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

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЯЦЕНКО ОЛЕНА ІГОРІВНА

УДК: 620.91:697.1

ДИСЕРТАЦІЯ

Енергетичні показники динамічних режимів будівлі та інженерних систем

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

_____ Олена ЯЦЕНКО

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

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Яценко О.І. Енергетичні показники динамічних режимів будівлі та інженерних систем. – 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, 2023.

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, що підтверджене актами впровадження результатів, представлено дані про апробацію дисертації та наявні публікації з окресленням особистого внеску здобувача.

У першому розділі дисертації проведено огляд та аналіз сучасних даних щодо енергетичного стану будівельного сектору країни, розглянуто будівлю як складну енергетичну систему та проаналізовано сучасні підходи до визначення її енергетичних показників та актуальні тенденції підвищення її енергоефективності, наведено літературний огляд з питань організації режимів роботи інженерних систем, де окреслено основні фактори які впливають на вибір оптимального режиму роботи системи опалення та вентиляції.

Підвищення енергоефективності будівельного сектору є пріоритетним напрямом та однією з умов досягнення сталого розвитку України. Окрім утеплення огороджувальних конструкцій та оновлення інженерного обладнання будівель, важливим етапом при підвищенні енергоефективності є врахування впливу експлуатаційного режиму. Щоденна взаємодія людей з інженерними системами є основою експлуатаційного режиму будівлі. Тож якісний підхід до оцінки ефекту від регулювання інженерних систем має

розглядати динамічну поведінку будівлі – вплив коливання зовнішніх та внутрішніх факторів на температурний режим всередині. Такі підходи реалізуються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє проводити достатньо точний аналіз енергетичних показників та теплового стану будівлі у часі.

У другому розділі дисертації наведені методики визначення енергетичних показників динамічних режимів будівель, які включають розробку енергетичних моделей на базі спеціалізованих програм та експериментальні підходи для оцінки показників теплового комфорту всередині будівель. Представлено три авторські енергетичні моделі, дві з яких створені на базі програмного продукту EnergyPlus та одна – на базі Ansys Fluent. Також, описано методики проведення двох експериментальних досліджень: динаміки зміни внутрішньої температури та динаміки зміни концентрації CO_2 за переривчастого режиму опалення приміщень.

Створені енергетичні моделі житлового приміщення та громадської будівлі враховують взаємодію інженерних систем та оболонки при врахуванні впливу динамічних факторів всередині та ззовні. До внутрішніх факторів відносяться ті, що пов’язанні з діяльністю людей (присутність та активність людей, рівень використання електричного обладнання та освітлення), до зовнішніх – ті що пов’язані зі зміною кліматичних умов (зовнішня температура, сонячна активність та швидкість вітру). CFD-модель житлової кімнати призначена для визначення енергетичних показників роботи підсистеми тепловіддачі та налаштована для роботи як в стаціонарному так і в нестаціонарному режимах.

За переривчастого режиму опалення було проведено експериментальне дослідження динаміки зміни внутрішньої температури у кімнатах квартири шляхом моніторингу. Польові виміри динаміки зміни концентрації CO_2 були проведені у тих же приміщеннях з метою дослідження фактичної кратності повітрообміну. Обробка експериментальних даних проводилася за методом, що ґрунтується на основі балансів повітряних потоків та концентрацій CO_2.

У третьому розділі дисертації проведено аналіз впливу режимів роботи інженерних систем на енергетичні показники досліджуваних приміщень на основі моделей, створених у програмному середовищі EnergyPlus. Представлено результати експериментальних досліджень, які застосовані в енергетичних моделях. Шляхом моделювання оцінено вплив сонячних теплонадходжень та режиму повітрообміну на енергетичні показники житлового приміщення. Наведено результати аналізу енергетичної ефективності застосування переривчастого режиму опалення для житлового приміщення та громадської будівлі.

Результати експерементальних досліджень дозволили визначити фактичну динаміку зміни внутрішньої температури, концентрації CO_2 та рівня повітрообміну в години використання та невикористання приміщень під впливом експлуатаційних характеристик та погодних умов.

Вплив радіаційної складової сонячних теплонадходжень на тепловий стан приміщень квартири за різної орієнтації огороджувальних конструкцій за сторонами світу було досліджено шляхом аналізу результатів енергетичного моделювання теплового навантаження та температури на внутрішніх поверхнях зовнішніх та внутрішніх стін кімнат для двох режимів роботи системи опалення: постійного та переривчастого. Аналіз впливу повітрообміну на енеретичні показники проводився на базі ряду підходів до задання повітрообміну всередині жилових приміщень, згідно норм, рекомендованих діючими стандартами (ASHRAE Std 62.2-2019, EN 16798-1:2019 та українським ДБН В.2.2-15:2019), та за результатами експерементального дослідження фактичної кратності у приміщеннях. Врахування динаміки повітрообміну призвело до підвищення середньодобової температури в приміщенні приблизно на 1-1,5°С, порівняно з використанням постійних значень кратності, рекомендованих чинними стандартами при енергетичних розрахунках.

В ході дослідження потенціалу енергозбереження при використанні різних варіантів переривчастого режиму опалення було визначено питому

надбавку до теплового навантаження, яка за температурного режиму 15-18°С у громадській будівлі знаходилась на рівні 1,2. Аналіз річного енергоспоживання у житловому приміщенні показав, що застосування переривчастого режиму опалення призведе до 16,4% економії теплової енергії.

У четвертому розділі дисертації на базі CFD-моделювання визначалися енергетичні показники роботи підсистеми тепловіддачі. Представлено результати дослідження швидкості розігріву та охолодження приміщення при застосуванні переривчастого режиму опалення. На базі створеної моделі було проаналізовано складову загальної ефективності, яка відповідає за вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні.

Моделювання гідродинамічних процесів у досліджуваному приміщенні проводилося у стаціонарному та нестаціонарному режимах. Результати свідчать про те, що за однакової температури радіатора повітря у приміщення охолоджується швидше ніж нагрівається.

При енергетичних розрахунках втрат теплоти в підсистемі тепловіддачі за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 припускається, що температури в робочій зоні та внутрішня середньооб’ємна однакові та рівномірно розподілені у приміщенні. Для аналізу тепловтрат спричинених неоднорідністю розподілення внутрішньої температури, на базі CFD-моделі кімнати було досліджено коефіцієнти, що відповідають за вертикальний профіль розподілення температури повітря. Даний підхід дозволив провести якісну оцінку коефіцієнтів, що враховують вплив температурного напору та питомі тепловтрати через зовнішні огороджувальні конструкції.

Результати досліджень передано до використання ГО "Асоціація енергоаудиторів України", ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», а також використовуються в навчальному процесі при підготовці студентів навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики «КПІ» ім. Ігоря Сікорського на кафедрі «Теплової та альтернативної енергетики». Практичне значення одержаних результатів підтверджується актами впровадження результатів досліджень.

Ключові слова: енергоефективність, енергоспоживання, будівлі, енергетичні показники, інженерні системи, система опалення, енергетичне моделювання будівель, вентиляція, EnergyPlus, симуляція, Ansys Fluent, CFD-модель, підсистема тепловіддачі, теплопередача.

ABSTRACT

Yatsenko O.I. Energy indicators of dynamic modes of buildings and engineering systems. – Manuscript.

The dissertation on completion of the Doctor of Philosophy degree on specialty 144 − Heat power engineering. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The introduction of the dissertation provides the relevance of the topic and the connection of the work with research projects, plans and topics. The purpose, scientific task, object, subject and methods of research are presented, the scientific novelty is defined, the practical value of the obtained results is confirmed by implementing acts, the data on approbation of the dissertation and available publications where personal contribution is outlined are presented.

In the first section of the dissertation current data on the energy status of the construction sector are analyzed, building as a complex energy system is considered, modern approaches to energy performance determination and current trends in energy efficiency are reviewed, as well as organization of engineering systems operation and the main factors influencing the choice of the optimal operation mode for heating and ventilation system are outlined.

Improving the energy efficiency of the construction sector is a priority direction and one of the necessary conditions for ensuring sustainable development of Ukraine. In addition to insulation of enclosing structures and renovation of engineering equipment in buildings, an important step in improving energy efficiency is to take into account the impact of the operating mode. The daily human interaction with engineering systems is the basis of the building operating

mode. Therefore, a qualitative approach to assess the effect of engineering systems adjustment should consider dynamic behavior of the building - the impact of fluctuations in external and internal factors on the temperature inside. Such approaches are implemented on the basis of specialized program software, which allows to provide fairly accurate analysis of building energy performance and thermal condition over time.

In the second section of the dissertation the methods for energy performance of buildings dynamic modes determination which include the development of energy models based on specialized software and experimental approaches to assess the indicators of thermal comfort in buildings are presented. Three author's energy models are presented, two of which are based on EnergyPlus software and one is based on Ansys Fluent. Also, methods of conducting two experimental researches at an intermittent heating mode in residential premise are described: monitoring of internal temperature dynamics and CO_2 concentration dynamics.

The created energy models of residential premise and public building take into account the interaction of engineering systems and envelope considering the influence of fluctuations in internal and external factors. Internal factors include those related to human activities (number of people, activity level, electrical equipment and lighting use), and external factors include those related to climate change (outdoor temperature, solar activity and wind speed). The CFD-model of the bedroom was designed to determine the energy performance of the heat emission system and is configured to work in both steady and transient simulation modes.

An experimental study of the internal temperature dynamics in the apartment rooms during intermittent heating mode was conducted by monitoring. In order to study the actual air change rate field measurements of the CO_2 concentration dynamics were also performed. Experimental results calculation was conducted according to the method based on relation of the obtained data on CO_2 concentration and air change rate.

In the third section of the dissertation the analysis of engineering systems operation modes influence on energy performance of studied premises on the basis

of the created in the EnergyPlus software environment models is carried out. The results of experimental researches applied in energy models are presented. The influence of solar heat gains and air exchange mode on the energy performance of the residential premise is estimated by modeling. The results of intermittent heating mode energy efficiency analysis for residential premise and public building are given.

The results of experimental studies allow to determine the actual dynamics of internal temperature, CO_2 concentration and air change rate during operation and non-operation hours in premises under the influence of operational characteristics and weather conditions.

The influence of the radiation component of solar heat gains on the thermal condition of the apartment with different cardinal direction of enclosing structures was studied by analyzing the energy modeling results of heat load and temperature on the inner surfaces of external and internal walls under constant and intermittent heating modes. The analysis of air exchange impact on energy performance was conducted on the basis of few approaches to air exchange setting inside residential premises according to the values required by the current norms (EN 16798-1:2019, ASHRAE Std 62.2:2019 and DBN V. 2.2-15:2019), and according to the results of an experimental study of the air change rate in these premises. Taking into account the dynamics of air exchange has led to an increase in the average daily temperature in rooms by about 1-1.5°C, compared with the use of constant air change values recommended by current standards for energy calculations.

In the course of energy saving potential study under different intermittent heating modes use the specific heat load increase rate was determined, which at a temperature of 15-18°C in a public building was at the level of 1.2. Analysis of the residential premise annual energy consumption showed that the use of intermittent heating mode leads to thermal energy savings of 16.4%.

In the fourth section of the dissertation the energy performance of the heat emission system is determined on the basis of CFD-modeling. The results of the room heating and cooling rate study during intermittent heating mode are presented.

On the basis of the created model the part efficiency level for a vertical temperature profile is analyzed.

Modeling of hydrodynamic processes in the studied room was performed in steady and transient simulation modes. The results show that at the same initial radiator temperature air in the room cools faster than it heats up.

When calculating heat losses in the heat emission system according to DSTU B A.2.2-12:2015, it is assumed that the temperature in the working area and the internal volume average temperature are the same and evenly distributed in the room. On the basis of the room CFD-model, the coefficients responsible for a vertical temperature profile were investigated to analyze the heat losses caused by the non-uniform temperature distribution. This approach allowed to make a qualitative assessment of the parameters that take into account the influence of over temperature and specific heat losses via external components.

The research results were transferred for use in NGO «Association of Energy Auditors of Ukraine», and State Enterprise “The State Research Institute of Building Constructions”. Results are also used in the educational process of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute at the Department of Thermal and Alternative Energy. The practical significance of the obtained results is confirmed by the implementing acts.

