах також була підвищена до 24 °C для можливого підвищення температури внутрішнього повітря, якщо опалювальні прилади зможуть задовольнити налаштування.

Результати моделювання наведені на рисунку 4.14:

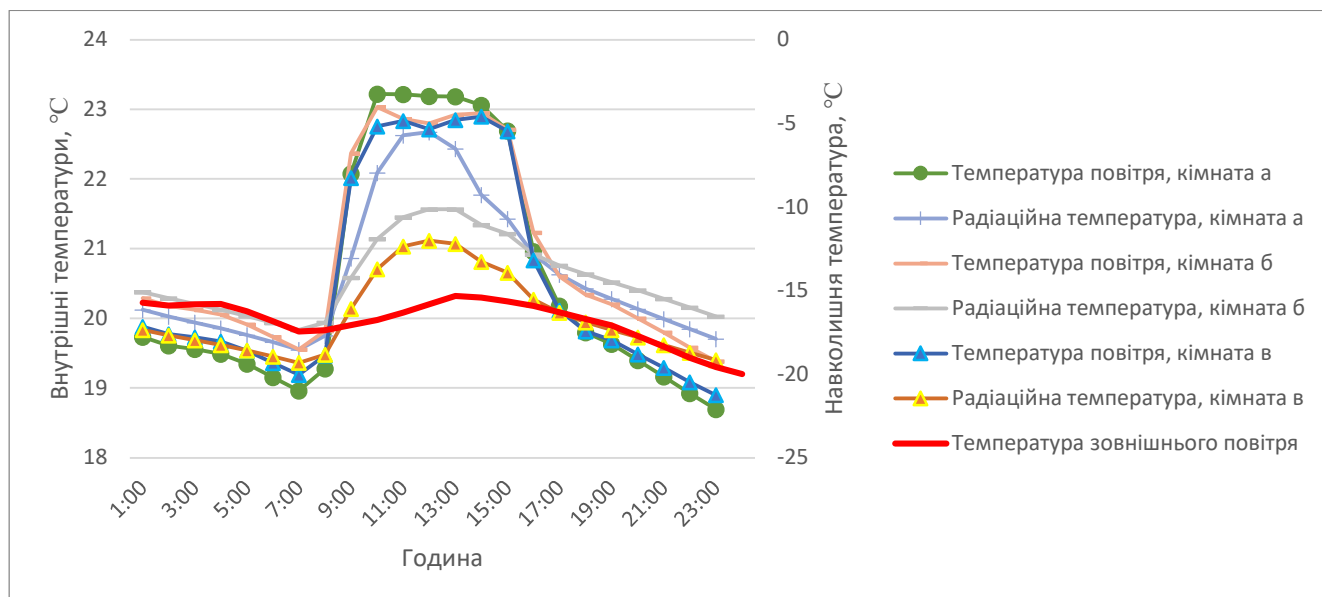


Рисунок 4.14 –Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 3 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021, випадок з постійним опаленням та опаленням судніх приміщень.

Як видно з рисунку 4.11, опція 1.1 дозволяє забезпечити комфортні умови в приміщеннях під час навчання.

Згідно з результатів моделювання в переважну більшість робочих годин температура повітря та середня радіаційна температура перебувають на рівні 19,3-23,22 °C, переважну частину навчальних годин можна вважати такими, що можуть забезпечити комфортними умовами учнів, проте, з 8:00 до 9:00 (які за припущенням та вхідними даними моделі є робочими), спостерігається рівень температури, що не відповідають мініимальному комфортному параметру PVM (параметр становить близько -0,63), що, в свою чергу, комфортними умовами не є. Такі зміни в температурах можна пояснити низькою сонячною активністю. Не зважаючи на це, режим, з точки зору комфортності, рекомендувати можна. Для запобігання нижчого рівня комфортності в початкові години навчання, пропонується змістити розклад уроків на 1 годину.

За рахунок високої температури внутрішнього повітря та часткового опалення в сусідніх приміщеннях, в розглянутому випадку значно вирізняється середня радіаційна температура, особливо в приміщенні «а».

Оскільки опція 1.1 дозволяє досягти комфортних умов для будівлі ізольованої до рівня ДБН В.2.6-31:2021, аналогічний аналіз було проведено й для ДБН В.2.6-31:2016, результати аналізу наведені на рисунку 4.15:

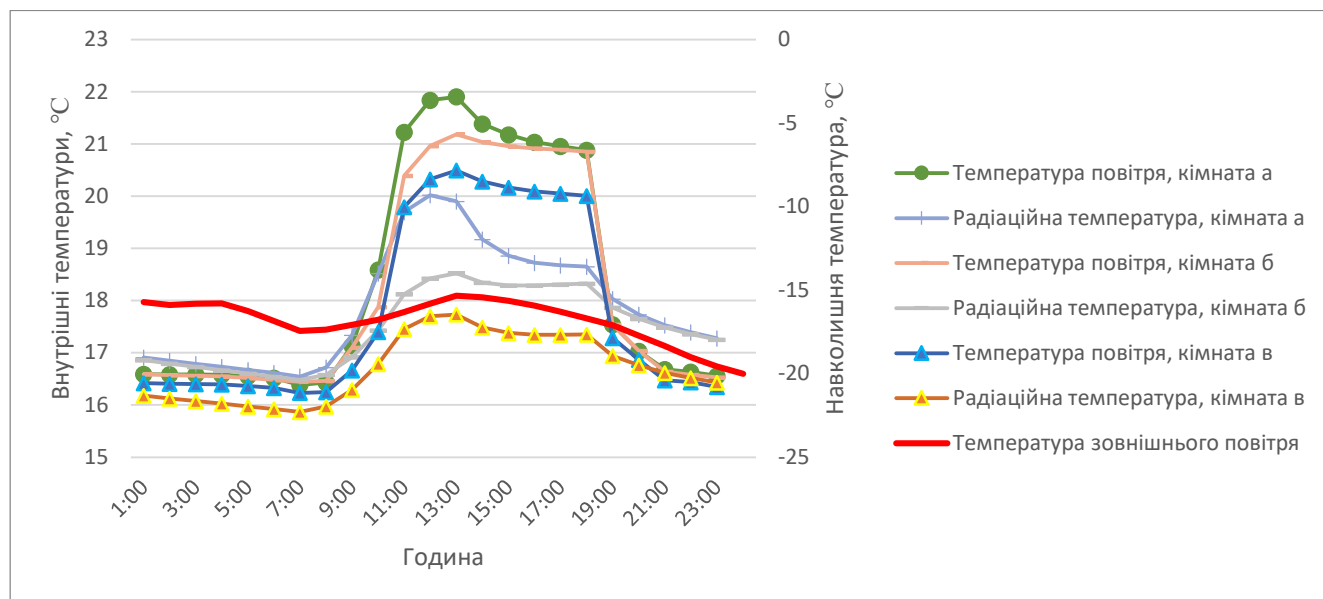


Рисунок 4.15 –Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 3 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2016, з постійним опаленням та опаленням судніх приміщень.

Моделювання показує, що в робочі години температура повітря та середня радіаційна температура не забезпечують параметр PVM на рівні, що відповідає мінімальному (в найкращому випадку, о 13 в приміщенні «б» параметр становить близько -0,6), що, в свою чергу, комфортними умовами не є.

Таким чином, опцію 1.1 для будівель, ізоляція яких не відповідає сучасним вимогам, рекомендувати не можна.

Пониження рівня ізоляції до ДБН В.2.6-31:2016 значно понизило комфортність перебування в приміщеннях, найбільша різниця спостерігається на початку навчальних годин. Температури в години з 8 по 10 перестають відповідати комфортним умовам, пониження температури внутрішнього повітря відносно випадку ізоляції огорожувальних конструкцій до рівня ДБН В.2.6-31:2021, в ці години становить 2,8-5,35 °С. Найбільша різниця спостерігається в приміщенні «в», це пояснюється контактом з дахом, термічні характеристики якого відчутно погіршуються при переході від нормативу 2021 року до 2016.

Також, спостерігається значне пониження середньої радіаційної температури в приміщенні «в», пікові значення досягають лише 17,7 °С (в випадку ДБН В.2.6-31:2021 - 21,11 °С).

Такі результати свідчать про неостатню потужність системи опалення.

Згідно з результатами, представленими на рисунках 4.11 та 4.12 можна припустити, що потужності обрані в випадку дослідження ДБН В.2.6-31:2021 є оптимальними.

Також, в порівнянні з опцією 1, опція 1.1 показала значно кращі результати з точки зору комфортності, не зважаючи на меншу сумарну потужність опалювальних приладів (18 кВт в опції 1 та 15 кВт в опції 1.1). Це дозволяє зробити висновок, що більш доцільним є підвищення потужності опалювальних приладів в приміщеннях, що експлуатуються, така модернізація не лише дозволяє забезпечувати більш високу температуру зовнішнього повітря, але й в більшій мірі впливає на середню радіаційну температуру.

Виходячи з отриманих вище результатів, вважається можливим надати рекомендації по мінімальному рівню опалення в приміщеннях в умовах неповної зайнятості. Узагальнити рекомендації, пропонується використавши підхід найгіршого випадку.

З цією метою, була розроблена теоретична модель будівлі з наступними модифікаціями:

сонячні теплонадходження в погодному файлі були обнулені – це дозволить узагальнити рекомендації для всіх сторін світу;

коефіцієнт скління збільшено до 30% – такий нетипово високий показник дозволить узагальнити рекомендації для більшості архітектурних рішень;

теплонадходження від людей та електроприладів не враховуються в тепловому балансі будівлі;

предметом дослідження буде приміщення «в», оскільки саме приміщення під дахом показує найгірші значення параметру комфортності серед досліджуваних.

Результати моделювань було зведено до таблиці 4.2:

Таблиця 4.2 – Рекомендоване питоме опалення за якого в робочі години будуть дотримуватись комфортні умови за параметром PMV

Рівень теплового захисту	Рекомендована потужність опалювальних приладів, Вт/м ²	Рекомендована потужність опалювальних приладів, Вт/м ³	Розрахункова потужність опалення, кВт	Мінімальний параметр PMV в робочі години найхолоднішого дня досліджуваного року
ДБН В.2.6-31:2021	79	22,57	3,54	-0,49
ДБН В.2.6-31:2016	84	24	3,76	-0,49
Існуючий стан	116	33,14	5,20	-0,49

Значне підвищення необхідної потужності в випадку ізоляції на рівні існуючої будівлі викликано низькими показниками середньої радіаційної температури та необхідністю компенсувати ці показники підвищенням температури повітря.

Дані рекомендації також можна застосувати при режимах опалення з провалами, за умови графіку опалення, що буде враховувати інерційність будівлі, шляхом завчасного ввімкнення опалення на повну потужність (1-2 години до початку навчання).