Keywords: energy efficiency, energy consumption, building, energy performance, engineering systems, heating system, building energy modeling, ventilation, EnergyPlus, simulation, Ansys Fluent, CFD-model, heat emission system, heat transfer.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дослідження коефіцієнтів ефективності підсистеми тепловіддачі на основі CFD-моделі кімнати / Дешко В.І., Суходуб І.О., Яценко О.І. // Технології та інжиніринг». Випуск № 5 (10). Київ 2022 **(фахове видання)**

2. V. Deshko, I. Bilous, D. Biriukov, O. Yatsenko (2021), Transient energy models of housing facilities operation, *Rocznik Ochrona Srodowiska (Annual Set The Environment Protection)*. ISSN: 1506-218X **(іноземне видання,** включене до бази даних **Scopus)**

3. V. Deshko, I. Bilous, I. Sukhodub, O. Yatsenko (2021), Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes, *Journal of Building Engineering* 42 (2021) 103020. ISSN: 2352-7102 **(іноземне видання,** включене до бази даних **Scopus)**

4. Аналіз впливу розподілення повітрообміну між кімнатами на енергоспоживання квартири / В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, І.О. Суходуб, О.І. Яценко // *Енергетика: економіка, технології, екологія.* — 2021. — №1(63). — С. 39-50

5. Експериментальне дослідження якості повітря та повітрообміну в закладах освіти та житлових будівлях / Дешко В.І., Білоус І.Ю., Винорадов-Салтиков В.О., Суходуб І.О., Яценко О.І. // *Журнал «Вісник КНУТД»*. Випуск № 4 (148). Київ 2021, С. 25-37 **(фахове видання)**

6. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2020). Joint influence of intermittent heating mode and outdoor factors on apartment heat load. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 191, 18-27 **(фахове видання)**

7. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2019), Intermittent heating system operation modes for residential spaces. *Journal of New Technologies in Environmental Science*, vol. 3, pp. 139-148. ISSN: 2544-7017 **(іноземне видання)**

8. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2018), Building thermal state and technical systems dynamic modeling. *Journal of New Technologies in Environmental Science*, vol. 2, pp. 36-46. ISSN: 2544-7017 **(іноземне видання)**

9. Дослідження підходів до визначення теплового навантаження системи опалення / В.І. Дешко, І.О. Суходуб, О.І.Яценко // *Енергетика: економіка, технології, екологія.* - 2017. - №2. - С. 52-60 **(фахове видання)**

10. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2017), Comparison of building energy consumption by instrumental and calculation approaches, *Journal of New Technologies in Environmental Science*, vol. 2, pp. 74-80. ISSN: 2544-7017 **(іноземне видання).**

11. Яценко О.І. Застосування CFD-моделювання для аналізу показників ефективності роботи системи опалення. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» м. Київ 2-3 червня 2022 р., С. 81-85.

12. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Yatsenko O.I. (2021) Analysis of constant and intermittent heating modes using BEM and CFD simulation. Book of abstracts V International Scientific-Technical Conference “Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering”, 3-5 June 2021. Kielce, Poland. Pp. 39-41.

13. Дешко В.І., Наумчук О.С., Яценко О.І. Особливості техніко-економічної оцінки споживання енергії будівлями. Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» м. Київ 7-8 травня 2020 р. С. 269-272.

14. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Yatsenko O.I. (2019) Intermittent heating system operation modes for residential spaces. Book of abstracts III International Scientific-Technical Conference “Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering”, 7-9 February 2019, Kielce, Poland. P. 26.

15. Дешко В.І., Суходуб І.О., Яценко О.І. Переривчасті режими роботи системи опалення жилого приміщення. Енергетика. Екологія. Людина: Матеріали XI науково-технічної конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту (м. Київ, 24-25 квітня 2019 р.). Київ, 2019. С. 32-40.

16. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Yatsenko O.I. (2017) Comparison of building energy consumption by instrumental and calculation approaches. Book of abstracts II International Scientific-Technical Conference “Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering”, 23-25 November 2017, Kielce, Poland. Pp. 47-55.

17. Суходуб І.О., Яценко О.І. Моделювання споживання енергії на потреби опалення громадської будівлі. Матеріали IX науково-технічної конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту «Енергетика. Екологія. Людина» м. Київ 25-26 травня 2017 р. С. 122-129.

18. Суходуб І.О., Яценко О.І. Дослідження підходів до визначення теплового навантаження системи опалення. Матеріали XV міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» м. Київ 25-28 квітня 2017 р. С. 138.

19. Дешко В.І., Суходуб І.О., Яценко О.І. Програмне середовище EnergyPlus для моделювання енергоспоживання будівель. Матеріали XIV Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» м. Київ 18-21 квітня 2016 р. С. 199.

20. Суходуб І.О., Яценко О.І., Мотрич С.С. Аналіз ефективності роботи системи опалення навчального корпусу №7 НТУУ "КПІ". Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» м. Київ 26 травня 2015 р. С. 277-283.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 16

ВСТУП 17

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БУДІВЕЛЬ 23

1.1 Енергоефективність будівельного сектору 23

1.2 Будівля як складна енергетична система 26

1.3 Сучасні підходи до визначення енергетичної ефективності будівель 28

1.4 Сучасні тенденції підвищення енергетичної ефективності будівель 33

1.4.1 Енергоефективні режими роботи системи опалення 33

1.4.2 Енергоефективні режими роботи системи вентиляції 37

Висновки до розділу 1 та постановка завдань дослідження 44

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ БУДІВЛІ 47

2.1 Загальна схема проведення досліджень 47

2.2 Розробка динамічних моделей для дослідження теплового стану та енергетичних показників будівель 50

2.2.1 Енергетична модель для визначення енергетичних показників громадської будівлі 50

2.2.2 Енергетична модель для визначення енергетичних показників житлового приміщення 56

2.2.3 CFD-модель для дослідження теплового комфорту у житловому приміщення 66

2.3 Методика експериментального визначення показників теплового комфорту приміщень 70

2.3.1 Дослідження динаміки внутрішньої температури за переривчастого режиму опалення 70

2.3.2 Дослідження динаміки концентрації CO_2 та кратності повітрообміну за переривчастого режиму опалення 71

2.3.3 Верифікація результатів 74

Висновки до розділу 2 76

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ БУДІВЕЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЕЙ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ENERGY PLUS 78

3.1 Експериментальне визначення показників режимів роботи систем опалення та повітрообміну 78

3.1.1 Фактичний профіль внутрішньої температури 78

3.1.2 Фактичний рівень повітрообміну 80

3.2 Вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на переривчастий режим роботи системи опалення 83

3.2.1 Дослідження впливу радіаційних теплонадходжень 83

3.2.2 Дослідження впливу режиму повітрообміну 89

3.3 Результати щодо енергетичної ефективності використання переривчастих режимів опалення 105

3.3.1 Дослідження ефективності переривчастого режиму опалення для житлового приміщення 105

3.3.2 Дослідження ефективності переривчастого режиму опалення для громадської будівлі 109

Висновки до розділу 3 113

РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ПІДСИСТЕМИ ТЕПЛОВІДДАЧІ НА БАЗІ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ 116

4.1 Аналіз швидкості розігріву та охолодження приміщення при застосуванні переривчастого режиму опалення 116

4.2 Показник впливу приладу опалення на енергоефективність системи тепловіддачі 118

4.3 Як змінюються умови комфортності при різному повітрообміні та різній температурі опалювального приладу 127

Висновок до розділу 4 129

ВИСНОВКИ 131

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 133

ДОДАТОК А 147

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

EN − Європейські норми;

EP − програмний продукт EnergyPlus;

IWEC − міжнародний погодний файл;

ГВП − гаряче водопостачання;

ГД − градусо-доби;

ДБН − Державні будівельні норми;

ДСТУ − Державний стандарт України;

КПІ − Київський політехнічний інститут;

НДР − науково-дослідні роботи;

ОВК − опалення, вентиляція та кондиціювання.

ВСТУП

Актуальність теми. Будівельний сектор є найбільшим споживачем енергії у світі [1]. 30% від загального кінцевого енергоспоживання та 28% від загальних світових викидів CO_2 припадають на експлуатацію житлових та громадських будівель. Тож в останні десятиліття необхідність скорочення обсягів використання природних ресурсів, а також зниження рівня шкідливих викидів, призвела до вивчення нових аспектів енергоефективності будівель.

Імплементація профільної Директиви 2012/27/ЄС про енергетичну ефективність в українське законодавство та державна політика в енергетичній сфері формують тенденцію до підвищення контролю споживання енергоресурсів, викидів CO_2 та грошових витрат на енергоносії в Україні. Тому виникає потреба у пошуку ефективних шляхів підвищення енергоефективності кожної будівлі. Європейський досвід показує, що впровадження заходів з енергоефективності має здійснюватися комплексно. Для досягнення найбільшого ефекту від впровадження енергоефективних заходів важливо враховувати взаємодію між оболонкою будівлі та її інженерними системами (системи опалення, охолодження та вентиляції) при врахуванні динамічної поведінки будівлі – взаємодії між температурним режимом всередині та факторами, які впливають на нього.

Наукові роботи в області досліджень енергоефективності будівель спрямовані більше на аналіз впливу теплового захисту. При цьому питання, пов’язані з режимами роботи інженерних систем потребують розвитку. Цими питаннями займалися Дешко, Білоус, Басок, Vychtikov, Baranova, Баласанян, Lee Sang-Hoon, Pedro F. Pereira, та ряд західних вчених.

Таким чином, наукова задача дисертаційної роботи полягає у розробці та розвитку методів оцінки ефективності динамічних режимів будівлі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконані дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефективність» Законам України «Про енергозбереження», «Про

пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», «Про енергетичну ефективність будівель», направленості тематики науково-дослідної роботи (НДР) кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського». Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання держбюджетних НДР: “Управління енергоспоживанням об’єктів комунальної енергетики” (№ держреєстрації 0117U000469); “Інжинірингові аспекти функціонування системи енергоменеджменту об’єктів житлово-громадської сфери” (№ держреєстрації 0119U100670); “Розроблення техніко-технологічних схем та систем керування теплозабезпечення населених пунктів на основі термодинамічних підходів” (№ держреєстрації 0120U102168).

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є підвищення ефективності управління режимами роботи інженерних систем будівель при врахуванні впливу динаміки контрольованих та неконтрольованих факторів за допомогою програмних засобів для енергетичного моделювання будівель.

Для досягнення мети дослідження були виконані наступні завдання:

– аналіз сучасних методів визначення енергетичних показників та підходів до підвищення ефективності управління режимами роботи інженерних систем будівель;

– розробка динамічних моделей будівель для дослідження теплового стану та енергетичних показників будівель;

– визначення вагомості впливу зовнішніх та внутрішніх факторів на переривчастий режим роботи системи опалення на базі динамічних моделей в програмному середовищі Energy Plus;

– проведення експериментально-розрахункового дослідження динаміки мінливості показників теплового комфорту в приміщеннях;

– визначення енергетичних показників роботи підсистеми тепловіддачі на базі CFD-моделювання.

Об'єкт дослідження – процес оцінювання ефективності динамічних режимів будівлі.

Предмет дослідження – методи і способи оцінювання енергетичних показників і режимів роботи інженерних систем будівель з використанням енергетичного моделювання.

Методи дослідження. Науково-методичну основу проведених досліджень склали наступні методи: аналізу та синтезу, математичного та імітаційного моделювання, математичної статистики, енергетичного моделювання, фундаментальні положення теорії тепломасообміну, експериментальні методи визначення температурного профілю та рівня концентрації CO_2 в приміщеннях будівлі.

Наукова новизна результатів дослідження полягає у наступному:

– розвинуто підхід до аналізу теплового стану приміщень будівлі за переривчастого режиму опалення, який реалізується на основі експериментального визначення профілю температур в приміщеннях та застосування динамічних моделей, що дозволяють визначити енергетичні показники приміщень у часі;

– запропоновано та обґрунтовано підхід до визначення енергетичних показників та організації режиму вентиляції приміщень за заданим графіком з використанням результатів експериментальних вимірювань кратності повітрообміну та значень, запропонованих діючими стандартами, при врахуванні експлуатаційного режиму та мінливості зовнішніх факторів та при забезпеченні теплового комфорту, високої якості повітря та енергозбереження;

– удосконалено підхід до створення енергетичних моделей, які можуть бути використані для енергетичного аналізу, шляхом одночасного врахування динаміки експлуатаційного графіку, переривчастого режиму опалення та змінного повітрообміну з метою дослідження впливу змін в технічних, експлуатаційних, розмірних та енергетичних характеристиках будівель та інженерних систем, а також факторів, що формують теплове навантаження будівель та впливають на їх енергоспоживання для можливості швидкого

прийняття обґрунтованих технічних рішень з метою підвищення енергетичної ефективності будівель;

– вперше запропоновано підхід до визначення складової загального рівня ефективності системи тепловіддачі, яка відповідає за вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні, що дозволить точніше враховувати втрати пов’язані з нерівномірністю розподілення при розрахунках енергоспоживання.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропоновані підходи дозволяють підвищити енергетичну ефективність роботи інженерних систем будівель при забезпеченні комфортних умов всередині.

До ГО "Асоціація енергоаудиторів України" передано результати оцінки впливу переривчастого режиму на енергетичні показники будівлі. Результати дослідження підходу до визначення складової загального рівня ефективності підсистеми тепловіддачі передано до використання в ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» з метою підвищення якості результатів розрахунків за “Методом розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні”, наведеним у державному стандарті України.

Результати наукових досліджень, викладених у дисертаційній роботі використовуються в навчальному процесі при підготовці студентів навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики «КПІ» ім. Ігоря Сікорського на кафедрі «Теплової та альтернативної енергетики».

Практичне значення одержаних результатів підтверджується актами впровадження результатів досліджень.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею. Автором особисто отримані всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: досліджено можливості програми для динамічного моделювання EnergyPlus для визначення

енергетичних показників будівлі [2]; проведено аналіз різних підходів до визначення теплового навантаження [3] та енергоспоживання [3, 5, 6] будівлі на базі вітчизняних і європейських стандартів та програми для енергетичного моделювання, а також оцінено надбавку до теплового навантаження за переривчастого режиму опалення [7]; проаналізовано енергоспоживання протягом опалювального періоду за переривчастого режиму опалення при застосуванні різних температурних перепадів між годинами використання та невикористання приміщення [8]; проведено експериментальне дослідження профілю температур у житловому приміщенні та визначено економію від застосування переривчастого режиму опалення [9, 10, 11]; проаналізовано вплив сонячних теплонадходжень на теплове навантаження протягом доби та річне енергоспоживання [12]; проведено визначення кратності повітрообміну в приміщеннях експериментально-розрахунковим методом на основі даних по концентрації CO_2, при врахуванні мінливості експлуатаційно-поведінкових особливостей мешканців [13]; проведено порівняння різних підходів до задання повітрообміну у квартирі при енергетичних розрахунках та проаналізовано вплив розподілу по приміщенням значень кратності повітрообміну на теплове навантаження та енергоспоживання, включаючи використання постійних значень кратності із діючих стандартів та графіків повітрообміну, створених на базі результатів експерименту та значень зі стандартів [14, 15]; досліджено енергетичні показники роботи підсистеми тепловіддачі [16, 17], а також швидкість розігріву та охолодження приміщення на базі програми для моделювання гідродинамічних процесів [18]; здійснено верифікацію енергетичної моделі житлового приміщення, створеної в програмному середовищі EnergyPlus з аналогічною моделлю в програмному середовищі MathLab [19].

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень, викладених у дисертаційній роботі, було представлено на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: міжнародна науково-технічна конференція «Actual Problems of

Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering» (Польща, 2017, 2019, 2021); міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективний університет» (Київ, 2022); міжнародна науково-технічна конференція інституту енергозбереження та енергоменеджменту «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2017, 2019, 2020, 2022), міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Київ, 2017). Результати досліджень також були представлені на Всеукраїнському конкурсі "Молодь енергетиці України: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків" (Київ, 2016), де представлена на конкурсі робота здобула призове місце, а також на аспірантських читаннях пам’яті А. В. Праховника.

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано у 20 наукових працях: 10 статей у наукових фахових виданнях (п’ять статей у виданнях іноземних держав, з яких дві внесені до міжнародної бази Scopus, чотири статті у фахових виданнях України), 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференції, з яких три у виданнях іноземних держав.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 112 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 150 сторінок, 55 рисунків, 18 таблиць.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БУДІВЕЛЬ

1.1 Енергоефективність будівельного сектору

Поняття енергетичної ефективності будівель з’явилося під час першої енергетичної кризи 70-х років минулого століття.

В Європейському Союзі ключовим документом щодо енергоефективності є Директива Європейського парламенту та Євросоюзу 2012/27/EU про енергоефективність (Energy Efficiency Directive) від 25 жовтня 2012 року. Ця Директива встановлює набір обов'язкових заходів, спрямованих на досягнення підвищення енергоефективності в ЄС на 20% до 2020 року. У 2016 році Європейська Комісія запропонувала оновити Директиву 2012/27/EU в рамках прийняття енергетичного пакета заходів зі збереження конкурентоспроможності ЄС «Чиста енергія для всіх європейців» (Clean Energy For All Europeans). Пакет містив пропозицію переглянути Директиву про енергоефективність, включаючи цілі щодо енергоефективності та корекцію ключових положень продовжуючи термін реалізації до 2030 року. Змінена Директива про енергоефективність була прийнята у 2018 році та набула чинності у 2019 році. Оновленою метою є досягнення підвищення енергоефективності в ЄС на 32,5% до 2030 року.

Ще одним основним законодавчим актом ЄС в галузі енергоефективності є Директива 2010/31/EU про енергоефективність будівель (Energy Performance of Buildings Directive), прийнята в 2010 році. Саме в цій Директиві йдеться про енергетичні паспорти для будівель та про необхідність встановлення спеціальних вимоги для країн ЄС щодо енергоефективності новобудов, будівель після капітального ремонту, а також при заміні або модернізації будівельних елементів. У 2018 році ця Директива також була оновлена.

Після підписання Угоди про Асоціацію з ЄС, Україна взяла на себе ряд зобов'язань щодо енергоефективності, та відповідно до наведених вище Директив ЄС розпочала створення сучасної системи енергоефективності в країні. Директиву 2012/27/EU законодавчо було імплементовано у вигляді Закону України "Про енергетичну ефективність будівель" [20] у 2017 році.

За міжнародними даними Україна є однією з найбільш енергоємних країн у світі [21]. Така ситуація зумовлена великою часткою енергоємних секторів, які характеризуються високим ступенем фізичної зношеності основних фондів, застарілими та неефективними технологіями, значними енергетичними втратами при постачанні та споживанні енергоресурсів, обмеженістю стимулів до зниження енергоспоживання, низьким рівнем впровадження енергоефективних технологій та низькою енергоефективністю будівельного фонду [22].

В Україні останнім часом пріоритетним сектором для підвищення енергоефективності є побутовий (житловий) сектор. Енергоспоживання цього сектору складає другу за величиною частку в енергобалансі України (рис. 1.1). За даними Енергетичного балансу України за 2020 рік обсяг загального енергоспоживання у побутовому секторі склав 13,601 млн. тонн нафтового еквіваленту, що становить 28,5% від загального кінцевого енергоспоживання в країні за 2020 рік.

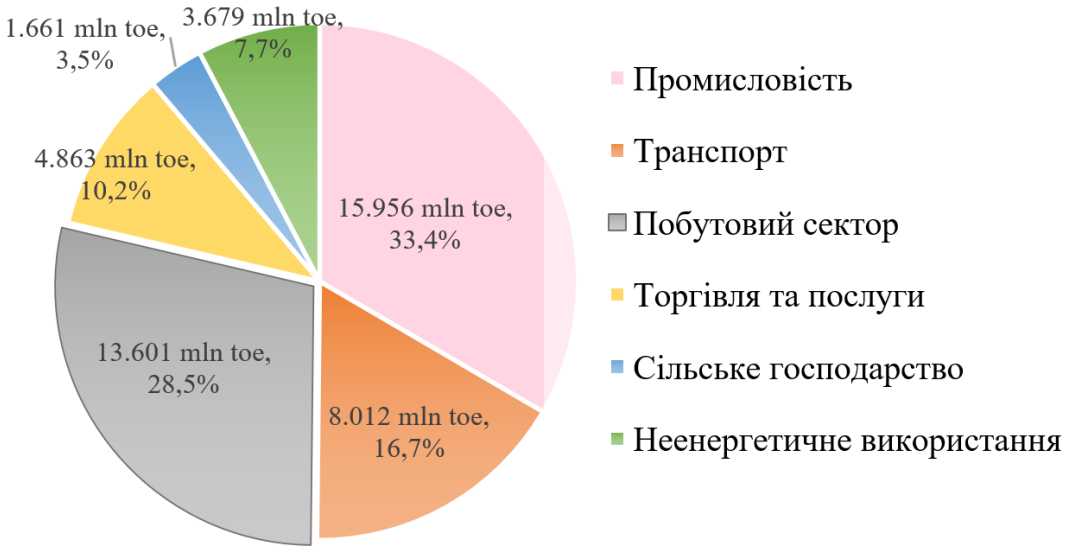


Рис. 1.1 – Енергетичний баланс України за 2020 рік

За даними Мінрегіону житловий сектор характеризується високим економічним потенціалом, який може становити 9 млн тне щорічно при скороченні енергоспоживання житловими будинками, а також соціальною необхідністю.

Низька енергетична ефективність житлового фонду України зумовлена тим, що близько 87% наявних житлових будівель збудовані до 1991 року [23]. За статистичними даними також відомо, що станом на 2020 рік капітальний ремонт не проводився у 41,9% домогосподарств. Наведені дані свідчать про те що як мінімум майже половина будівель не відповідають мінімальним нормативним вимогам щодо енергоспоживання та характеризуються низькими теплотехнічними характеристиками огороджувальних конструкцій та зношеністю інженерних систем.

За оцінками експертів відомо, що в Україні фактичне питоме енергоспоживання на потреби опалення та гарячого водопостачання значно перевищує показники в країнах Європи з подібними кліматичними умовами. Так середнє питоме споживання енергії на опалення в країнах ЄС становить 130 кВт·год/м^2·рік, в той час як в Україні цей показник сягає 264 кВт·год/м^2·рік [24].

В ЄС визнано, що підвищення енергетичної ефективності – є однією з основних умов досягнення сталого розвитку. Для підвищення енергоефективності будівельних фондів в країнах ЄС постійно підвищуються вимоги до об’ємів кінцевого енергоспоживання. Так з 2019 року не дозволяється будівництво житлових будинків, споживання яких становить понад 60 кВт·год/м^2 для подібних до України кліматичних умов. А з 2020 року в Європі почався масовий перехід до спорудження будівель з «нульовим» рівнем енергоспоживання.

За підрахунками Держенергоефективності встановлено, що здійснення комплексної термомодернізації житлових будинків України дозволить скоротити енергоспоживання до 50% від існуючого обсягу [24]. Тож

зменшення витрат на потреби опалення будівель має один з найбільших потенціалів підвищення енергоефективності в країні.

Контроль за рівнем споживання енергоресурсів зі сторони держави в будівельному секторі здійснюється за енергетичними показниками будівель. Тож оцінка енергоспоживання при проектуванні, будівництві та експлуатації будівель стала ключовою характеристикою їх енергоефективності. Розрахункові значення річного енергоспоживання будівель використовуються для енергетичної сертифікації та паспортизації будівель [25], для відбору інвестиційних проектів з підвищення енергоефективності, для планування майбутніх витрат на енергоносії та для демонстрації відповідності певним вимогам до енергетичних показників [26].

1.2 Будівля як складна енергетична система

Відповідно до [27] будівля є різновидом наземної споруди, що пов’язана із землею за допомогою фундаменту та складається з несучих та огороджувальних конструкцій, які утворюють приміщення, а також з інженерних систем. Для забезпечення комфортних умов життєдіяльності в будівлі використовується енергія. Таким чином будь-яка будівля є складною унікальною системою, що має власні геометричні, фізичні, енергетичні та екологічні характеристики і в якій протікають різні за фізичним змістом процеси поглинання, перетворення і перенесення теплоти. Врахування всіх характеристик формує комплексні підходи до розрахунку енергетичних показників будівель. На сьогоднішній день у світі основний акцент робиться на енергетичну ефективність будівель розташованих у холодній та помірній кліматичних зонах, так як для таких будівель споживання тепла є основною складовою витрат на енергоресурси, тож і потенціал до енергозбереження ця складова має найбільший.

На енергоспоживання будь-якої будівлі впливають шість основних факторів [28]:

– зовнішні кліматичні умови;
– оболонка будівлі;
– обладнання та енергетичні джерела і системи;
– експлуатація та технічне обслуговування;
– діяльність та поведінка мешканців;
– комфортні умови середовища всередині будівлі.

Під впливом різниці температур повітря всередині-ззовні, а також сонячної радіації в зимовий період будівля втрачає тепло через огороджувальні конструкції, а в літній − отримує. Втрати теплоти також відбуваються в результаті інфільтрації та ексфільтрації повітря через нещільності в огороджувальних конструкціях та через пори матеріалів, а також через перетікання повітря між сполученими приміщеннями під дією гравітаційних сил, вітру та перепаду тисків. Погіршення теплозахисту огороджувальних конструкцій може також відбуватися в результаті різниці вологості повітря всередині-ззовні, коли вологообмін призводить накоплення вологи в конструктивних елементах будівлі [27].

Поміж шести наведених факторів, що впливають на енергоспоживання будівлі останні три залежать від мешканців та можуть впливати більше ніж три попередні при підвищенні рівня енергоефективності.

Щоденна взаємодія людей із інженерними будівельними системами є основою режиму експлуатації будівлі [15]. За призначенням інженерні системи, що мають суттєве енергоспоживання в будівлях, поділяють на такі:

– опалення;
– вентиляція;
– кондиціювання;
– гаряче водопостачання;
– освітлення.

Режим експлуатації будівлі впливає на рівень внутрішніх теплонадходжень, на регулювання налаштувань термостата, провітрювання приміщень, використання електричного та освітлювального обладнання,

використання віконних жалюзі та споживання гарячої води для побутових потреб [29] Та в основному показники енергетичної ефективності будівлі найбільше залежать від режиму опалення та вентиляції, а для літнього періоду – від режиму охолодження та вентиляції.

Якісний розрахунок заходів з підвищення енергоефективності повинен враховувати динамічну поведінку будівлі – взаємодію між температурним режимом всередині та факторами, які впливають на нього.

1.3 Сучасні підходи до визначення енергетичної ефективності будівель

Енергоефективність будівель – це використання меншої кількості енергоресурсів при забезпеченні комфортних умов всередині будівель.