З метою дослідження опції 2 до внутрішніх стін, що контактують з сусідніми приміщеннями було додано ізоляцію аналогічну до вимог до зовнішніх стін, що поступово понижувалась для визначення оптимального рівня. Необхідність визначення оптимального рівня ізоляції пояснюється як фінансовою доцільністю, так і можливістю заощадити внутрішні площі приміщень.

Для дослідження впливу ізоляції внутрішніх стін, що контактують з неопалювальними приміщеннями на комфортність перебування людей в приміщеннях та енергоспоживання при частковому використанні будівлі школи, було просимульовано описану вище конфігурацію з поступовим додаванням ізоляції, а саме мінеральної вати (крок збільшення шару ізоляції між моделями становив 2см).

Досліджувані рівні ізолюваності внутрішніх стін та їх теплофізичні характеристики зведені до таблиці 4.3:

Таблиця 4.3 – Запропоновані рівні ізоляції внутрішніх стін та відповідні теплофізичні характеристики досліджуваних стін

Товщина ізоляції, см	Коефіцієнт теплопровідності стіни, Вт/м ² К	Додаткова інформація
0	2,317	Відповідає поточному стану внутрішніх стін
2	1,013	
4	0,648	
6	0,477	
8	0,377	
10	0,304	Відповідає ДБН В.2.6-31:2016
12,8	0,25	Відповідає ДБН В.2.6-31:2021

За результатами моделювань були побудовані графіки залежності мінімального значення температури внутрішнього повітря, та середньої радіаційної температури в приміщеннях від шару ізоляції внутрішніх стін в період експлуатації найхолоднішої доби досліджуваного року (рис. 4.16 та 4.17).

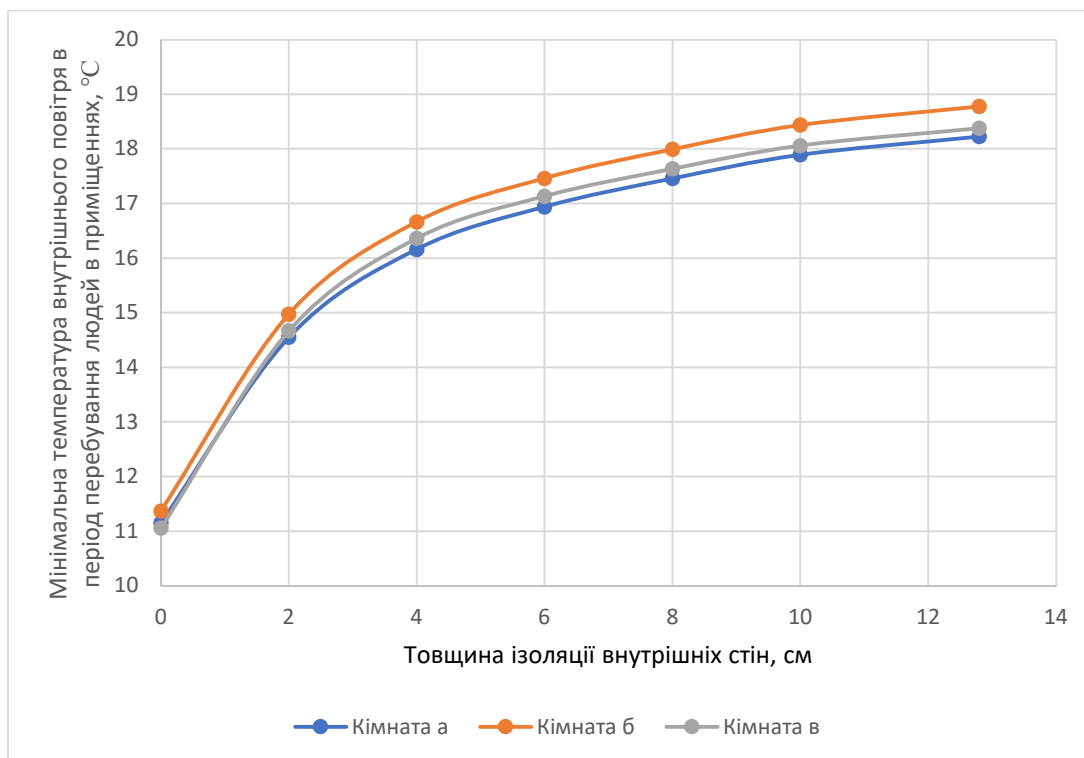


Рисунок 4.16 – Залежність температури внутрішнього повітря для найхолоднішої доби року від товщини ізоляції внутрішніх стін, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 2 кВт в кожному приміщенні та огороджувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021, постійне опалення.

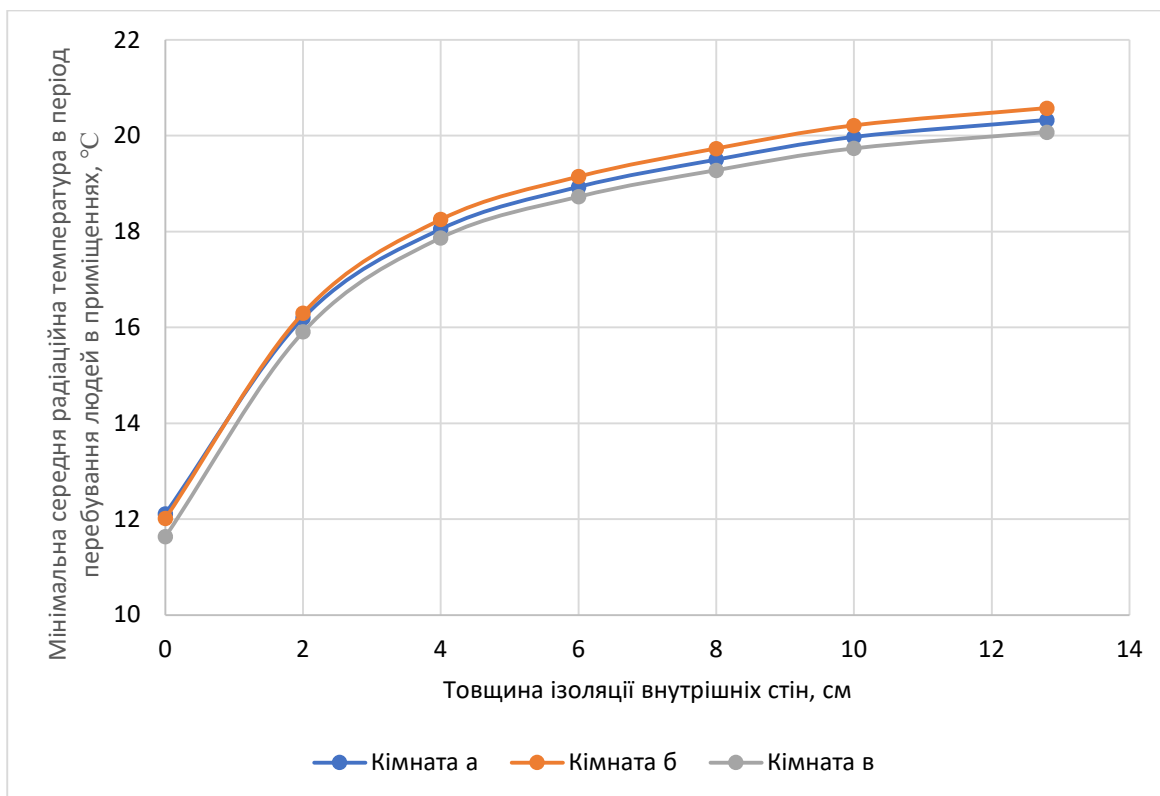


Рисунок 4.17 – Залежність середньої радіаційної температури для найхолоднішої доби року від товщини ізоляції внутрішніх стін, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 2 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021, постійне опалення.

Аналіз рисунків 4.16 та 4.17 показує, що підвищення комфортності при додаванні ізоляції до внутрішніх стін не є лінійним, та перші 2 см доданої ізоляції підвищують мінімальну температуру повітря та середню радіаційну температуру в період перебування людей в приміщенні майже на 4 °C.

Обидві залежності мають вигляд насичувальної кривої, така залежність пояснюється термостатом встановленим на 20 °C.

За результатами моделювання середньої радіаційної температури, оптимальним шаром ізоляції внутрішньої стіни можна вважати 4 см, оскільки температура в 18 °C є досить комфортною. В промодельованому варіанті, внутрішня стіна з шаром ізоляції 4см має коефіцієнт теплової провідності стіни становить 0,648 Вт/м²К.

Якщо опиратись на показники температури внутрішнього повітря в найхолоднішу добу року, оптимальним шаром можна вважати ізоляцію в 10 см, що за теплофізичними показниками відповідає мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2016.

Оскільки як мінімальна температура внутрішнього повітря, так і середня радіаційна температура спостерігається в першу годину перебування людей в приміщенні, зміщення графіку навчання дозволить зменшити оптимальний рекомендований рівень ізоляції стін з точки зору загальної термічної комфортності перебування. Це дозволить оптимізувати графік навчання, збільшивши сонячні теплонадходження в години перебування людей в приміщеннях, а також, розмістити графік навчання в більш теплі години дня.

Наприклад, зміщення графіку навчання на 2 години (початок навчання в такому випадку буде о 10-тій ранку), дозволить забезпечити комфортні умови на протязі всього навчального процесу вже при шарі ізоляції на внутрішній стіні в 2 см, що відповідає теплопровідності $1,013 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Виходячи з розглянутих погодинних графіків температур, можна зазначити важливість впливу сонячних та внутрішніх теплонадходжень від людей та обладнання в умовах обмеженої потужності опалювальних приладів. Це демонструється помітним зростанням температур з 8 по 10 години ранку, цей період саме характеризується появою людей та посиленням сонячної активності.