Відповідно до Закону України "Про енергетичну ефективність будівель" енергетична ефективність будівель визначається за методикою, що розроблена з урахуванням законодавчих вимог Європейського Союзу, Енергетичного Співтовариства, а також європейських стандартів у сфері енергоефективності будівель [20]. Для визначення енергетичної ефективності будівель при розрахунках може бути використане програмне забезпечення, розрахунковий алгоритм якого відповідає вимогам затвердженої методики.

В Україні національний стандарт для оцінки енергоефективності ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [30] заснований на європейській методиці, описаній в EN ISO 13790 [31]. Український стандарт формулює методику для розрахунку річного енергоспоживання на потреби опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та ГВП будівель що проектуються та експлуатуються. Методика, наведена в стандарті, є основою системного принципу забезпечення енергоефективності об’єктів будівництва [30].

Методика визначення енергоефективності будівель включає наступні елементи розрахунку [30]:

– визначення теплопередачі трансмісією через огороджувальні конструкції та вентиляцією з припливним повітрям;

– визначення теплонадходжень від внутрішніх джерел (люди, освітлення, обладнання) та сонячних теплонадходжень;

– визначення річної енергопотреби на опалення та охолодження при заданій внутрішній температурі повітря;

– визначення річного енергоспоживання на опаленні та охолодження будівлі;

– визначення річного енергоспоживання на потреби вентиляції;

– визначення річної енергопотреби та енергоспоживання на потреби гарячого водопостачання;

– визначення річного енергоспоживання на потреби освітлення.

Методика розрахунку, що розглядається у стандарті [30], дозволяє розділити будівлю на декілька зон, використовувати різні часові інтервали, тим самим досягаючи більшої точності розрахунку. Тож енергопотреба на опалення та охолодження будівлі за явною теплотою розраховується за енергетичним балансом зон будівлі [32]. Приклад помісячного розрахунку житлового приміщення за національним стандартом приведено в роботі [33].

Оціночні розрахунки по наближеним методикам не дозволяють отримати цілісну картину взаємодії всіх факторів, а надають лише загальні результати. Існують і інші методи визначення показників енергетичної ефективності при врахуванні складових теплового балансу будівлі. Такі методи передбачають використання спеціалізованого програмного забезпечення та дозволяють проводити більш точну оцінку енергетичних характеристик та теплового стану під час життєвого циклу будівлі.

На сьогоднішній день існує велика кількість програмних засобів для енергетичного моделювання, що відрізняються метою їх використання, використовуваними термодинамічними моделями, графічними інтерфейсами, періодами застосування та їх здатністю обмінюватися даними з іншими програмами. Використання таких програм допомагає краще зрозуміти

проблеми при проектуванні та експлуатації інженерних систем будівель. Такі програмні засоби як TRNSYS, DOE-2 та EnergyPlus, використовуються для аналітичного моделювання енергоспоживання будівель [32].

EnergyPlus є однією з найбільш передових загальнодоступних програм для моделювання енергоспоживання. Дана програма використовує кращі риси двох відомих засобів моделювання DOE-2 та BLAST, методики розрахунків в яких наближені до європейських стандартів. Порівняння технічних характеристик даних програмних засобів проводиться в статті [34], зокрема зазначається, що кожна така програма включає в себе сотні підпрограм, які працюють разом, щоб моделювати теплові та масові енергетичні потоки по всій будівлі. Комплексне моделювання є основною концепцією EnergyPlus [35], тому програма складається з трьох основних компонентів моделювання: модуль теплового і масового балансу (Heat and Mass Balance Simulation); модуль симуляції систем будівлі (Building Systems Simulation Manager) та сторонній інтерфейс для створення геометрії будівлі (Third-Party Interfaces). Менеджер моделювання (EnergyPlus Simulation Manager) контролює весь процес моделювання та здійснює ітераційні розрахунки між модулями [7].

Програма EnergyPlus здатна моделювати роботу традиційних систем опалення, охолодження, вентиляції, водопостачання та освітлення в будівлях, а також теплових насосів, сонячних систем тепло- та електропостачання тощо. Програма включає в себе такі можливості як моделювання енергоспоживання по зонам (враховуючи потоки повітря між зонами), розрахунок радіаційного теплообміну, поглинання вологи, десорбції, тощо. EnergyPlus використовує більш реалістичні умови управління різними системами ОВК ніж її попередники, що дозволяє отримувати точніші та надійніші результати моделювання. Програма має вбудовані шаблони типових систем вентиляції, охолодження, опалення та ін., котрі являються відправною точкою для користувачів. На основі шаблонів розробляються інші необхідні конфігурації цих систем. Моделювання в EnergyPlus забезпечує гнучкість і функціональність енергетичного аналізу протягом всіх етапів життєвого

циклу будівлі з деякими обмеженнями. Програма передбачає, що системи ОВК функціонують в ідеальних умовах, при цьому не враховуючи повільного спаду продуктивності компонентів енергетичних систем внаслідок забруднень, корозії та інших впливів, які зменшують продуктивність кліматичного обладнання. Особливістю програми є те, що вона проводить як погодинні симуляції на всіх рівнях так і по обраному користувачем періоду симуляції («проектний» день (design day), доба, місяць, рік або кілька років). Також EnergyPlus має базу даних з погодними умовами IWEC (International Weather for Energy Calculation) [36] для багатьох міст в різних країнах світу, в тому числі і для України (м. Київ та м. Одеса) [7].

Точність моделювання на пряму залежить від якості вхідних даних, що використовуються в моделі. Значним чином на результати впливають динамічні характеристики, які і відрізняють програмне моделювання від розрахунку за національним стандартом. До динамічних характеристик можна віднести режим роботи будівлі та погодні дані.

Таким чином метод динамічного моделювання широко застосовується для оцінки енергоспоживання, показників теплового комфорту та можливостей щодо підвищення енергоефективності будівель, зокрема в роботах [37-41].

Для аналізу температурних та швидкісних полів у приміщеннях будівлі може використовуватися метод чисельного моделювання в гідроаеродинаміці (CFD - Computational Fluid Dynamics), зокрема програмне середовище ANSYS Fluent. Чисельне моделювання в CFD вирішує диференціальні рівняння аеродинаміки та теплофізики у часткових похідних методом скінченних елементів. Даний метод полягає у розбитті розрахункової моделі на дискретні комірки, в яких здійснюються розрахунки [16].

Чисельна модель включає тривимірну модель досліджуваного приміщення з необхідною деталізацією; граничні умови, що враховують теплопровідність конструкцій; деталізовані моделі повітророзподільників та джерел тепла із заданими витратними та тепловими характеристиками тощо.

Результатом чисельного моделювання є можливість оцінити значення швидкості, температури та тиску повітря в кожній точці кімнати та інші показники, що впливають на мікроклімат у приміщенні. Можливість візуалізації результатів чисельного моделювання надає повну картину формування мікроклімату у кімнаті та дозволяє наочно продемонструвати, наприклад, якість обраної схеми повітророзподілу, а також якісно та кількісно порівняти різні варіанти проектних рішень. Зокрема, програмний пакет ANSYS Fluent широко використовується для виконання обчислень CFD, де на основі рівнянь безперервності, імпульсу та енергії програма дозволяє оцінити теплові та тривимірні поля течії [42] [16]. Умови CFD-моделювання приміщень можна спостерігати в роботах [43, 44].

В роботі [45] була досліджена можливість застосування CFD-моделі для характеристики поведінки повітрообміну під впливом опалення приміщення. Автори прийшли до висновку, що CFD метод доцільно використовувати для детальних досліджень теплового комфорту, якості повітря та споживання енергії. Використання спеціалізованого програмного забезпечення для гідродинамічного моделювання для ряду задач, пов’язаних з дослідженням теплового комфорту, якості повітря та потенціалу енергозбереження у приміщеннях, за різних розрахункових умов, розглянуто в роботах [42, 45-48]. Дослідники підтверджують точність результатів CFD-моделювання наявними експериментальними даними та той факт, що розроблені ними моделі можуть бути використані для прогнозування розподілу швидкості та температури повітря всередині приміщень [16].

На основі CFD-моделювання проводять обґрунтування використання того чи іншого розрахункового підходу, наведеного у стандартах. Наприклад, в роботі [42] імітаційна модель кімнати була використана для моделювання профілів швидкості та температури всередині приміщення, а також для розрахунку індексів теплового комфорту, відповідно до UNI 7730 [16].

CFD-модель кімнати з опаленням та природнім повітрообміном була чисельно змодельована для аналізу параметрів теплового комфорту в роботі

[46]. В публікації зазначено, що променева складова теплового потоку від приладу опалення значним чином вплинула на комфортну температуру в приміщенні. Там також виявлено, що незалежно від вибраної моделі турбулентності (k-ε чи k-ω) внутрішня температура, має подібний профіль. Згідно з висновками в цій роботі завдання адіабатних граничних умов для внутрішніх огороджувальних конструкцій є ідеалізацією та потребує врахування частки тепла яка проходить через ці конструкції, як це зробили, наприклад, для CFD-моделі в роботі [47] [16].

1.4 Сучасні тенденції підвищення енергетичної ефективності будівель

1.4.1 Енергоефективні режими роботи системи опалення

Більшість житлових будинків в Україні не досягають європейських показників енергоефективності. Через високий термін окупності власники будівель реалізують енергоефективні заходи поступово, зазвичай дотримуючись стратегії, яка в першу чергу включає підвищення теплоізоляції огороджувальних конструкцій будівлі, при цьому часто нехтуючи можливістю здійснення регулювання системи опалення за погодними умовами. Нормативні акти, що діють у багатьох західноєвропейських країнах, дотримуються двох стратегій, які, як правило, включають підвищення теплоізоляційної здатності огороджувальних конструкцій та зменшення тривалості роботи опалювальних приладів протягом доби [49, 11]. Тож для досягнення найбільшого ефекту від впровадження енергоефективних заходів важливо враховувати взаємодію між оболонкою будівлі та її інженерними системами (системи опалення, охолодження та вентиляції) при врахуванні динамічних умов всередині та ззовні.

Одним з найбільш ефективних методів економії теплової енергії, при забезпеченні комфортних температурних умов, є використання

переривчастого режиму для системи опалення. Такий режим полягає у зниженні температури, та відповідно теплового навантаження, системи опалення в неробочі години. Основною причиною відсутності широкого розповсюдження даного підходу в будівлях є низький рівень розкриття цього методу в літературі, а також невелика кількість практичних результатів впровадження. Недостатньо також і науково-обґрунтованих рекомендацій, які стосуються раціонального вибору переривчастого режиму [11].

Добовий режим роботи переривчастої системи опалення умовно можна розділити на три періоди [11]:

– початок роботи системи опалення (період натопу), під час якого температура у приміщенні підвищується від мінімально допустимої до розрахункової внутрішньої температури;

– період усталеного режиму, під час якого в приміщенні підтримується стала температура внутрішнього повітря;

– завершення роботи системи опалення (період остигання), під час якого температура у приміщенні знижується до мінімально допустимої.

У роботі [50] розглянуто різні режими переривчастого опалення та визначено економію при їх застосуванні.

Згідно з [51] тепловий потік під час розігріву приміщення набагато більше ніж під час усталеного режиму. Тож величина додаткової потужності системи опалення при переривчастому опаленні в нормальному та економічному режимах залежить від наступних показників [11]:

– кількість часу, необхідного для досягнення розрахункової внутрішньої температури;

– величина зниження внутрішньої температури по відношенню до розрахункової;

– теплоакумулююча здатність будівлі;

– повітрообмін під час розігріву.

У роботі [52] оптимізовано споживання енергії комбінованої системи теплопостачання в умовах переривчастого режиму. В роботі також

встановлено, що необхідно забезпечити максимальну продуктивність системи опалення в період нагрівання. У той же час визначено, що найбільша економія досягається для будинків з низькою теплоємністю. Таким чином необхідно розробити такий енергозберігаючий підхід, який забезпечить максимальну економію теплової енергії при мінімальних капітальних і експлуатаційних витратах. У роботах [50, 53, 54] також досліджено ефективність оптимального переривчастого режиму опалення [11].

Аналіз ефективності переривчастого режиму роботи системи опалення здійснюється за допомогою різних методів з урахуванням тих чи інших впливових факторів [11]. Вплив різних факторів на теплову поведінку сучасних будівель з різними системами опалення та їх режимами роботи досліджувався багатьма авторами. Загалом, виділено такі основні фактори, які впливають на тепловой режим будівлі [55]:

– зовнішні: температура навколишнього середовища, сонячна радіація та швидкість вітру;

– внутрішні: теплоємність будівлі та внутрішні теплонадходження.