Додатково, було розглянуто вплив додання ізоляції на всі внутрішні стіни досліджуваних приміщень на енергоефективність. Результати моделювання наведені в вигляді залежності між товщиною ізоляції та споживанням енергії на опалення трьома приміщеннями на рисунку 4.18:

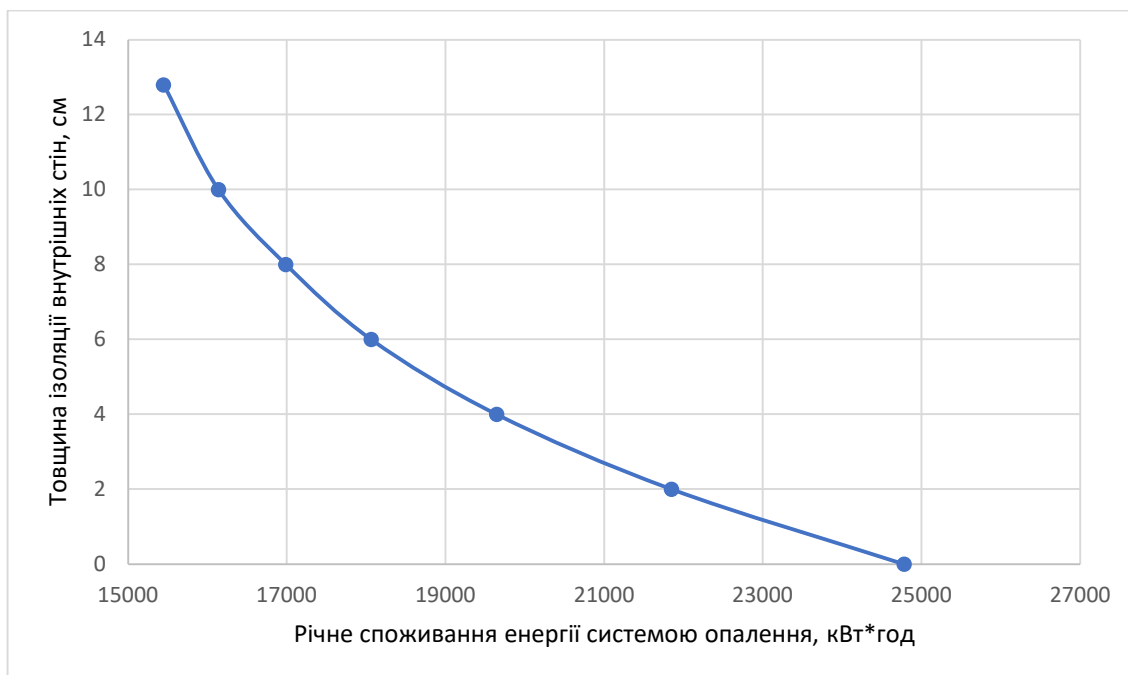


Рисунок 4.18 – Залежність енергоспоживання на опалення від товщини ізоляції внутрішніх стін, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 2 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021, постійне опалення.

Очікувано, додаткова ізоляція також значно впливає на енергоспоживання. З додаванням ізоляції до 6 см стрімко знижується споживання енергії на опалення (2 см - -11,8%, 4 см - -20,7%, 6 см - -27,1% відносно варіанту без ізоляції), сповільнюючись до приблизно 3% за 2 см додаткової ізоляції після.

Комбінація переваг в вигляді підвищення комфортності та значному зниженні енергоспоживання дозволяє рекомендувати додаткову ізоляцію внутрішніх стін (мінімум 4 см) перед опціями 1 та 1.1 розглянутими вище.

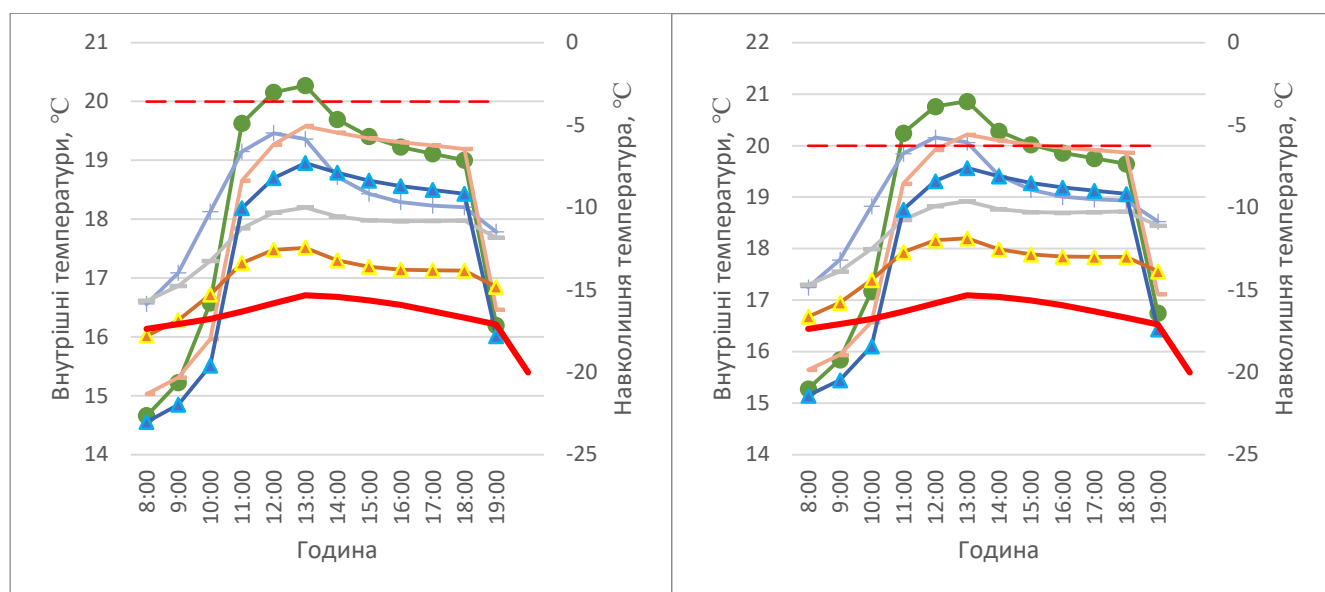
Також, варто зазначити, що додаткова ізоляція внутрішніх стін позитивно впливає на зниження акустики між приміщеннями, що буде перевагою й в умовах нормальної експлуатації будівлі.

4.5 Дослідження можливості використання поведінкових особливостей в будівлі для досягнення комфортних умов перебування в приміщеннях за умови неповної зайнятості

Оскільки ізоляція внутрішніх стін дозволяє значно покращити комфортність в приміщеннях за умови постійного опалення, з метою дослідження можливої додаткової економії також було запропоновано ввести переривчасті графіки опалення, а саме провал в 4 °С в неробочі години.

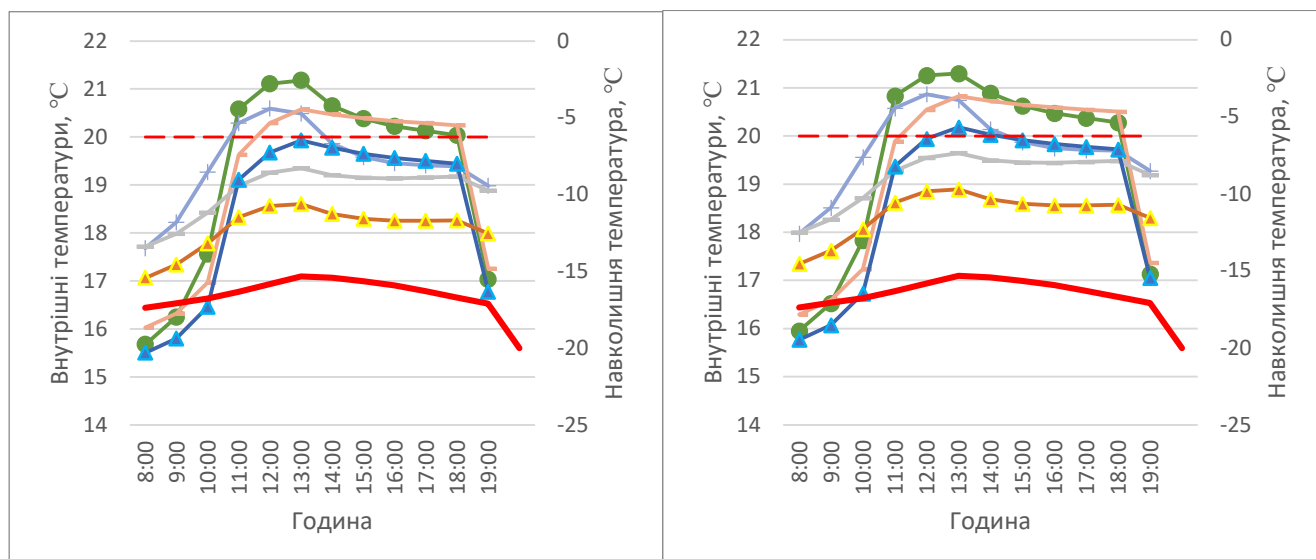
Застосуючи висновки вище, дослідження проводилось на будівлі з утепленими внутрішніми стінами з мінімальним шаром ізоляції 4 см, а також графік шкільного розкладу був зміщений на 2 години (тобто навчання починається з 10-тої години ранку, та триває до 18.00). Опалення пропонується включати з 9-тої години ранку, для підвищення комфортності перебування в приміщеннях в перші години навчання.

Результати моделювання внутрішньої температури повітря та середньої радіаційної температури в приміщеннях з описаними вище покращеннями для випадків ізоляції внутрішніх стін мінеральною ватою 4-12,5 см наведені на рисунку 4.19:



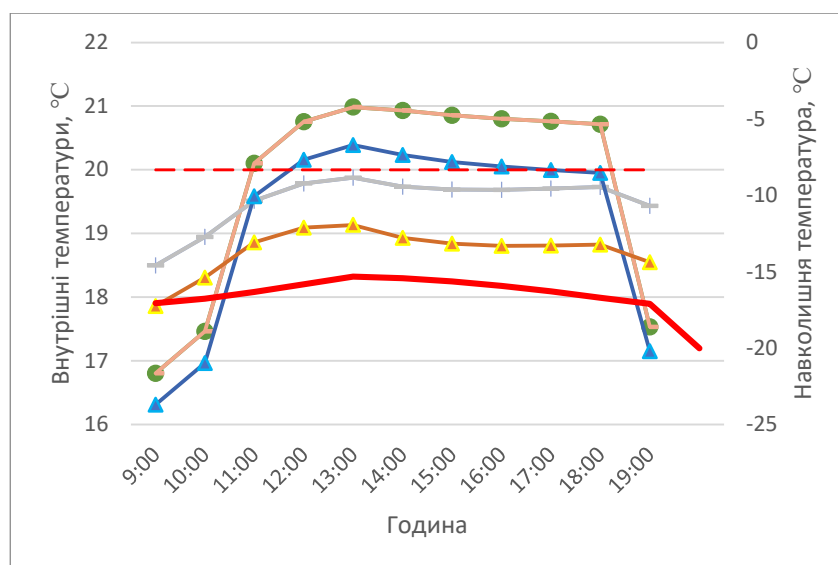
а)

б)



в)

г)



д)

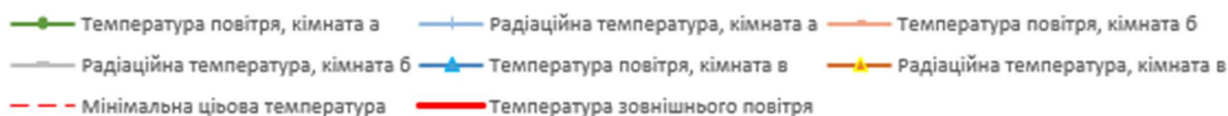


Рисунок 4.19 – Середня радіаційна температура та температура внутрішнього повітря в навчальний період для найхолоднішої доби року, випадок будівлі з індивідуальними опалювальними приладами потужністю 2 кВт в кожному приміщенні та огорожувальними конструкціями, що відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021, випадок переривчастого опалення: а) мінеральна вата 4 см; б) мінеральна вата 6 см; в) мінеральна вата 8 см; г) мінеральна вата 10 см; д) мінеральна вата 12,5 см.

Згідно з результатами моделювання, введення графіків переривчастого опалення при частковому використанні будівлі можливе за умови утеплення внутрішніх стін.

Для всіх варіантів утеплення, найменші температури внутрішнього повітря та середньої радіаційної температури спостерігається для приміщення «в» (приміщення, що знаходиться на третьому поверсі, контактує з дахом).

Випадок будівлі, з ізоляцією внутрішніх стін на рівні 4 см, характеризується низькими показниками обох досліджуваних температур, що в найгіршому випадку (приміщення «в») коливаються на рівні 17-19 °С, що відповідає параметру PVM -1,04--0,98. Виходячи з аналізу, рекомендувати даний варіант експлуатації будівлі не можна з міркування комфортності.

Додавання 6 см ізоляції до внутрішніх стін дозволяє підвищити обидві температури на 1-1,5 °С в порівнянні з випадком додавання 4 см ізоляції. Параметр PMV коливається в діапазоні -0,89--0,83, покращуючи комфортність приблизно на 15%.

Додавання 8 см ізоляції до внутрішніх стін дозволяє підвищити обидві температури на ще на 0,5-1 °С. Параметр PMV коливається в діапазоні -0,72--0,66, покращуючи комфортність приблизно на 19% відносно попереднього варіанту.

Випадок будівлі з утепленими внутрішніми стінами 10 см (відповідає мінімальному рівню ізоляції ДБН 2016) встановлює температуру внутрішнього повітря на рівні 20 °С та середню радіаційну температуру на рівні 18,5 °С (для найгіршого випадку приміщення «в»). Виходячи з вимог до параметрів об'єктивної комфортності перебування в приміщеннях (параметр PMV -0,68), даний режим експлуатації вважати комфортним не можна (параметр нижчий за -0,5), проте, рівень температури внутрішнього повітря відповідає вимогам до мікроклімату в Україні.

Ізоляція внутрішніх стін на рівні ДБН 2021 (12,5 см мінеральної вати) дозволяє досягти параметру PMV -0,62 для найгіршого випадку (приміщення «в») та -0,5 для найкращого випадку (приміщення «б»).

З урахуванням отриманих результатів, досягти комфортних умов перебування в приміщеннях за умови модернізації будівлі та графіку експлуатації можливо.

Також, варто зазначити, що аналіз проводився для найхолоднішої доби навчального періоду. Не зважаючи на це, певні рівні ізоляції, демонстрували значення параметру PMV близькі до мінімально допустимих, а для випадку з 12,5 см мінеральної вати на внутрішніх стінах приміщень для приміщення «б» було досягнуто комфортних умов. Комфортні умови за українськими нормативами до мікроклімату досягаються вже при 10 см.

В усіх випадках спостерігається нестача потужності приладів опалення, оскільки в жодному випадку не було досягнуто проєктної температури навколишнього середовища для кліматичних зон України [99].

Варто зазначити, що вимоги до комфортних умов в приміщеннях відповідно до [88] є досить строгими, та відповідна експлуатація будівлі з дотриманням українських стандартів комфортності дозволить розширити діапазон температур зовнішнього повітря.

В години підвищеної сонячної активності (з 10 до 15) параметри комфортності зростають, що дозволяє поліпшити комфортність.

Зважаючи на вище сказане, пропонується враховувати наступне при впровадженні часткової експлуатації будівлі:

- огорожувальні конструкції будівлі відповідають мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021;
- забезпечення постійного графіку опалення;
- шкільний розклад занять оптимізований для забезпечення навчального процесу в період найвищої сонячної активності (з 10 до 18). Перевагу варто віддавати приміщенням орієнтованим на схід;
- приміщення пройшли відповідну підготовку, яка полягає в збільшенні потужності опалювальних приладів та підвищення температури на термостатах в навчальний період до 24 °C для компенсації низького рівня

середньої радіаційної температури, або утеплення внутрішніх стін приміщень;

- в залежності від рівня покращень описаних вище, виключити експлуатацію будівлі в найхолодніші дні опалювального періоду.

4.6 Енергоспоживання будівлі в умовах неповної зайнятості з урахуванням забезпечення комфортних умов перебування в приміщеннях

Фінальним кроком в дослідженні стало порівняння всіх описаних вище з точки зору енергоефективності запропонованих заходів з підвищення теплового комфорту. Для цього споживання енергії на опалення всіх підходів, що задовольняють умовам теплового комфорту, було зведено на графіках, які представлені на рисунках 4.20 та 4.21:

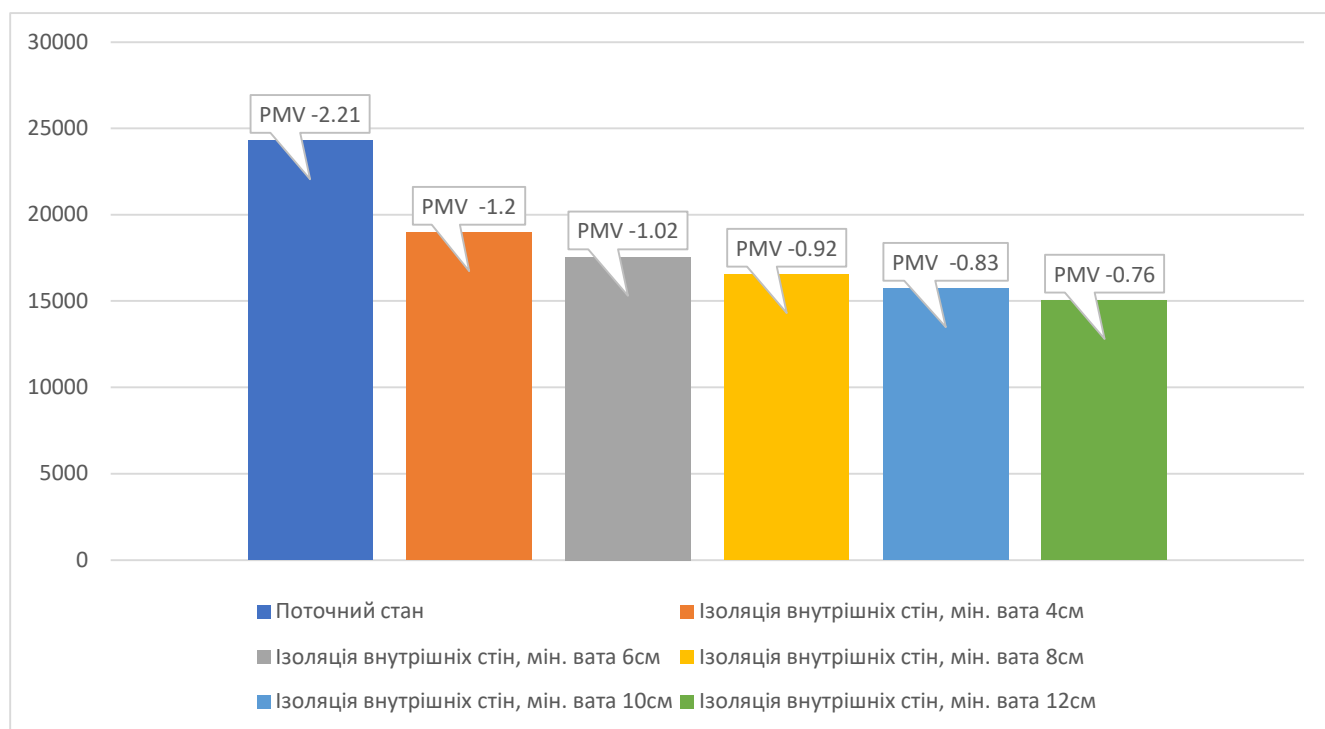


Рисунок 4.20 – Річне споживання енергії на опалення розглянутих опцій ізоляції внутрішніх стін та найгірший параметр PMV досягнутий в години перебування людей в приміщеннях

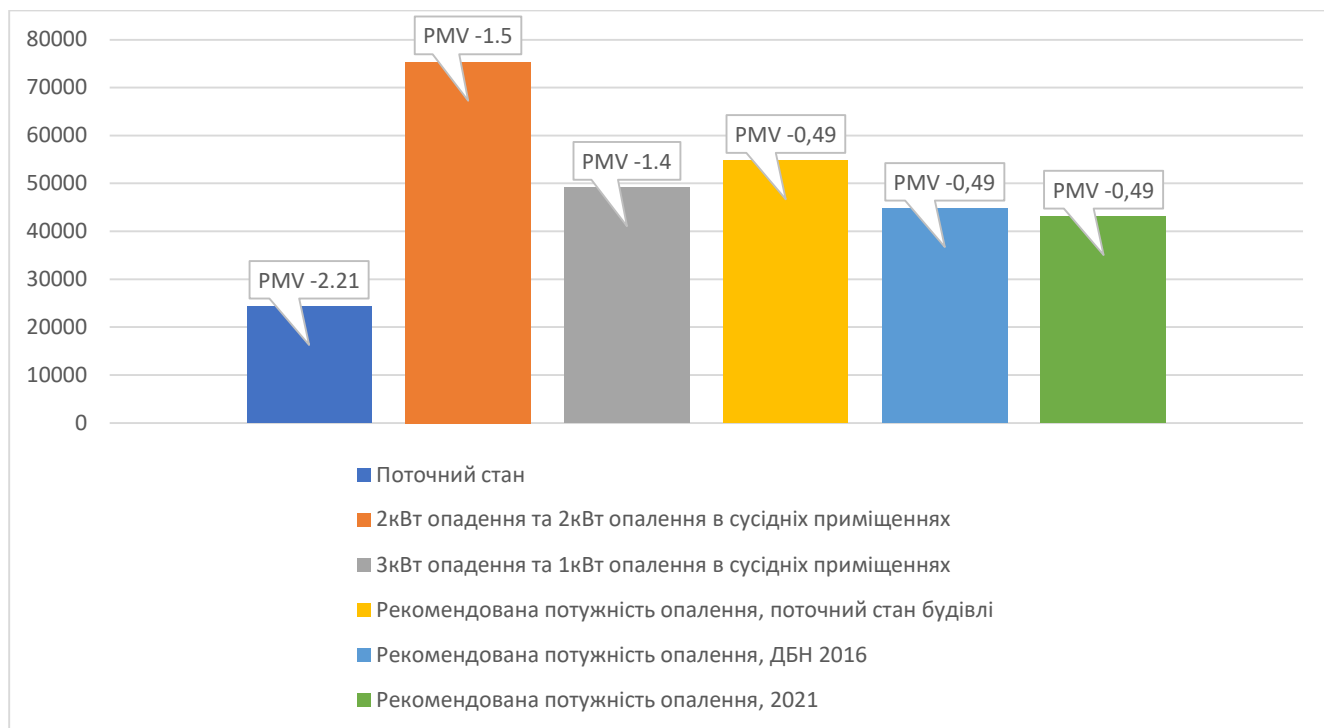


Рисунок 4.21 – Річне споживання енергії на опалення розглянутих опцій зміни системи опалення та найгірший параметр PMV досягнутий в години перебування людей в приміщеннях

Аналіз рисунку 4.20 показує, що додавання ізоляції на внутрішні стіни відчутно покращує як параметр комфортності PMV, так і річне споживання енергії на опалення. Варто зазначити, що в жодному варіанті утеплення нормативного значення PMV для всього періоду опалення досягнуто не було. Аналіз даних за період опалення, показує, що починаючи з 8 см мінеральної вати більшість робочих годин пропонують достатньо комфортні умови. Запропоновано, в таких випадках, або встановлення додаткових приладів опалення, або не експлуатувати будівлі в найхолодніші дні опалювального періоду.