Різні підходи до дослідження ефективності роботи системи опалення можуть враховувати контрольовані та неконтрольовані фактори [12]. У статті [56] порівнюються два підходи: квазістаціонарний та динамічний. Відповідно до [56] квазістаціонарний підхід може забезпечити лише приблизну оцінку енергоефективності, оскільки він не враховує тривалість реальних перехідних процесів за переривчастого режиму роботи системи опалення, а також не враховує накопичувальну здатність огороджувальних конструкцій будівлі, а лише їх опір теплопередачі. Цей метод розрахунку доцільно використовувати для визначення споживання енергії при переривчастому режимі роботи системи опалення в будівлях з відносно легкими конструкціями, а також в будівлях з великою площею засклення [11]. Важливість врахування динамічних характеристик в умовах режиму переривчастого опалення досліджується в роботі [57]. У статті [57] представлені результати розрахунків динамічних характеристик різних одношарових огороджувальних

конструкцій, виконані точним та наближеним методами нестаціонарної теплопровідності. Результати показують вплив динамічних характеристик матеріалів огороджувальних конструкцій на енергоспоживання в умовах переривчастого режиму. В роботі [58] детально досліджується процес охолодження будівлі при припиненні теплопостачання [11]

Порівняння стандартних та нових підходів до розрахунку енергопотреби при переривчастому режимі опалення наведено у статті [59]. Запропонований у [59] новий підхід підвищує якість поточної методики, наведеної в ISO 13790, та забезпечує більш точні результати. Для підтвердження якості розрахунків енергопотреби за досліджуваною методикою у статті [59] представлені також результати моделювання в програмному середовищі EnergyPlus.

Відомо, що швидкість досягнення комфортної внутрішньої температури на початку роботи системи опалення не регулюється нормами. Тому довжину перехідних процесів у переривчастому режимі можна розрахувати за допомогою динамічного підходу. Такий підхід враховує мінливість зовнішніх та внутрішніх факторів, опір теплопередачі огороджувальних конструкцій та внутрішніх перегородок, а також їх динамічні характеристики. Сучасне спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу енергоспоживання будівель зазвичай використовує динамічний підхід для досягнення високоякісних результатів [11].

Огляд засобів управління будівлею, орієнтованих на мешканців [60], показує доцільність вивчення та практичного розгляду впливу сонячної радіації на режими переривчастого опалення.

Стаття [61] містить аналіз впливу зовнішніх та внутрішніх факторів на показники енергоефективності будівель. У цій роботі прогноз середньодобового навантаження на систему опалення здійснюється шляхом використання нелінійних багатовимірних регресійних моделей, що базується на даних історії середньодобових показників.

Динамічну поведінку будівель у відповідь на фактори навколишнього середовища надзвичайно складно проаналізувати. Тому використовується

програмне забезпечення для динамічного моделювання, яке дозволяє враховувати теплоємністні характеристики будівельних конструкцій, а також зміну кліматичних умов з часом для дослідження теплового стану [5]. Такі програми дозволяють отримати якісні результати для прийняття рішень щодо підвищення енергоефективності на етапах проектування та експлуатації будівлі [62, 63]. В роботі [64] на основі математичного моделювання авторами було проведено аналіз впливу енергоефективних режимів роботи системи опалення на енергетичні показники будівель.

У статті [9] проведено порівняння результатів моделювання переривчастого режиму опалення з наявними фактичними даними про температуру в приміщенні. Створена в програмі динамічного моделювання енергетична модель квартири точно описує теплоінерційні властивості огороджень будівлі та дозволяє враховувати зміну зовнішньої температури з плином часу.

1.4.2 Енергоефективні режими роботи системи вентиляції

Програми державної підтримки енергозбереження орієнтовані в першу чергу на утеплення огороджувальних конструкцій та модернізацію систем опалення. Найменша увага приділяється питанням якості повітря в приміщеннях. Сучасні результати енергетичного аналізу будівель різного призначення в Україні показують, що 30-50% [65, 66, 67] теплоти, що надходить у будівлі, йде на нагрівання припливного повітря ззовні, що складає найбільшу частку в енергетичному балансі будівель [15].

Більшість досліджень в області вентиляції сфокусована окремо на тепловому комфорті, або на якості внутрішнього повітря, або на енергоспоживанні [68-71]. Значна частка досліджень включає перші два аспекти [72-76]. В роботі [76], на основі річних спостережень, поведінка мешканців названа ключовим фактором який, впливає на кратність повітрообміну, якість внутрішнього повітря та тепловий комфорт в житлових

будівлях. Але для найбільш оптимальної оцінки впливу повітрообміну доцільно враховувати всі три аспекти. Взимку робота вентиляційної системи пов'язана з додатковими втратами теплової енергії на нагрівання зовнішнього повітряного потоку, що надходить до приміщень. Тож питання повітрообміну необхідно розглядати комплексно, враховуючи не лише тепловий комфорт та якість внутрішнього повітря, а й вплив на енергетичні показники будівлі. З точки зору енергоефективності зменшення швидкості повітрообміну сприяє економії енергоресурсів. Зважаючи на ці принципово важливі критерії, визначення оптимального рівня повітрообміну є важливим завданням при проектуванні будівель та вентиляційних систем, а вивчення якості повітря в приміщенні та параметрів повітрообміну вимагає значної уваги при експлуатації та при термомодернізації для підвищення енергетичних стандартів як у низькоефективних, так і в енергетично ефективних будівлях [15].

Будь-яка вентиляційна система призначена для видалення зайвої вологи та забруднювачів повітря від внутрішніх джерел, замінюючи забруднене повітря в приміщенні свіжим зовнішнім повітрям. Автори [77] провели дослідження концентрації CO_2 у житловому будинку в Словаччині до та після реконструкції. Було встановлено, що після реконструкції повітрообмін значно зменшується, а рівень CO_2 в приміщеннях підвищується. Таким чином реалізація заходів щодо поліпшення теплозахисних властивостей огороджувальної конструкції будівлі повинна супроводжуватися впровадженням заходів щодо забезпечення необхідної якості повітря в приміщеннях (механічною вентиляцією) [13]. На сьогоднішній день переважна більшість будівель в європейських країнах з м'яким кліматом не обладнані механічною системою вентиляції, а повітрообмін забезпечується лише природнім шляхом. Хоча стратегію природної вентиляції можна в певній мірі контролювати, деякі дослідження доводять неефективність такого підходу з точки зору якості внутрішнього повітря, тому що низький рівень повітрообміну може не забезпечити видалення всіх внутрішніх забруднювачів,

а їх концентрація – перевищувати допустимі вимоги [68, 78]. Наприклад, дослідження концентрації формальдегіду в житлових будинках в [79] показує, що для забезпечення допустимої концентрації формальдегіду необхідно мати припливну вентиляційну систему або забезпечити газофазну фільтрацію. Є також дослідження які вказують на те, що відносно помірний рівень повітрообміну може бути достатніми для забезпечення адекватної якості повітря [80, 81].

Дослідження необхідного рівня повітрообміну почали проводитися на початку XX століття [82]. Перші стандарти були орієнтовані лише на забезпечення якості внутрішнього повітря, але з часом рекомендовані значення кратності обґрунтовувалися і з енергетичних міркувань [83]. В 1973 році було опубліковано один з найвдаліших стандартів щодо вентиляції ASHRAE 62. Багато країн, в тому числі європейські, використовували вимоги щодо повітрообміну житлових приміщень, подібні до тих, що зазначені у Стандарті 62.2 “Вентиляція та допустима якість повітря в малоповерхових житлових будинках” [82]. На сьогоднішній день стандарт 62 містить обґрунтування основних вимог до швидкості вентиляції та розрахунків вимог до зовнішнього повітря, що надходить в приміщення, для мультизонних систем. У випадку стандарту 62.2, який охоплює малоповерхові житлові будинки, ASHRAE розробила супутнє керівництво для підтвердження високої якості внутрішнього повітря IAQ [84].

Нормативні документи, що стосуються вентиляції житлових приміщень, відрізняються в залежності від країни де вони застосовуються. Відповідно до європейських нормативних актів Directive 2010/31/EU та Directive 2012/27/EU, оновлених в 2018 та 2019 роках відповідно, країни Європейського Союзу повинні використовувати національні вимоги щодо енергоефективності, які дозволяють проводити міжнародне порівняння [85]. Національні стандарти країн ЄС не визначають конкретного підходу до вентиляції житлових будівель. В більшості країн може застосовуватися як природня система вентиляції, так і механічна чи гібридна. Норма повітрообміну у більшості

стандартів країн ЄС визначена за одним або декількома методами, описаними в EN 16798 [86] (раніше EN 15251), де повітряний потік визначається в л/с на $м^2$, л/с на особу або через кратність повітрообміну в $год^{-1}$. При цьому майже кожна країна визначає власне положення з точки зору місцевого витяжного потоку повітря (л/с або $год^{-1}$). В Україні цей стандарт введений в якості національного [15].

Необхідна витрата повітря у приміщеннях за EN 16798 має бути розрахована з урахуванням всіх наявних внутрішніх джерел забруднення. Стандарт визначає показники якості внутрішнього повітря для приміщень житлових будинків з вентиляцією трьох основних типів:

– витяжна вентиляція приміщень з підвищеною вологістю (кухня, ванна кімната, туалет) для усунення місцевих забруднень;

– загальна вентиляція всіх приміщень, що враховує можливість перенесення повітряних потоків з житлових кімнат через коридори до кімнат з підвищеною вологістю;

– загальна вентиляція приміщень, які характеризуються підвищеними вимогами до якості повітря (спальня, вітальня).

В Україні стандарт EN 15251 був запроваджений як національний. Тож рекомендовані значення щодо повітрообміну співпадають з тими, що наведені в EN 16798. Українські державні будівельні норми для житлових будинків ДБН В.2.2-15:2019 [87] також містять вимоги щодо вентиляції у вигляді мінімальних значень кратності повітрообміну та витрати повітря для приміщень різного призначення (вітальня, спальня, офіс, кухня, санвузол).

Більшість стандартів не дають чіткого підходу для встановлення нормативного повітрообміну, а лише рекомендують ту чи іншу стратегію для розрахунку. Тож проектувальники мають приймати власне рішення, обґрунтовуючи його на основі національних стандартів. Для енергетичних розрахунків зазвичай використовуються значення кратності повітрообміну, рекомендовані національними стандартами. В Україні та в країнах центральної та східної Європи, при проведенні енергетичних аудитів будівель,

існує практика застосування значень постійної кратності повітрообміну для будівлі в цілому. Але в національних стандартах також передбачено, що кратність повітрообміну всередині будівлі може бути визначена в ході випробувань [15].

Експериментальне визначення кратності повітрообміну, при врахуванні організованого повітрообміну та неконтрольованих потоків повітря, для зміни умов експлуатації є складним завданням. На точність вимірювань також впливають динамічні параметри, такі як різниця температур всередені-ззовні, зовнішній тиск, а також напрям і швидкість вітру [75].

Існують різні методи вимірювання швидкості обміну повітря, наприклад тести на SF6 [88], але зазвичай вони досить складні та дорогі. На основі польового експерименту з метою визначення природного повітрообміну для будівель у Південному Китаї та Європі було проведено ряд досліджень [89, 90]; дослідження вимагають спеціального обладнання та забезпечують середнє уявлення про повітрообмін з урахуванням мінливості внутрішніх та зовнішніх параметрів, що впливають на повітрообмін з часом. Зручний метод моніторингу швидкості повітрообміну за допомогою стаціонарних датчиків CO_2 був розроблений та випробуваний як в лабораторних експериментах, так і в польових дослідженнях у класах в Китаї [91]. У статтях [92, 93] використовувалися подібні підходи [13].

Для шкіл в Центральній Іспанії з природним повітрообміном [94], що здійснюється через відкривання вікон, було проведено дослідження концентрації CO_2 у класах в періоди опалення та кондиціонування. Результати дослідження містять рекомендації щодо часу провітрювання класів, яке варіюється від 5 до 20 хвилин, в залежності від ряду внутрішніх та зовнішніх факторів. Проблеми високого рівня концентрації CO_2 характерні і для шкіл в Україні [95]. В статті [96] розглянуто експлуатаційно-поведінкові фактори природного провітрювання та виділення CO_2 в початковій школі, а також досліджено зміну концентрації CO_2 залежно від адаптивної поведінки мешканців/учнів, схеми розміщення, коефіцієнту вироблення CO_2 та кількості

учнів, що в свою чергу обумовлює якість повітря в приміщенні. Середній рівень CO_2 в навчальних класах знаходився на рівні 900 ppm [13]. Внутрішню температуру, концентрацію CO_2 та кратність повітрообміну в періоди опалення та охолодження було також досліджено в 145 класах шкіл Швеції, обладнаних вентиляційними систем з контролем витрати повітря [73]. За результатами моніторингу в шести із семи шкіл ці показники відповідали нормам EN 15251 (зараз EN 16798).

В статті [97] автори відзначають недостатню точність та спірність методів визначення природного повітрообміну. В роботі стверджується, що різниця між різними методами оцінки може становити від 10% до 300%, демонструючи тим велику розбіжність. Порівняно з іншими методами, метод балансів CO_2 широко використовується в польових вимірах, і результати його застосування є відносно стабільним [97]. На прикладі будівель для утримання худоби автори [97] обґрунтовують розташування датчиків CO_2 для подальшого розрахунку різниці концентрацій внутрішнього та зовнішнього середовища.