Аналіз споживання енергії приміщеннями при додатковому утепленні внутрішніх стін показує, що перші 4 см додаткової ізоляції дозволяють скоротити енергоспоживання на 21,9%, надалі, відносна ефективність доданого утеплювача знижується, складаючи від 6% до 3% додаткової економії на кожні 2 см.

З рисунку 4.21 видно, що варіації з опаленням сусідніх приміщень рекомендувати не можна, оскільки спостерігається значне зростання споживання енергії, при цьому, комфортні умови досягнуто не було.

Опції ж, з оптимальною системою опалення, споживають менше енергії на опалення (порівняння стовпчиків 2 та 3 з стовпчиком 6), за опції з опаленням сусідніх приміщень, та пропонують комфортні умови на протязі всього опалювального періоду.

Висновки до розділу 4

В даному розділі було проведено детальний аналіз можливості експлуатації частини приміщень будівлі в умовах неповної зайнятості. Було обрано кластер з п'яти приміщень та розглянуто ряд конфігурацій для експлуатації трьох з них.

Серед розглянутих конфігурацій, а саме:

- без контакту з дахом та підлогою (горизонтальне розміщення);
- контакт з однією внутрішньою неопалювальною стіною та підлогою;
- без контакту з внутрішніми неопалювальними стінами (вертикальне розміщення);
- контакт з однією внутрішньою неопалювальною стіною та дахом;

найефективнішим є вертикальне розміщення, як з точки зору енергоспоживання, так і з точки зору комфортності перебування в приміщенні за параметром PMV. Вертикальне розміщення продемонструвало 8,5% нижче споживання енергії у порівнянні з найближчим конкурентом і на 22,3% кращий показник за горизонтальне. Даний результат пояснюється мінімізацією площі контакту з неопалювальними приміщеннями.

Аналіз комфортності перебування в приміщеннях та розрахункової потужності системи опалення показав неможливість застосування даного підходу до експлуатації будівлі без попередньої модернізації, як для неутеплених будівель, так і для будівель, що відповідають сучасним вимогам.

З використанням графіку постійного опалення було запропоновано ряд покращень з метою досягнення комфортності перебування в приміщеннях в умовах неповної зайнятості, які стосувались ізоляції внутрішніх стін, опаленні сусідніх приміщень та підвищення потужності системи опалення.

Додаткова ізоляція внутрішніх стін позитивно впливає як на параметри комфортності, так і на енергоспоживання. Варто зазначити, що навіть утеплення внутрішніх стін до рівня мінімальних нормативних вимог для зовнішніх огорожувальних конструкцій не гарантує дотримання комфортних умов в приміщеннях з точки зору температур. Це можна пояснити тим, що система опалення, яка розрахована на нормальну експлуатацію будівлі не може задовільнити додаткові втрати в приміщенні за умови неповної зайнятості.

Починаючи з ізоляції на рівні 8 см мінеральної вати, більшість часу опалювального періоду параметр PMV відповідає нормативному. В такому випадку, в разі використання приміщень, пропонується не експлуатувати будівлю в найхолодніші дні опалювального періоду, або збільшити потужність опалення.

Аналіз споживання енергії приміщеннями при додатковому утепленні внутрішніх стін показує, що перші 4 см додаткової ізоляції дозволяють скоротити енергоспоживання на 21,9%, а утеплення до рівня зовнішніх стін, що відповідають мінімальним вимогам ДБН 2.6-31 2021 дозволяє знизити енергоспоживання на 38,1%.

Захід з утеплення внутрішніх стін є складним в реалізації, проте набуває додаткової актуальності в разі використання більшого кластеру приміщень, наприклад при експлуатації половини будівлі.

Впровадження опалення в сусідніх приміщеннях, як захід, є недоцільним. В обох розглянутих випадках це значно збільшило споживання енергії (на 100-200%) і не дозволило досягнути комфортних умов в приміщеннях.

Оптимізація потужності системи опалення, з точки зору комфортності, є найбільш привабливим заходом. Для дотримання комфортних умов потребується збільшення системи опалення в 1,8 рази в випадку будівлі, що відповідає ДБН 2.6-31 2021. За такого підходу, енергоспоживання зростає на 77%, проте, на

протязі всього опалювального періоду гарантовано будуть забезпечені комфортні умови. Варто зазначити, що з точки зору легкості впровадження, даний захід є простішим за ізоляцію внутрішніх стін.

Також, в процесі дослідження даного питання було сформовано ряд рекомендацій щодо оптимального впровадження режиму неповної зайнятості, а саме:

- огорожувальні конструкції будівлі мають відповідати мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021;
- забезпечити постійного графіку опалення;
- шкільний розклад занять оптимізований для забезпечення навчального процесу в період найвищої сонячної активності (з 10 до 18). Перевагу варто віддавати приміщенням орієнтованим на схід;
- приміщення пройшли відповідну підготовку, яка полягає в збільшенні потужності опалювальних приладів та підвищення температури на термостатах в навчальний період до 24 °C для компенсації низького рівня середньої радіаційної температури, або утеплення внутрішніх стін приміщень;
- в залежності від рівня покращень описаних вище, виключити експлуатацію будівлі в найхолодніші дні опалювального періоду.

ВИСНОВКИ

Дана дисертація присвячена вивченню впливу поведінково-експлуатаційних факторів на рівень енергоефективності будівлі за допомогою динамічного моделювання. Значна увага приділяється аналізу використання будівлі в режимі неповної зайнятості, що набуває додаткової актуальності в умовах війни та руйнування енергетичної інфраструктури України.

Дослідження проводились за допомогою динамічного моделювання в програмі DesignBuilder, з урахуванням таких параметрів як: характеристики огорожувальних конструкцій, повітрообміну в приміщеннях, кліматологія з міжнародної бази даних IWEC 2, теплонадходження від систем освітлення, електричних приладів та людей, а також графіки експлуатації будівлі.

Отримані результати узагальнені для трьох типів будівель шкіл: будівлі, що не проходили термомодернізацію; будівлі що проходили термомодернізацію з 2017 до 2022 року; будівлі що пройшли сучасну термомодернізацію. У процесі виконання роботи отримано наступні результати:

1. Показано за допомогою динамічного моделювання, що підвищення теплоізоляції будівлі до мінімальних вимог ДБН 2.6-31 2016 дозволить знизити споживання енергії на опалення на 48.9%, а до вимог ДБН 2.6-31 2021 – на 55%;
2. використання режиму опалення з провалом в 4 °C в неробочі години дозволяє заощадити від 23% до 27% енергії на опалення, в залежності від рівня теплового захисту будівлі;
3. режим опалення з провалами в 4 °C, що базується на розкладі занять є на 1,8–4,2% більш енергоефективним за режим з опалення з провалом в 4 °C в неробочі години, а також знижує навантаження на систему опалення на 3,3–3,7%;
4. встановлено, що впровадження режиму опалення відповідно до розкладу занять не призводить до значного зниження комфортності умов перебування в приміщеннях;

5. проведено аналіз оптимального розміщення приміщень в умовах неповної зайнятості. Вертикальне розміщення приміщень, що експлуатуються на 22,3% більш ефективне за горизонтальне
6. проведено аналіз можливості експлуатації будівлі школи в умовах неповної зайнятості. виявлено, що експлуатація будівель школи в умовах неповної зайнятості без попередньої модернізації будівлі неможливе з точки зору комфортності перебування в приміщеннях;
7. надані рекомендації щодо мінімальної питомої потужності системи опалення при впровадженні режиму неповної зайнятості в школах для будівель з різним рівнем теплового захисту: для неутепленої будівлі – 33,14 Вт/м³; для будівлі з огорожувальними конструкціями, що відповідають ДБН В2.6-31 2016 – 24 Вт/м³; для будівлі з огорожувальними конструкціями, що відповідають ДБН В2.6-31 2021 – 22,57 Вт/м³;
8. запропоновано ряд рекомендацій щодо оптимального впровадження режиму неповної зайнятості, вимоги до огорожувальних конструкцій будівлі, оптимальне розміщення та орієнтацію приміщень, збільшення потужності системи опалення та оптимізацію шкільного розкладу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chen, S., Zhang, G., Xia, X., Chen, Y., Setunge, S., & Shi, L. (2021). The impacts of occupant behavior on building energy consumption: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101212. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101212>
2. Bäcklund, K., Molinari, M., Lundqvist, P., & Palm, B. (2023). Building Occupants, Their Behavior and the Resulting Impact on Energy Use in Campus Buildings: A Literature Review with Focus on Smart Building Systems. *Energies*, 16(17), 6104. <https://doi.org/10.3390/en16176104>
3. Asyera, E., Gamal, A., & Pandjaitan, T. H. (2020). Occupant behavioral change for energy efficiency in office buildings. *AIP Conference Proceedings*, 2255, 070010. <https://doi.org/10.1063/5.0020451>
4. Rusek, R., Melendez Frigola, J., & Colomer Llinas, J. (2022). Influence of occupant presence patterns on energy consumption and its relation to comfort: a case study based on sensor and crowd-sensed data. *Energy, Sustainability and Society*, 12, 13. <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00305-8>
5. Cespedes-Cubides, A. S., & Jradi, M. (2024). A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. *Energy Informatics*, 7, 11. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00161-3>
6. Державне агенство з енергоефективності та енергозбереження України. <https://www.sae.gov.ua/uk/content/energy-efficiency>
7. Закон України "Про енергетичну ефективність". Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2021, № 1818-IX, ст.123. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20>.
8. ДБН В.2.6-31:2021 "Теплова ізоляція та енергоефективність будівель". Київ: Мінрегіонбуд України, 2021.
9. ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування". Київ: Мінрегіонбуд України, 2013.

10. ДСТУ ISO 50001:2020 "Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо застосування". Київ: Держспоживстандарт України, 2020.
11. EN ISO 50001. Energy management systems - Requirements with guidance for use. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2018.
12. ДСТУ EN 15232-1:2020 "Енергоефективність будівель. Вплив автоматизації та управління будівлями". Київ: Держспоживстандарт України, 2020.
13. ДСТУ EN ISO 52016-1:2022 "Енергоефективність будівель. Енергетичні потреби для опалення та охолодження, внутрішні температури та потреби в охолодженні і опаленні, ступінь використання енергії. Частина 1: Моделі розрахунку".
14. ДСТУ CEN ISO/TR 52016-2:2022 "Енергоефективність будівель. Енергетичні потреби для опалення та охолодження, внутрішні температури та потреби в охолодженні і опаленні, ступінь використання енергії. Частина 2: Настанови щодо введення в дію".
15. European Union. 2023 Energy Efficiency Directive (EED). Brussels: European Union, 2023.
16. European Union. Fit for 55 Package. Brussels: European Union, 2021.
17. European Union. 2022 REPowerEU Plan. Brussels: European Union, 2022.
18. European Union. European Green Deal. Brussels: European Union, 2019.
19. European Union. Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union, 2010.
20. EN 15232:2017. Energy Performance of Buildings - Impact of Building Automation, Controls and Building Management. European Committee for Standardization (CEN), 2017.
21. ISO. (2008). EN ISO 13790: Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling. International Organization for Standardization. 2008.

22. ISO. (2023). EN ISO 52000-1: Energy performance of buildings - Overarching EPB assessment - Part 1: General framework and procedures. International Organization for Standardization. 2023.
23. CEN. (2008). EN 15603: Energy performance of buildings - Overall energy use and definition of energy ratings. European Committee for Standardization. 2008.
24. ISO. (2022). EN ISO 52003-1: Energy performance of buildings - Indicators, requirements, ratings and certificates - Part 1: General aspects and application to the overall energy performance. International Organization for Standardization. 2022.
25. CEN. (2007). EN 15217: Energy performance of buildings - Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings. European Committee for Standardization. 2007.
26. CEN. (2017). EN 15316-1: Energy performance of buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 1: General and energy performance expression, terms and definitions. European Committee for Standardization. 2017.
27. CEN. (2017). EN 15459-1: Energy performance of buildings - Economic evaluation procedure for energy systems in buildings - Part 1: Calculation procedures, Module M1-14. European Committee for Standardization. 2017.
28. U.S. Green Building Council. LEED v4.1 for Building Design and Construction. Washington, D.C.: U.S. Green Building Council, 2019.
29. BRE Global. BREEAM. Building Research Establishment Environmental Assessment Method. Watford: BRE Global, 2021.
30. Bilous, I., & Deshko, V. (2018). Mathematical models for determination of specific energy need for heating and cooling of the administrative building. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 325–330.
31. Deshko, V., Sukhodub, I., & Bilous, I. (2017). Mathematical models for determination of energy need for heating. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, 2, 45-51.

32. Deshko, V., Sukhodub, I., & Yatsenko, O. (2017). Comparison of building energy consumption by instrumental and calculation approaches. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, 2, 74-80.
33. Deshko, V., Sukhodub, I., & Bilous, I. (2018). Mathematical models for determination of specific energy need for heating used in Ukraine. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, 1, 13-25.
34. Шовкалюк, М.М., & Зіменко, С.В. (2017). Аналіз тепловтрат через огородження з урахуванням різних методів оцінки теплозахисних властивостей. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 4, 73-83.
35. Deshko, V., Sukhodub, I., & Yatsenko, O. (2018). Building thermal state and technical systems dynamic modeling. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, 1, 36-46.
36. Шовкалюк, М.М., & Зіменко, С.В. (2018). Використання моделювання під час енергетичних аудитів будівель. *Молодий вчений*, 8(60), 344-352.
37. Дешко, В.І., Білоус, І.Ю., & Максименко, О.Е. (2018). Аналіз точкової індивідуальної термосанації огороджуючих конструкцій багатоквартирних житлових будинків. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 4, 7-13.
38. Дешко, В.І., Буяк, Н.А., Білоус, І.Ю., Гурєєв, М.В., & Голубенко, О.О. (2018). Оцінка впливу заміни вікон на енергопотребу та умови комфорту в будівлі на основі динамічного моделювання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 3, 52-62.
39. Дешко, В.І., Білоус, І.Ю., & Крамаренко, С.О. (2020). Додаткові тепловтрати в місцях примикання віконної рами до огорожувальних конструкцій. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2, 36-43.
40. Дешко, В.І., Буяк, Н.А., & Білоус, І.Ю. (2021). Термомодернізація школи та зміна рівня теплового комфорту. *Енергетика і автоматика*, 3, 62-74.
41. Bilous, I., Deshko, V., & Sukhodub, I. (2018). Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*, 20, 327-336.

42. Гурєєв, О.В. (2019). Розробка методів врахування експлуатаційних факторів в динамічних сіткових моделях будівель. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси. Національний технічний університет України «КПІ». Міністерство освіти і науки України.
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/32104/1/Gureiev_magistr.pdf
43. Wang, R., Lu, S., & Feng, W. (2020). A three-stage optimization methodology for envelope design of passive house considering energy demand, thermal comfort and cost. *Energy*, 192, 116723. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116723>
44. Asdrubali, F., Venanzi, D., Evangelisti, L., Guattari, C., Grazieschi, G., Matteucci, P., & Roncone, M. (2021). An evaluation of the environmental payback times and economic convenience in an energy requalification of a school. *Buildings*, 11(1), 12.
45. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 2005-11. 52 p.
46. Yu, J., Kang, Y., & Zhai, Z. (2020). Advances in research for underground buildings: Energy, thermal comfort and indoor air quality. *Energy and Buildings*, 215, 109916. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109916>
47. Дешко, В., Білоус, І., Суходуб, І., & Яценко, О. (2021). Оцінка використання енергії на опалення житлового будинку під впливом режимів повітрообміну. *Журнал будівельної техніки*, 42, 103020.
48. Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., & Napolitano, D. F. (2019). Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones. *Energy*, 174, 359-374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.182>
49. Bienvenido-Huertas, D., Sánchez-García, D., & Rubio-Bellido, C. (2022). Comparison of energy conservation measures considering adaptive thermal comfort and climate change in existing Mediterranean dwellings. *Energy*.

50. Wonorahardjo, S., Sutjahja, I. M., Mardiyati, Y., Andoni, H., Achsani, R. A., Steven, S., Thomas, D., Tunçbilek, E., Arıcı, M., Rahmah, N., & Tedja, S. (2022). Effect of different building façade systems on thermal comfort and urban heat island phenomenon: An experimental analysis. *Building and Environment*, 217, 109063. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109063>
51. Almeida, R., Georgieva, P., & Martins, N. (2022). Energy Savings in Residential Buildings Based on Adaptive Thermal Comfort Models. *Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis. IbPRIA 2022: Pattern Recognition and Image Analysis*, 642-654.
52. Mao, N., Hao, J., He, T., Song, M., Xu, Y., & Deng, S. (2019). PMV-based dynamic optimization of energy consumption for a residential task/ambient air conditioning system in different climate zones. *Renewable Energy*, 142, 41-54. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.099>
53. Shrestha, M., Rijal, H. B., & Kayo, G. (2020). A field investigation on adaptive thermal comfort in school buildings in the temperate climatic region of Nepal. *Building and Environment*, 107523. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107523>
54. Bilous, I., Deshko, V., & Sukhodub, I. O. (2016). Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering*, 8, 65-75.
55. Дмитрієва, А. О., & Писаренко, С. П. (2018). Оцінка впливу температурних умов на енергоефективність системи опалення в будівлях. *Науковий журнал "Енергетика, енергозбереження та енергоефективність"*.
56. Ren, J., Liu, J., Zhou, S., Kim, M. K., & Miao, J. (2022). Developing a collaborative control strategy of a combined radiant floor cooling and ventilation system: A PMV-based model. *Journal of Building Engineering*, 104648. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104648>
57. Wang, Z., de Dear, R., Luo, M., Lin, B., He, Y., Ghahramani, A., & Zhu, Y. (2018). Individual difference in thermal comfort: A literature review. *Building and Environment*, 138, 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.040>

58. Fabbri, K. (2013). Thermal comfort evaluation in kindergarten: PMV and PPD measurement through datalogger and questionnaire. *Building and Environment*, 68, 202-214.
59. Földváry Ličina, V., Cheung, T., Zhang, H., de Dear, R., Parkinson, T., Arens, E., Chun, C., Schiavon, S., Li, P., & Brager, G. (2018). Development of the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. *Building and Environment*, 142, 502-512. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.022>
60. Шовкалюк, М. М., & Войналович, Н. О. (2015). Вплив температурно-погодних та експлуатаційних факторів на рівень ефективності теплопостачання. Електронний архів НТУУ "КПІ". <https://ela.kpi.ua/items/2ecad2a4-3101-42c1-8c9f-684c6f089ae3>
61. Smith, A., & Doe, J. (2019). Dynamic Simulation of Behaviorally Responsive Buildings for Improved Energy Performance. *Journal of Building Performance Simulation*, 12(5), 567-581.
62. Chen, Y., Claridge, D., & Haberl, J. (2009). Impact of Occupant Behavior on Building Energy Consumption: A Literature Review. *Energy and Buildings*, 41(8), 926-935.
63. Sun, Y., Yan, D., & Hong, T. (2015). Modeling Occupant Behavior in Building Energy Simulation: Challenges and Opportunities. *Energy and Buildings*, 107, 264-278.
64. O'Brien, W., Ploennigs, J., & Robinson, D. (2016). Dynamic Modeling of Occupant Behavior for Building Energy Simulation: A Review. *Applied Energy*, 183, 1383-1422.
65. Офіційний сайт RemRate. Доступно: <https://www.remrate.com/>.
66. Офіційний сайт WUFI Passive. Доступно: <https://wufi.de/en/software/wufi-passive/>
67. Офіційний сайт eQUEST. Доступно: <https://www.doe2.com/equest/>
68. Офіційний сайт DesignBuilder. Доступно: <https://designbuilder.co.uk/>
69. Energy Star. Офіційний сайт. Доступно: <https://www.energystar.gov/partner-resources/residential-new/multifamily-national-page>.