Через важливість забезпечення, в першу чергу, комфортних умов для сну, особлива увага в багатьох дослідженнях приділяється саме якості внутрішнього повітря та рівня повітрообміну в спальнях [68, 69, 98, 99, 100]. Низька кратність повітрообміну в спальні призводить до підвищення концентрації CO_2, CO та інших забруднювачів повітря, таких як леткі органічні речовини, формальдегід та дисперсні частки PM2.5. При природній вентиляції приміщень підвищення швидкості повітрообміну здійснюється шляхом відкриття дверей та вікон, що в свою чергу може сприяти інфільтрації забруднювачів з інших джерел, наприклад ззовні чи з інших приміщень житла [68]. В Португалії в житлових будинках зазвичай змінюють стратегію вентиляції після термомодернізації шляхом зменшення витрати електричної енергії, необхідної для нормальної роботи системи вентиляції [101]. В статті [101] досліджено якість повітря (рівень CO_2) в 15 спальнях житлового будинку. Встановлено, що кратність повітрообміну коливалася від 0,18 до 0,53

год$^{-1}$, коли механічна витяжна вентиляція була вимкнена, та від 0,45 до 0,90 год$^{-1}$, – коли ввімкнена. При переривчастому режимі роботи вентиляції в більшості спалень концентрація CO_2 була вища 2000 ppm. Враховуючи зв'язок між моніторинговим CO_2 та людськими і просторовими факторами, в роботі виділено два релевантні параметри. Авторами [101] запропонована формула, що враховує співвідношення між утворенням CO_2 та площею підлоги кімнати на основі запропонованих параметрів.

Результати дослідження кратності повітрообміну за рівнем концентрації CO_2 в 500 природно вентильованих дитячих спальнях в Данії [102] говорять про те, що в 57% цих кімнат кратність повітрообміну менша мінімальної нормативної в цій країні 0,5 год$^{-1}$, і в середньому становила 0,46 год$^{-1}$. За результатами вимірювання повітрообміну за рівнем концентрації CO_2 в 391 житлових будівлях міста Тяньцзінь, в Китаї, кратність повітрообміну в період осені, зими та весни для всього житла варіюється в межах 0,28-0.3 год$^{-1}$, для дитячих спалень – 0,32-0,41 год$^{-1}$ [103]. В [98] представлено огляд результатів досліджень кратності повітрообміну у спальнях та житлі в цілому для різних кліматичних зон та для різних пір року. В більшості результатів вимірювань в житлі з природньою вентиляцією та при опалювальному сезоні кратність повітрообміну була менша ніж 0,7 год$^{-1}$, що є критерієм найвищого загального повітрообміну житла як в ASHRAE, так і в CEN.

Альтернативний метод визначення рівня повітрообміну полягає у використанні емпіричних методів визначення швидкості повітрообміну на основі стандартів ASHRAE та BLAST. Вентиляція створюється на основі трьох механізмів: стак ефект, вітровий ефект та робота механічної системи, при цьому перші два стосуються природної складової. Серед цих механізмів ефект вітру має найскладніший характер і залежить від поверховості, орієнтації швидкості руху та напрямку вітру та іншого [104]. Емпіричні підходи знайшли відображення в програмному забезпеченні для розрахунку енергетичних показників будівель, найбільш поширені: eQuest, EnergyPlus, TRNSYS, DOE2, DesignBuilder та Ecotect Analysis. Наприклад, в [105]

запропоновано метод оцінки інфільтрації в комерційних будівлях за допомогою EnergyPlus, який враховує величину швидкості вітру, різницю температур (більшість емпіричних методів враховує лише температурний ефект), але не враховує напрямок вітру [15].

Зважаючи на обмежену кількість досліджень повітрообміну при експлуатації будівель в Україні і країнах Центральної та Східної Європи актуальним є поєднання аналізу якості повітря з рівнем повітрообміну і потребою на опалення для житлових приміщень будівель. У даній роботі вплив розподілу повітрообміну в приміщеннях квартири вивчається на базі результатів експериментального визначення кратності за методом вимірювання концентрації CO_2 та використання значень, рекомендованих діючими нормативами. Для кількісної оцінки впливу статичних та динамічних факторів застосовувалися програми для енергетичного моделювання будівель. Одним з найбільш популярних підходів до оцінки енергетичних показників будівель є використання програми EnergyPlus разом з користувацьким інтерфейсом DesignBuilder. За допомогою даного програмного забезпечення було отримані дані у місячному розрізі щодо теплового навантаження та енергоспоживання досліджуваного приміщення квартири при різних режимах повітрообміну, заданих виходячи з результатів експерименту та діючих норм. В даній роботі дослідження дозволяють оцінити енергетичну ефективність використання природної вентиляції в квартирі, а також проаналізувати наведені підходи до задання повітрообміну в енергетичних розрахунках [15].

Висновки до розділу 1 та постановка завдань дослідження

Проведений огляд наукових робіт в області досліджень дозволяє зробити наступні висновки:

1. Необхідність зменшення обсягів використання природних ресурсів, скорочення обсягів шкідливих викидів та споживання енергії в останні десятиріччя призвела до вивчення нових аспектів енергоефективності

в будівлях. В західних країнах останнім часом дотримуються напрямків, які включають не лише термомодернізацію огороджувальних конструкцій, а й регулювання режимів роботи інженерних систем. В Україні питання пов'язані з режимами роботи інженерних систем потребують розвитку.

2. Аналіз ефективності роботи інженерних систем може виконуватися за різними підходами, які враховують контрольовані та неконтрольованих фактори впливу. Тож врахування динамічної поведінки будівлі, в основі якої взаємодія між температурним режимом всередині та факторами, які впливають на нього, є основою якісного дослідження теплового стану будівлі та ефекту від впроваджених заходів з підвищення енергоефективності.

3. Доцільно використовувати програмне забезпечення для динамічного моделювання, яке дозволяє враховувати теплоємністні характеристики будівельних конструкцій, експлуатаційний режим, а також зміну кліматичних умов у часі, так як оціночні розрахунки по наближеним методикам не дозволяють отримати цілісну картину взаємодії всіх факторів.

4. Для якісної оцінки впливу повітрообміну необхідно враховувати три ключові аспекти: тепловий комфорт, якість внутрішнього повітря та вплив на енергоспоживання. Ефективність режиму вентиляції будівлі з точки зору енергоспоживання в значній мірі залежить від діючих вимог до повітрообміну в приміщеннях різного призначення та експлуатаційного режиму використання цих приміщень.

За результатами проведеного огляду потребують розвитку та аналізу питання підвищення ефективності управління режимами роботи інженерних систем будівель шляхом динамічного моделювання, яке враховує вплив динаміки внутрішніх та зовнішніх факторів. Тому були сформовані наступні завдання дослідження:

– розробка динамічних моделей приміщень в спеціалізованому програмному забезпеченні для вивчення теплового стану та енергетичних показників динамічних режимів будівель;

– аналіз впливу контрольованих та неконтрольованих факторів на режими роботи систем опалення та вентиляції на базі моделей, створених в програмному середовищі Energy Plus;

– експериментально-розрахункове дослідження динаміки мінливості показників теплового комфорту в приміщеннях та застосування результатів для оцінки енергетичних показників шляхом моделювання;

– аналіз енергетичних показників роботи системи опалення (підсистеми тепловіддачі) методом CFD-моделювання.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ БУДІВЛІ

2.1 Загальна схема проведення досліджень

В роботі проводилося дослідження енергетичних показників будівель різного призначення за динамічного режиму роботи інженерних систем. В якості репрезентативних було обрано існуючі житлове приміщення (квартиру) та громадську будівлю.

При визначенні енергетичних показників будівель за діючими методиками розрахунку вплив зміни деяких факторів враховується частково, або не враховується взагалі. Наприклад, динаміка зміни зовнішньої температури за національним стандартом може враховуватися погодинно, як і вплив сонячних теплонадходжень. В той же час підходи до врахування динаміки зміни внутрішніх теплонадходжень та рівня повітрообміну не передбачені у стандарті. Отже, якісний розрахунок енергетичних показників є складною задачею, яка має враховувати взаємодію між температурним режимом всередині та факторами, які впливають на нього у часі. Тому в даній роботі для проведення досліджень було обрано спеціалізовані програми для динамічного моделювання будівель.

Окрім оцінки фактичного енергетичного стану будівлі, динамічне моделювання дозволяє дослідити зміну енергетичних показників при зміні теплотехнічних характеристик огороджувальних конструкцій, обладнання, та при оптимізації режимів роботи інженерних систем. За допомогою енергетичного моделювання було проведено оцінку різних варіантів інженерних рішень при використанні наступних вихідних даних:

– погодинні кліматичні умови (дані щодо зовнішньої температури, швидкості та напряму вітру, сонячної радіації);

– погодинні графіки перебування людей;

– погодинні графіки внутрішньої температури повітря;

– погодинні графіки кратності повітрообміну;

– погодинні графіки роботи електричного обладнання та освітлення.

В залежності від задач що ставалися, енергетичний аналіз розглянутих об'єктів було проведено за різних кліматичних умов. Для дослідження роботи переривчастого режиму опалення використовувалися різні температурні режими, а для оцінки впливу рівня повітрообміну – різні графіки розподілення кратності. Було використано динамічне моделювання різного рівня деталізації та складності.

Так як в програмному середовищі EnergyPlus можна моделювати реальні умови роботи традиційних інженерних систем (опалення, охолодження, вентиляції) та використовувати фактичні умови управління системами ОВК, для обох об’єктів застосовувалися дані, що враховують фактичні особливості функціонування, включаючи інженерні системи, експлуатаційний та температурний режим, динаміку внутрішніх теплонадходжень та рівень повітрообміну. Тож створені енергетичні моделі житлового приміщення та громадської будівлі відображають їх роботу в реальних умовах.

Структура роботи програми наведена на рисунку 2.1.

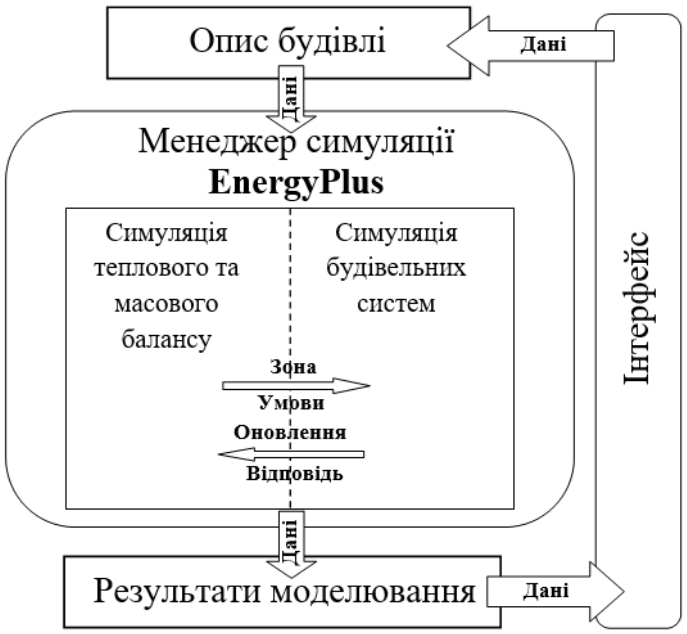


Рис. 2.1 – Структура роботи програми

Менеджер симуляції EnergyPlus управляє модулями теплового та масового балансу між поверхнями та середовищем та виступає в якості

сполучної ланки для поєднання моделювання теплового балансу та енергетичних інженерних систем будівлі (рис. 2.1). В якості інтерфейсу для введення і виведення інформації використовувався DesignBuilder для житлового приміщення та SketchUp (з плагіном Open Studio Plug-in) для громадської будівлі.

Результати моделювання об'єктів представлені для різних часових інтервалів представлення розрахунків (рік, місяць, доба, година). Для підвищення точності результатів моделювання, певні частини вихідних даних моделей були опрацьовані більш детально і базуються на результатах експериментальних вимірювань.

Фактичний рівень повітрообміну у будівлях вивчений недостатньо та при енергетичних розрахунках базується на показниках кратності, що рекомендуються у діючих стандартах. З метою врахування впливу зміни повітрообміну з часом на енергетичні показники експериментальним шляхом досліджувалася кратність методом вимірювання концентрації CO_2. Отримані дані щодо кратності повітрообміну було використано в якості вихідних даних у вигляді графіків повітрообміну при моделюванні житлового приміщення. Використання фактичних значень по повітрообміну дозволило проаналізувати рекомендовані стандартами нормативні значення та оцінити вплив динаміки та розподілення повітрообміну між кімнатами на енергетичні показники.

Методом погодинного моніторингу було проведено дослідження фактичного профілю внутрішньої температури. Отримані графіки були використанні для коригування температурного режиму, заданого в енергетичній моделі, а також для аналізу інерційності системи опалення.

В якості репрезентативного приміщення для визначення енергетичних показників роботи підсистеми тепловіддачі було обрано житлову кімнату досліджуваної квартири. За допомогою програми для моделювання гідродинамічних процесів Ansys Fluent проведено аналіз постійного та переривчастого режимів опалення. Моделювання розрахункової області проводилося в стаціонарному та нестаціонарному режимах. Застосування

нестаціонарного режиму дозволило оцінити швидкість розігріву та охолодження приміщення. У стаціонарному режимі було проведено оцінку показників впливу приладу опалення на енергоефективність підсистеми тепловіддачі (коефіцієнтів, що враховують питомі тепловтрати через зовнішні огороджувальні конструкції та вплив температурного напору) на основі даних про розподіл внутрішньої температури.