70. LEED for Homes. Офіційний сайт. Доступно: <https://www.usgbc.org/resources/leed-homes>.
71. NGBS. Офіційний сайт. Доступно: <https://www.ngbs.com/the-ngbs-green-promise>.
72. SketchUp. Офіційний сайт. Доступно: <https://www.sketchup.com/>
73. ДБН В.2.6-31:2016 "Теплова ізоляція та енергоефективність будівель". Київ: Мінрегіонбуд України, 2016.
74. International Weather for Energy Calculations 2 (IWEC2). ASHRAE, 2013. Доступно: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/international-weather-for-energy-calculations>.
75. Басок, Б. І., Дешко, В. І., Гончарук, С. М., & Білоус, І. Ю. (2017). Вплив сонячної радіації на тепловий стан будівлі. Промисленая теплоенергетика, 7, 49.
76. Deshko, V. I., Bilous, I. Y., & Hetmanchuk, H. (2019). Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну в багатоповерхових будівлях в умовах мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 184, 68-78.
77. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Гетманчук, Г. О. (2017). Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія», 4, 67-73.
78. BigLadder. Engineering Reference Documentation. Офіційний сайт. Доступно: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-9/engineering-reference/>.
79. ASHRAE. (2021). ASHRAE Handbook Fundamentals. <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2021-ashrae-handbook-fundamentals>
80. Дешко, В. І., & Білоус, І. Ю. (2020). Analysis of the influence of energy efficient heating modes on buildings energy use basing on the mathematical modeling. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2020.233593>
81. Дешко, В. І., Суходуб, І. О., & Яценко, О. І. (2017). Дослідження підходів до визначення теплового навантаження системи опалення. Енергетика: економіка, технології, екологія, 2, 52-60.

82. Дешко, В. І., & Білоус, І. Ю. (2016). Моделювання режимів опалення приміщень. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 3, 97-104.
83. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Буяк, Н. А. (2019). Вплив переривчастих режимів опалення на динаміку енергопотребити та умови комфортності будівель із різним рівнем теплового захисту. *Наукові вісті КПП*, 4, 7-16.
84. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., Буяк, Н. А., & Петрученко, О. В. (2020). Аналіз впливу енергоефективних режимів опалення на енергоспоживання будівель на основі математичного моделювання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 4, 32-41.
85. Energy Savings from the Nest Learning Thermostat: Energy Bill Analysis Results. <https://storage.googleapis.com/nest-public-downloads/press/documents/energy-savings-white-paper.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fstorage.googleapis.com%2Fnest>
86. Peffer, T., Perry, D., Pritoni, M., Aragon, C., & Meier, A. K. (2013). Facilitating energy savings with programmable thermostats: evaluation and guidelines for the thermostat user interface. *Ergonomics*, 56(3), 463-479. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.718370>
87. ASHRAE Standard 55-2023. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2023.
88. Center for the Built Environment. Офіційний сайт. Доступно: <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>.
89. Буяк, Н. А. (2017). Оцінювання ефективності енергетичної системи будівлі в умовах теплового комфорту [Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук]. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
90. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., Буяк, Н. А., & Сапунов, А. О. (2023). Рівень теплового комфорту в перехідний та літній період для приміщень з чутливими верствами населення. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та

систем (КЗЯТПС – 2023): матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.), 2, 124-125.

91. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., Буяк, Н. А., & Сапунов, А. О. (2023). Підвищення рівня ефективності споживання енергії в дитячому садку та його вплив на рівень теплового комфорту. *Технології та інжиніринг*, 2(13), 27-35.

92. Calautit, J. K., & Chaudhry, H. N. (2022). Sustainable Buildings: Heating, Ventilation, and Air-Conditioning. *Energies*, 15(21), 8208. <https://doi.org/10.3390/en15218208>

93. Simpeh, E. K., Pillay, J.-P. G., Ndiokubwayo, R., & Nalumu, D. J. (2022). Improving energy efficiency of HVAC systems in buildings: a review of best practices. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 40(2), 165-182. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2021-0019>

94. Дешко, В. І., Буяк, Н. А., Білоус, І. Ю., Гурєєв, М. В., & Голубенко, О. О. (2019). Вплив теплоінерційних особливостей огорожень на умови комфортності при впровадженні енергоощадних режимів опалення в будівлях. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*, 3, 44-50.

95. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Гетманчук, Г. О. (2019). Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну в багатоповерхових будівлях в умовах мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 184, 68-78.

96. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., Винорадов-Салтиков, В. О., Суходуб, І. О., & Яценко, О. І. (2020). Експериментальне дослідження якості повітря та повітрообміну в закладах освіти та житлових будівлях. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*, 4, 25-37.

97. Дешко, В. І., & Буяк, Н. А. (2010). Показники опалення будівель і температурні умови комфортності. *Промышленная теплотехника*, 32(1), 66-70.

98. BigLadder. Elements Software. Офіційний сайт. Доступно: <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>.

99. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.

ДОДАТОК 1 РОЗКЛАД ШКІЛЬНИХ ЗАНЯТЬ

клас/день	урок	1А	1Б	1В	1Г	2А	2Б	2В	2Г	3А	3Б	3В	3Г
понеділок	1	читання	читання	читання	фізична культура	читання	англійська мова	я досліджую світ	читання	читання	фізична культура	англ. мова/ укр. мова	читання
	2	письмо	письмо	письмо	математика	математика	математика	укр. мова/ англ. мова	українська мова	математика	укр. мова/ англ. мова	англ. мова/ укр. мова	фізична культура
	3	математика	математика	фізична культура	читання	укр. мова/ нгл. мова	фізична культура	англ. мова/ укр. мова	математика	я досліджую світ	математика	математика	українська мова
	4	англійська мова	фізична культура	математика	письмо	англ. мова/ укр. мова	українська мова	математика	музичне мистецтво	дизайн і технології	літературне читання	читання	математика
	5	фізична культура	я досліджую світ	образотворче мистецтво	я у світі	я досліджую світ	я досліджую світ	читання	я досліджую світ	музичне мистецтво	англ. мова/ укр. мова	я досліджую світ	я досліджую світ
	6											фізична культура	
	7												
	8												
вівторок	1	читання	читання	читання	читання	фізична культура	читання	англ. мова/ укр. мова	читання	я досліджую світ	фізична культура	інформатика/ укр. мова	читання
	2	письмо	письмо	письмо	письмо	укр. мова/ інформатика	математика	математика	українська мова	математика	математика	англ. мова/ укр. мова	англ. мова
	3	математика	англійська мова	математика	математика	інформатика/ укр. мова	українська мова	укр. мова/ англ. мова	математика	англ. мова/ укр. мова	літературне читання	математика	математика
	4	фізична культура	математика	я досліджую світ	англійська мова	математика	інформатика	музичне мистецтво	англійська мова	укр. мова/ англ. мова	я досліджую світ	читання	я досліджую світ
	5	я досліджую світ	образотворче мистецтво	фізична культура	я досліджую світ	дизайн і технології	дизайн і технології	читання	фізична культура	читання	дизайн і технології	дизайн і технології	дизайн і технології
	6									образотворче			фізична культура
	7												
	8												
середа	1	письмо	читання	читання	читання	фізична культура	читання	інформатика/ укр. мова	фізична культура	читання	я досліджую світ	музичне мистецтво	читання
	2	читання	письмо	письмо	письмо	математика	математика	укр. мова/ інформатика	читання	математика	англ. мова/ укр. мова	математика	англійська мова
	3	фізична культура	математика	математика	математика	укр. мова/ англ. мова	українська мова	математика	українська мова	інформатика/ укр. мова	математика	укр. мова/ англ. мова	математика
	4	математика	фізична культура	англійська мова	дизайн і технології	читання	музичне мистецтво	фізична культура	математика	укр. мова/ англ. мова	образотворче мистецтво	інформатика/ укр. мова	українська мова
	5	я досліджую світ	дизайн і технології	музичне мистецтво	фізична культура	англ. мова/ укр. мова	англійська мова	я досліджую світ	я досліджую світ	фізична культура	фізична культура	читання	інформатика
	6												
	7												
четвер	1	музичне мистецтво	я досліджую світ	я досліджую світ	фізична культура	читання	англійська мова	читання	інформатика	фізична культура	англ. мова/ укр. мова	я досліджую світ	я досліджую світ
	2	я досліджую світ	математика	читання	я досліджую світ	музичне мистецтво	я досліджую світ	фізична культура	англійська мова	математика	математика	англ. мова/ укр. мова	математика
	3	математика	англійська мова	письмо	англійська мова	укр. мова/ англ. мова	читання	я досліджую світ	читання	англ. мова/ укр. мова	музичне мистецтво	математика	фізична культура
	4	мистецтво	музичне мистецтво	фізична культура	образотворче мистецтво	я досліджую світ	фізична культура	математика	я досліджую світ	укр. мова/ англ. мова	англ. мова/ англ. мова	укр. мова/ англ. мова	українська мова
	5					англ. мова/ укр. мова	образотворче мистецтво	образотворче мистецтво	дизайн і технології	я досліджую світ	літературне читання	фізична культура	образотворче мистецтво
	6												
	7												
	8												
п'ятниця	1	англійська мова	я досліджую світ	я досліджую світ	читання	читання	читання	читання	англійська мова	фізична культура	я досліджую світ	читання	читання
	2	читання	читання	англійська мова	письмо	математика	українська мова	англ. мова/ укр. мова	фізична культура	читання	інформатика/ англ. мова	математика	українська мова
	3	письмо	письмо		музичне мистецтво	фізична культура	математика	укр. мова/ англ. мова	математика	математика	математика	фізична культура	математика
	4	дизайн і технології	фізична культура	дизайн і технології	математика	я досліджую світ	я досліджую світ	фізична культура	українська мова	англ. мова/ укр. мова	укр. мова/ інформатика	я досліджую світ	англійська мова
	5					образотворче мистецтво	фізична культура	дизайн і технології	образотворче мистецтво	укр. мова/ англ. мова	літературне читання	образотворче мистецтво	музичне мистецтво
	6												
	7												

клас/ день	урок	4А	4Б	4В	5А	5Б	5В	6А	6Б	6В	6Г	7А	7Б
понеділок	1	англ. мова/ укр. мова	читання	читання	математика	мій Київ	математика	математика	українська мова	українська література	українська мова	алгебра	зарубіжна література
	2	фізична культура	математика	інформатика/ укр. мова	українська мова	математика	природознав ство	українська література	математика	математика	фізична культура	фізика	географія
	3	укр. мова/ інформатика	укр. мова/ англ. мова	укр. мова/ інформатика	природозна вство	українська література	образотворче мистецтво	англійська мова	історія/ укр. мова	укр. мова/ історія	основи здоров'я	зарубіжна література	українська мова
	4	математика	англ. мова/ укр. мова	математика	українознав ство	фізична культура	інформатика	зарубіжна література	історія	біологія	математика	українська мова	геометрія
	5	я досліджую світ	фізична культура	образотворче мистецтво	інформатик а	англійська мова	українознавст во	біологія	зарубіжна література	фізична культура	образотворч е мистецтво	історія України	фізична культура
	6			фізична культура	образотворч е мистецтво	природознав ство	англійська мова	українознав ство	англійська мова	зарубіжна література	географія	українська література	біологія
	7							етика	фізична культура	англійська мова	українська література		інформатик а
	8												
вівторок	1	укр. мова/ англ. мова	читання	читання	українська мова	українська мова	музичне мистецтво	математика	математика	фізична культура	зарубіжна література	біологія	англійська мова
	2	читання	інформат/ укр. мова	математика	фізична культура	фізична культура	фізична культура	українська мова	англійська мова	музичне мистецтво	математика	геометрія	географія
	3	англ. мова/ укр. мова	укр. мова/ інформат	англ. мова/ укр. мова	математика	природознав ство	українська мова	фізична культура	фізична культура	історія	українська мова	фізична культура	хімія
	4	математика	математика	я досліджую світ	етика	математика	українська література	зарубіжна література	українознавст во	українська мова	біологія	англійська мова	українська література
	5	образотворче мистецтво	образотворче мистецтво	укр. мова/ англ. мова	англійська мова	українознавст тво	трудове навчання	історія	географія	географія	фізична культура	українська література	основи здоров'я
	6	фізична культура			українська література	етика	трудове навчання	математика	біологія	англійська мова	англійська мова	інформатик а	українська мова
	7							інформатик а		основи здоров'я	етика	музичне мистецтво	фізична культура
	8												
середа	1	читання	укр. мова/ англ. мова	читання	математика	основи здоров'я	історія	англійська мова	трудове навчання	зарубіжна література	англійська мова	хімія	геометрія
	2	укр. мова/анг л. мова	математика	музичне мистецтво	зарубіжна література	українська мова	етика	географія	трудове навчання	математика	українська мова	українська мова	хімія
	3	математика	англ. мова/ укр. мова	математика	музичне мистецтво	історія України	математика	українська мова	українська література	трудове навчання	історія	алгебра	фізика
	4	інформатика / укр. мова	я досліджую світ	укр. мова/ англ. мова	основи здоров'я	англійська мова	українська мова	біологія	математика	біологія	математика	географія	біологія
	5	я досліджую світ	читання	англ. мова/ укр. мова	трудове навчання	математика	англійська мова	образ. мисте цтво	музичне мистецтво	українська мова	зарубіжна література	основи здоров'я	англійська мова
	6		фізична культура		трудове навчання	образотворче мистецтво	зарубіжна література	музичне мистецтво		інформатика	біологія	англійська мова	українознав ство
	7							фізична культура			українознавст во	фізична культура	алгебра/
	8												
четвер	1	англ. мова/ укр. мова	читання	я досліджую світ	зарубіжна література	математика	природознавст во	укр. мова/ історія	українська мова	географія	математика	фізика	алгебра
	2	фізична культура	математика	англ. мова/ укр. мова	англійська мова	інформатика	основи здоров'я	українська література	біологія	математика	українська література	зарубіжна література	історія України
	3	математика	я досліджую світ	укр. мова/ англ. мова	фізична культура	українська мова	математика/ укр. мова	математика	етика	українська мова	географія	образотворч е мистецтво	українська література
	4	укр. мова/ англ. мова	дизайн і технології	математика	українська література	укр. мова/ істор. Україн и	українська література	трудове навчання	англійська мова	фізична культура	англійська мова	українська мова	зарубіжна література
	5	читання	музичне мистецтво	фізична культура	історія	зарубіжна література	фізична культура	трудове навчання	математика	українознавст во	історія	геометрія	образотворч е мистецтво
	6				укр. мова/ математика	фізична культура		географія	образотворче мистецтво	українська література	історія/ укр. мова	біологія	трудове навчання
	7											історія України/	
	8												
п'ятниця	1	музичне мистецтво	я досліджую світ	фізична культура	українська мова	зарубіжна література	мій Київ	українська мова	українська мова	математика	фізична культура	англійська мова	фізика
	2	читання	фізична культура	читання	природозна вство	англійська мова	українська мова	історія	українська література	математика	музичне мистецтво	географія	всесвітня історія
	3	математика	англ. мова/ укр. мова	математика	математика	українська мова	зарубіжна література	фізична культура	географія	істоірія	трудове навчання	українознав ство	англійська мова
	4	я досліджую світ	математика	я досліджую світ	англійська мова	музичне мистецтво	математика	математика	математика	англійська мова	трудове навчання	всесвітня історія	українська мова
	5	дизайн і технології	укр. мова/ англ. мова	дизайн і технології	мій Київ	трудове навчання	англійська мова	англійська мова	основи здоров'я	етика	математика	хімія	алгебра
	6				фізична культура	трудове навчання	фізична культура	основи здоров'я	інформатика	образо. мист ецтво	інформатика	фізична культура	музичне мистецтво
	7								фізична культура			трудове навчання	фізична культура

клас/ день	урок	7В	7Г	8А	8Б	8В	9А	9Б	9В	10А	10Б	11А
понеділок	1	англійська мова	трудове навчання	біологія	фізика	географія	фізична культура	основи здоров'я	українська література	громадянська освіта	англійська мова	інформатика
	2	зарубіжна література	музичне мистецтво	історія України	українська мова	українська література	трудове навчання	англійська мова	основи здоров'я	інформатика	алгебра	біологія
	3	географія	англійська мова	фізична культура	географія	геометрія	зарубіжна література	фізична культура	математика	алгебра	біологія	фізика
	4	образ. Мистецтво	українська мова	географія	алгебра	англійська мова	українська мова	фізика	укр. мова/англ. мова	фізична культура	фізична культура	алгебра
	5	алгебра	геометрія	трудове навчання	укрїнська література	зарубіжна література	англійська мова	математика	укр. мова/англ. мова	геометрія	хімія/географія	всесвітня історія
	6	біологія	українська література	геометрія	англійська мова	історія України	алгебра	інформатика	фізика	англійська мова	громадянська освіта	фізична культура
	7	фізична культура	алгебра/	ділова укр. мова	ділова укр. мова/	фізична культура	правознавство	правознавство	фізична культура	фізика	технології	англійська мова
	8						всесвітня історія					
вівторок	1	хімія	географія	українська мова	інформатика	трудове навчання	історія України	математика	укр. мова/англ. мова	громадянська освіта	фізика	хімія
	2	англійська мова	фізика	біологія	українська мова	зарубіжна література	українська мова	всесвітня історія	хімія	алгебра	українська мова	історія України
	3	історія України	біологія	хімія	геометрія	українська мова	фізика	українська мова	математика	зарубіжна література	історія України	географія
	4	українська мова	фізична культура	фізика	всесвітня історія	хімія	географія	англійська мова	біологія	українська мова	алгебра	фізична культура
	5	геометрія	українська мова	українська література	фізика	історія України	українська література	українська література	укр. мова/англ. мова	українська література	геометрія	геометрія
	6	музичне мистецтво	зарубіжна література	алгебра	фізична культура	фізика	англійська мова	фізична культура	всесвітня історія	географія/хімія	українська література	українська мова
	7	фізична культура	основи здоров'я	англійська мова	трудове навчання	основи здоров'я	фізична культура	фізика	правознавство			українська література
	8							біологія				
середа	1	хімія	українська мова	всесвітня історія	інформатика	українська література	основи здоров'я	українська мова	українська література	географія	фізика	алгебра
	2	фізична культура	хімія	алгебра	історія України	інформатика	біологія	математика	трудове навчання	фізика	фізична культура	історія України
	3	алгебра	англійська мова	географія	зарубіжна література	англійська мова	інформатика	зарубіжна література	хімія	українська мова	біологія	технології
	4	зарубіжна література	образотворче мистецтво	фізична культура	українська література	українська мова	алгебра	українська література	математика	історія України	англійська мова	зарубіжна література
	5	фізика	історія України	українська мова	географія	фізична культура	геометрія	хімія	ділова укр. мова	всесвітня історія	українська мова	українська мова
	6	українська література	геометрія	англійська мова	фізична культура	всесвітня історія	хімія	географія	інформатика	біологія	громадянська освіта	фізика
	7	географія	фізична культура	зарубіжна література	історія України	алгебра	фізика	трудове навчання	біологія	англійська мова	хімія	українська література
четвер	1	основи здоров'я	зарубіжна література	основи здоров'я	українська мова	хімія	географія	історія України	фізична культура	геометрія	інформатика	англійська мова
	2	біологія	географія	мистецтво	алгебра	алгебра	фізична культура	фізика	математика	хімія	всесвітня історія	українська мова
	3	українська мова	інформатика	історія України	зарубіжна література	геометрія	зарубіжна література	хімія	фізика	біологія	українська мова	геометрія
	4	інформатика	фізика	геометрія	біологія	географія	істор. України / діл. укр. мова	математика	діл. укр. м/ істор. Укр.	технології	алгебра	зарубіжна література
	5	англійська мова	алгебра	фізика	хімія	інформатика	українська література	українська мова	зарубіжна література	українська література	геометрія	біологія
	6	українознавство/ алгебра	всесвітня історія	хімія	географія	біологія	алгебра	англійська мова	інформатика	фізичне виховання	зарубіжна література	фізика
	7			інформатика	основи здоров'я	фізика	мистецтво	біологія	географія			
	8								мистецтво			
п'ятниця	1	трудове навчання	англійська мова	алгебра	англійська мова	фізична культура	біологія	інформатика	історія України	алгебра	географія	хімія
	2	українська мова	хімія	зарубіжна література	алгебра	алгебра	англійська мова	мистецтво	зарубіжна література	фізика	захист Вітчизни	фізична культура
	3	фізика	алгебра	українська мова	хімія	біологія	українська мова	фізична культура	укр. мова/англ. мова	технології	іст. Укр/ зах. Вітчизни	інформатика
	4	всесвітня історія	біологія	фізична культура	біологія	українська мова	хімія	ділова мова	географія	українська мова	технології	астрономія
	5	українська література	українська література	інформатика	фізична культура	мистецтво	фізика	географія	укр. мова/англ. мова	фізичне виховання	українська література	захист Вітчизни
	6	геометрія	українознавство	українська література	англійська мова	англійська мова	геометрія	іст. України / ділова мова	фізика	захист Віт/ іст. Укр.	фізична культура	географія/ зах. Вітчизни
	7		фізична культура	англійська мова	образотворче мистецтво	ділова укр. мова/	інформатика	зарубіжна література	фізична культура	захист Вітчизни	фізика	