2.2 Розробка динамічних моделей для дослідження теплового стану та енергетичних показників будівель

2.2.1 Енергетична модель для визначення енергетичних показників громадської будівлі

В якості об’єкта дослідження теплового стану було обрано одноповерхову громадську будівлю в місті Києві. 3D-модель будівлі, розроблена в SketchUp, наведена на рисунку 2.2.

Рис. 2.2 – 3D візуалізація об’єкту [8]

Режим роботи будівлі: з дев’ятої ранку до шостої години вечора кожного дня, окрім суботи та неділі.

Нижче наведені дані про основні розмірні параметри (таблиця 2.1) та матеріали конструкцій одноповерхової будівлі (таблиця 2.2 та 2.3).

Таблиця 2.1 − Основні розмірні показники

Площа забудови, $м^2$	Висота будівлі, м	Об’єм будівлі, $м^3$
144	3,5	505

Таблиця 2.2 − Опис конструктивних елементів будівлі

Конструктивні елементи	Детальний опис
Фундамент	Монолітні залізобетонні панелі під цегляні стіни
Стіни	Цегляні, оштукатурені, утеплені з півдня та заходу мінеральною ватою, з півночі - пінополістиролом
Перегородки	Цегляні, оштукатурені
Дах	Залізобетонні плити, утеплений керамзитовим насипом, вкритий руберойдом
Вікна	Двокамерний склопакет з двома низькоемісійними покриттями та аргоном, профіль 5-камерний
Двері вхідні	Металеві з ізоляційним матеріалом
Двері внутрішні	Дерев’яні

Таблиця 2.3 − Матеріали огороджувальних конструкцій (ОК) за орієнтацією по сторонах світу

ОК	Орієнтація ОК	Матеріали	δ, м
Зовнішні стіни	Пд, Зх	Мінеральна вата	0,1
		Цегла	0,5
		Штукатурка	0,01
	Пн	Пінополістирол	0,1
		Цегла	0,5
		Штукатурка	0,01
Вікна	Пд, Пн	*і*-скло	0,004
		Аргон	0,01
		скло	0,004
		Аргон	0,01
		і-скло	0,004

Продовження таблиці 2.3.

ОК	Орієнтація ОК	Матеріали	δ, м
Підлога		З/б плита	0,25
		Цементна стяжка	0,02
		Керамічна плитка	0,012
Дах		Руберoїд	0,015
		Керамзит	0,1
		З/б плита	0,22
Двері	Зх, Пн	Сталь	0,0008
		Ізоляційний матеріал	0,025
		Сталь	0,0008

Для створення геометрії даної будівлі використано програму Google Sketch Up разом з модулем Open Studio Plug-in для побудови моделі енергоспоживання (рисунок 2.3). Дане рішення позбавляє необхідності вводити координати кожного елементу конструкції в текстових файлах EnergyPlus.

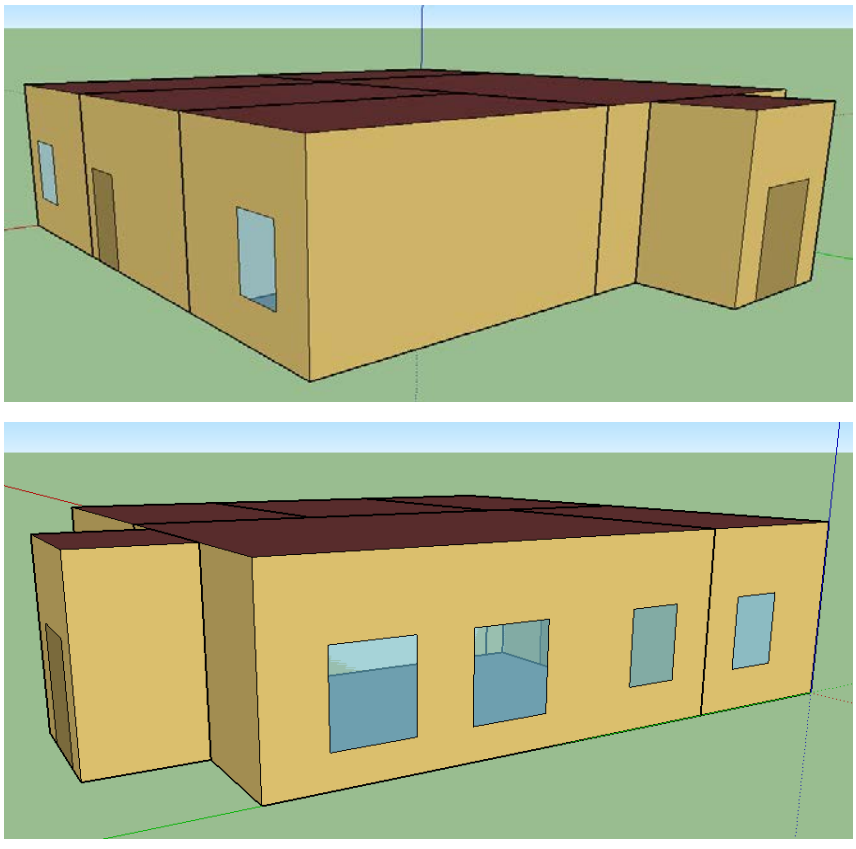


Рис. 2.3 − 3D модель будівлі в Google Sketch Up [32]

При побудові 3D геометрії внутрішній об’єм будівлі було розділено на шість зон, для того, щоб в перспективі, використовуючи EnergyPlus, врахувати різні температурні режими в різних кімнатах (рисунок 2.4).

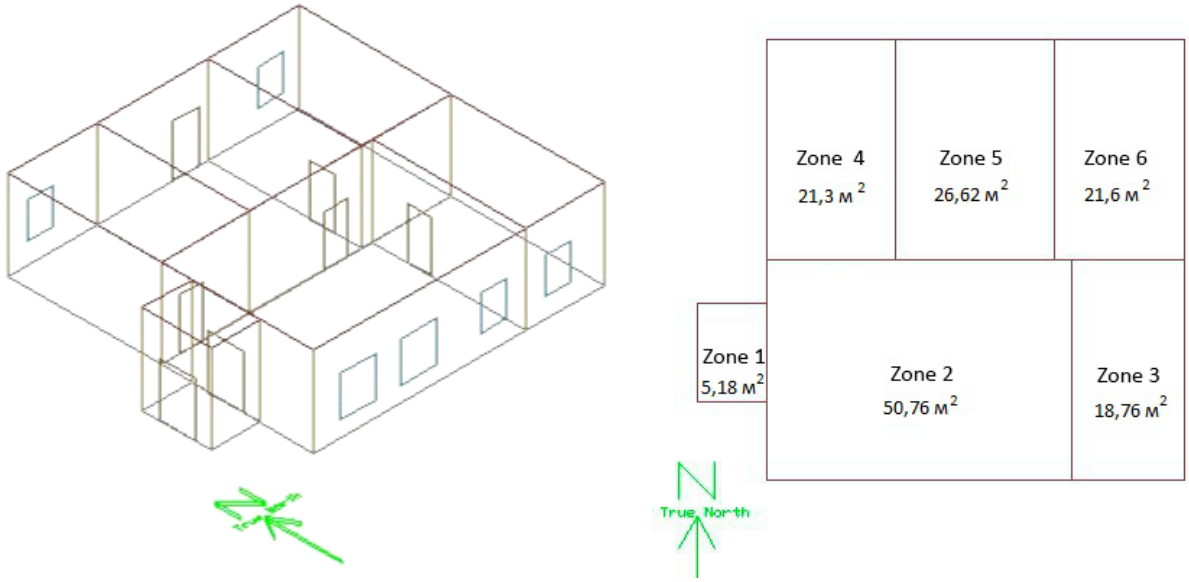


Рис. 2.4 − 3D модель будівлі та вигляд зверху [7]

Підлога на ґрунті не утеплена. Для моделювання теплопередачі через ґрунт та отримання найбільш точних даних щодо температур ґрунту в точці контакту з фундаментом використовувалася підпрограма Slab, яка призначена для визначення середньомісячної температури ґрунту в точці контакту з фундаментом. Програма Slab прораховує еквівалентну плиту з відповідним периметром і область навколо та під нею, моделюючи теплопередачу через плиту протягом ряду років (заданий період − 10 років), поки збіжність температур не буде досягнута. Область, вибрана для моделювання ґрунту, включає 15 м поверхні ґрунту навколо фундаменту та 15 м вглиб від фундаменту.

Система опалення даної будівлі водяна, живиться від центральної системи теплопостачання. Регулювання якісне. Температурний режим у зонах 2-5 будівлі, для опалювального періоду, підтримується на рівні 18°С. Зона 1 неопалювальна.

Так як програма EnergyPlus не має можливостей щодо створення

радіаторної водяної системи опалення, в даній моделі було застосовано найбільш близьку за характеристиками до радіаторної – плінтусну водяну систему опалення. В програмній моделі система пов'язаних між собою елементів була створена відповідно для кожної опалювальної зони будівлі. Остаточний вигляд системи опалення будівлі (як вона була задана в програмі EnergyPlus) показано на рисунку 2.5.

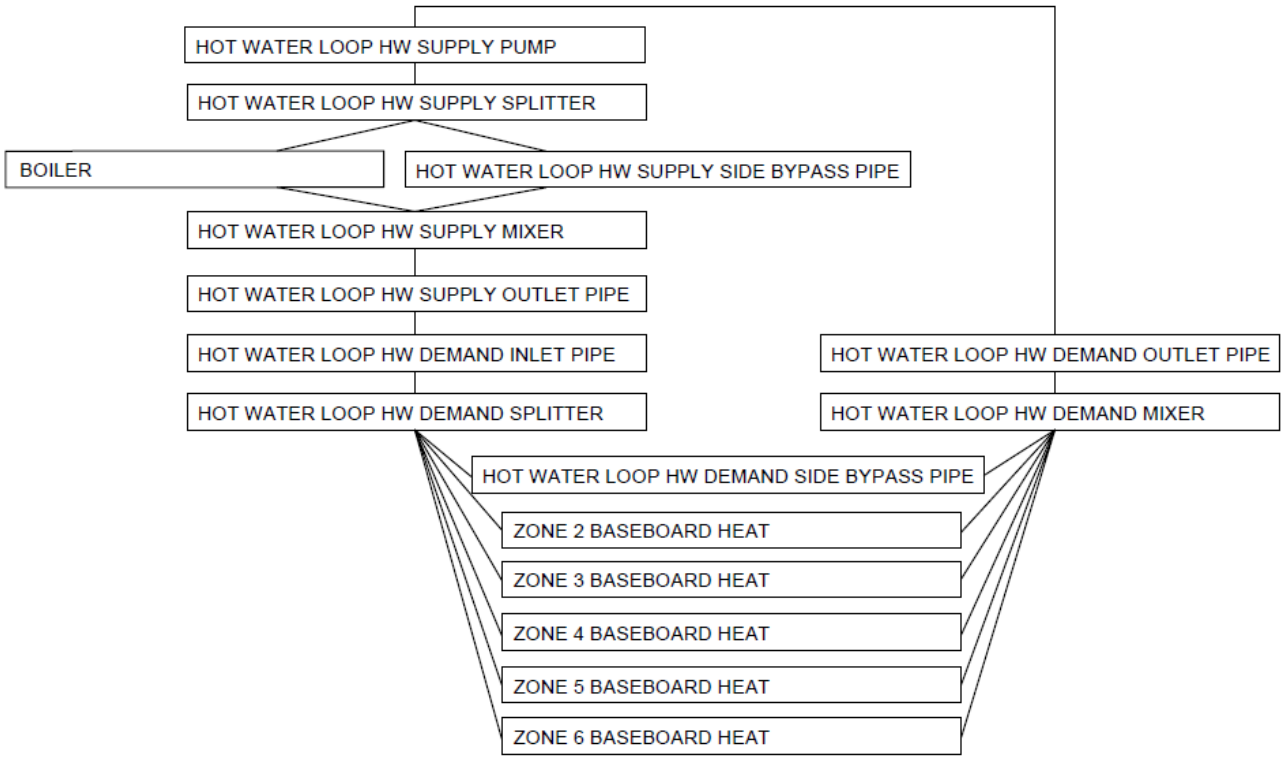


Рис. 2.5 – Контур опалення будівлі, побудований в EnergyPlus [5]

Приточно-витяжна система вентиляції встановлена у трьох зонах будівлі (зони 2, 4 та 6):

– зона 2: приточно-витяжна установка ВЕНТС ВУТ 600 ПЭ ЕС, $V = 0{,}19$ м^3/с;

– зона 4: приточно-витяжна установка Вентс Микра 150 Э, $V = 0{,}042$ м^3/с;

– зона 6: приточно-витяжна установка Вентс Твинфреш РА-50, $V = 0{,}014$ м^3/с.

Інфільтрація в зонах, де немає механічної системи вентиляції (зони 3 та

5), задана за допомогою кратності повітрообміну на рівні 1 год$^{-1}$.

Телонадходження від людей, системи освітлення та електричного обладнання задані наступним чином. Максимальна кількість людей, яка одночасно може знаходитися в офісі складає шість чоловік. У зв'язку з тим, що протягом дня кількість людей змінюється, тобто, використання системи освітлення та електричного обладнання також змінюється, були створені графіки (рисунок 2.6).

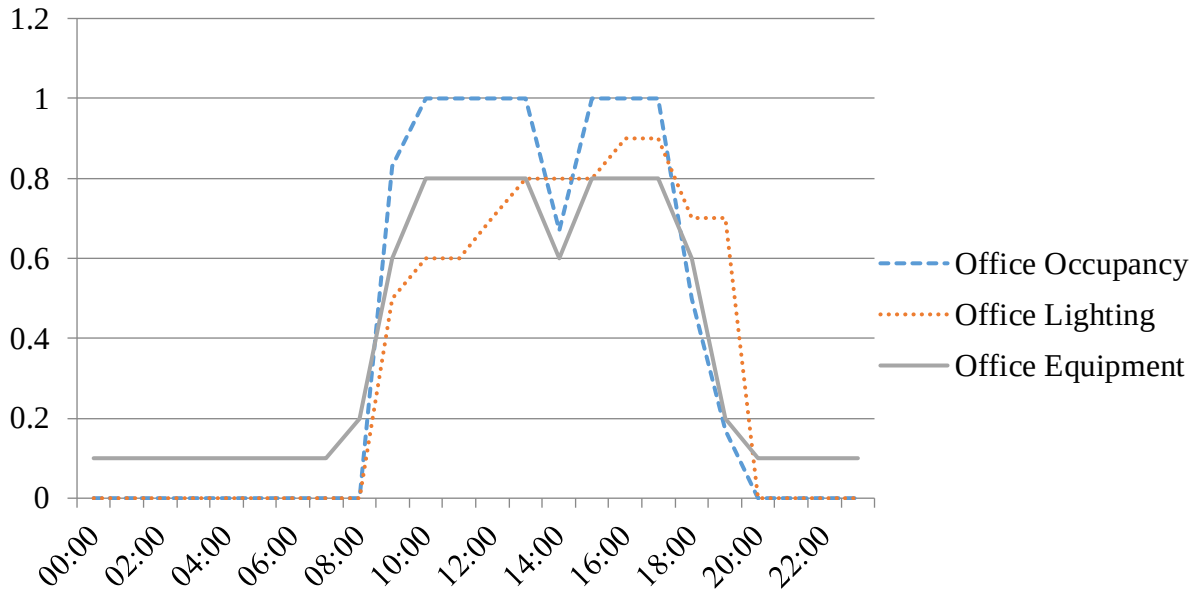


Рис. 2.6 – Графік офісної активності, роботи системи освітлення та використання електричного обладнання протягом доби

В години максимального навантаження освітлення в будівлі задано на рівні 8 Вт/м^2, а електричне обладнання на рівні 10 Вт/м^2.

Таблиця 2.4 – Характеристика внутрішніх теплонадходжень

Джерело теплонадходжень	Люди	Освітлення	Обладнання
Конвективна складова	0,5	1	1,
Променева складова	0,3	0,72	0,3
Прихована складова	0,5	0	0

Дослідження ефективності використання переривчастого режиму опалення проводилося для зони 4 даної будівлі (рисунок 2.7). Приміщення має

внутрішні розміри 6×3,5 м та дві зовнішні стіни (стіна, довжиною 6 м орієнтована на захід, 3,5 м – на північ). Зовнішні стіни виконані з цегляної кладки товщиною 0,5 м, утеплені з заходу мінеральною ватою, з півночі – пінополістиролом, товщиною 0,1 м. Вікно, розміром 1×1,4 м. Внутрішні стіни виконані з цегли товщиною 0,125 м [7]. Вентиляція приточно-витяжна з продуктивністю 0,042 м^3/с.

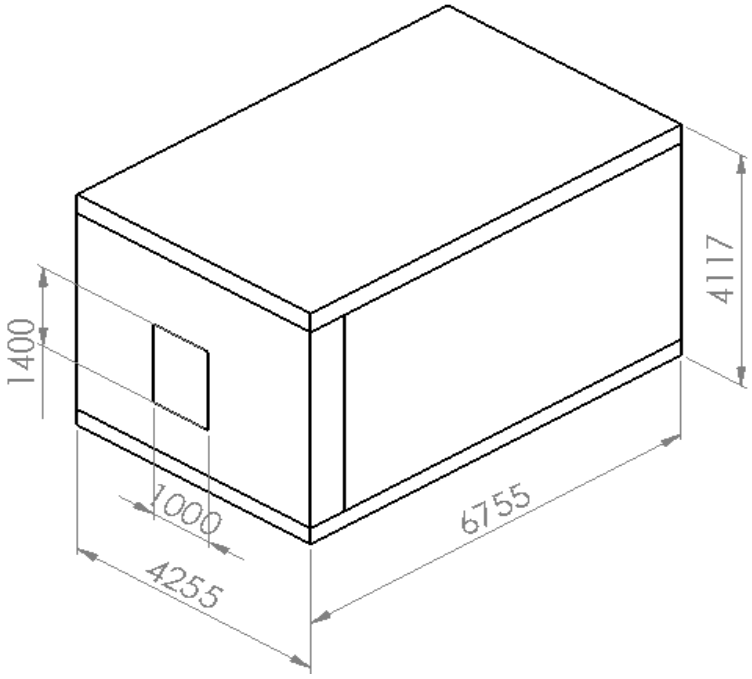


Рис. 2.7 – Модель зони 4 з розмірами

2.2.2 Енергетична модель для визначення енергетичних показників житлового приміщення

В якості об’єкта дослідження теплового стану було обрано існуюче житлове приміщення. Це двокімнатна квартира, розміщена на четвертому поверсі п’ятиповерхового житлового будинку м. Києва, побудованому у 2016 році. Досліджувана квартира має дві зовнішні стіни. Загальна площа приміщень квартири, без балкону, становить 49,44 м^2, висота приміщень – 2,7 м. Базові геометричні параметри досліджуваної моделі квартири представлено на плані на рисунку 2.8.

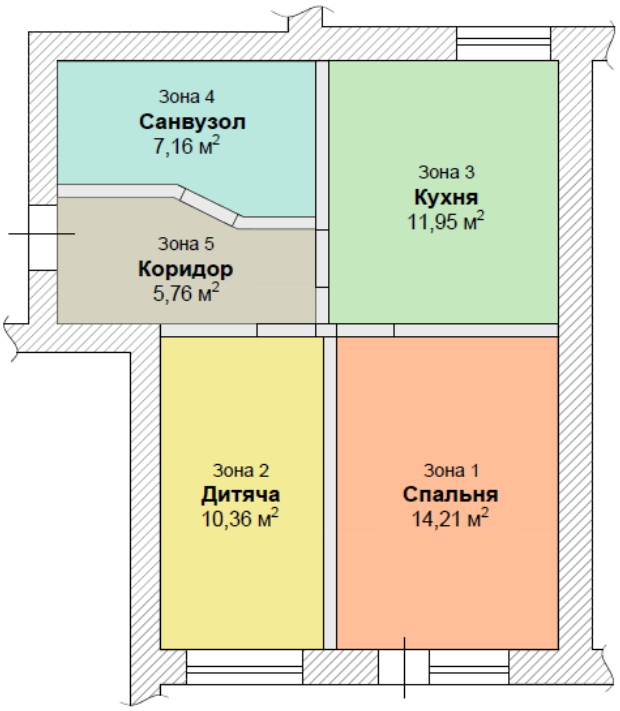


Рис. 2.8 – План об’єкту дослідження [15]

Модель приміщення створена в програмному забезпеченні DesignBuilder, яке використовує двигун EnergyPlus для виконання динамічного моделювання енергетичних потоків [11]. При створенні енергетичної моделі приміщення квартири було розділено на п’ять зон, відповідних кімнатам: дві спальні, кухня, санвузол та коридор. Таке рішення пов’язано з необхідністю врахування того факту, що кожна кімната квартири має специфічні поведінкові та експлуатаційні характеристики. Дані щодо площі та опору теплопередачі огороджувальних конструкцій об’єкту дослідження зведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Характеристика огороджувальних конструкцій

Тип конструкції	Конструкційний шар, *i*	Товщина шару, δ_i, мм	Коефіцієнт теплопровідності, λ_i, Вт/(м·К)	Опір теплопередачі конструкції[1], R_i, м²·К/Вт	Площа конструкції, A_i, м²
Зовнішні стіни	Гіпсова штукатурка	10	0,4	1,506	16,1
	Керамічна цегла	400	0,58		
	Мінеральна вата	50	0,043		
	Зовнішнє оздоблення	10	0,5		
Вікна та балконні двері	Склопакет з потрійним склінням з двома низькоемісійними покриттями і заповненням аргоном		-	0,945	7,47
Внутрішні перегородки	Гіпсова штукатурка	10	0,4	-	-
	Керамічна цегла	125	0,58		
	Гіпсова штукатурка	10	0,4		
Міжповерхове перекриття	Цементно-піщана стяжка	10	0,93	-	49,44
	Залізобетонна плита	200	2,04		
	Цементно-піщана стяжка	10	0,93		

[1] – опір теплопередачі зовнішніх стін визначений з урахуванням теплопровідних включень.

Зовнішні стіни є термічно неоднорідними конструкціями. Теплопровідні включення, що відносяться до наявної непрозорої огороджувальної конструкції, – відкоси віконних та дверного прорізів, а також примикання зовнішніх стін до балконного перекриття. Для вказаних теплопровідних включень за даними Додатку Г ДСТУ Б В.2.6-189:2013 [106] було визначено кількісні показники лінійних коефіцієнтів теплопередачі шляхом екстраполяції наведених даних для товщини теплоізоляційного шару 50 мм (таблиця 2.6).

Таблиця 2.6 – Лінійні коефіцієнти теплопередачі наявних теплопровідних включень

Найменування теплопровідного включення	Довжина, L, м	Лінійний коефіцієнт теплопередачі, k, Вт/(м·К)
Віконний відкос в зоні перемички	1,3	0,082
	1,6	0,082
	1,1	0,082
Віконний відкос в зоні підвіконня	1,3	0,049
	1,6	0,049
	1,1	0,049
Віконний відкос в зоні рядового примикання	9	0,062
Дверний відкос в зоні перемички	1,4	0,082
Дверний відкос в зоні рядового примикання	4,2	0,062
Примикання зовнішніх стін до балконного перекриття	3	0,925/2

У випадку, якщо теплопровідне включення розташоване на межі двох зон, то до кожної зони відносять половину значення лінійного коефіцієнту теплопередачі даного теплопровідного включення [30]. Таким чином приведений опір теплопередачі зовнішніх стін визначався за формулою, м^2·К/Вт:

$$R_{\Sigma\text{ï}\,\eth} = \frac{F_\Sigma}{\sum_{i=1}^{l}\frac{F_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^{j} k_j L_j} = \tag{2.1}$$

$$= \frac{16,1}{\frac{16,1}{2,05} + ((1,3+1,6+1,1+1,4)\cdot 0,082 + (1,3+1,6+1,1)\cdot 0,049 + (9+4,2)\cdot 0,062 + 3\cdot\frac{0,925}{2})} =$$

$$= 1,506\ \frac{\text{ì}^{\,2}\cdot\text{K}}{\hat{\text{A}}\text{ò}}.$$

В результаті врахування теплопровідних включень опір теплопередачі зовнішніх стін зменшився на 26,5%. Слід зазначити, що програма EnergyPlus не містить алгоритму врахування впливу тепла, що передається в навколишнє середовище через теплопровідні включення в огороджувальних конструкціях.

Тому у моделі EnergyPlus скоригований коефіцієнт враховується шляхом корекції коефіцієнтів теплопровідності зовнішніх стінових матеріалів.

Теплообмін через огороджувальні конструкції відбувається шляхом конвекції та теплопровідності. Через ідентичні температурні умови в сусідніх квартирах, стіни, стеля та підлога, прилеглі до інших квартир, приймаються адіабатними [11].

Джерелом теплопостачання квартири є індивідуальний двоконтурний газовий котел, який застосовуються для забезпечення контурів опалення та гарячого водопостачання. Опалення квартири здійснюється протягом 176 діб опалювального періоду. Внутрішня водяна система опалення квартири двотрубна, горизонтальна. Опалювальні прилади (радіатори) у спальнях та кухні встановлено біля зовнішніх стін під вікнами без радіаційного захисту, у санвузлі опалення здійснюється за допомогою теплої підлоги. В програмній моделі передбачено, що регулювання температури повітря в кімнатах здійснюється мешканцями за допомогою електронного термостату. Термостат обладнаний датчиками температури, розміщеними в кімнатах де є опалення. Наявність термостату запобігає зниженню температури нижче запрограмованої в кімнатах де розміщені датчики. Температурний режим програмується окремо для робочих та вихідних днів. Система опалення квартири, створена в програмному середовищі DesignBuilder, наведена на рисунку 2.9.

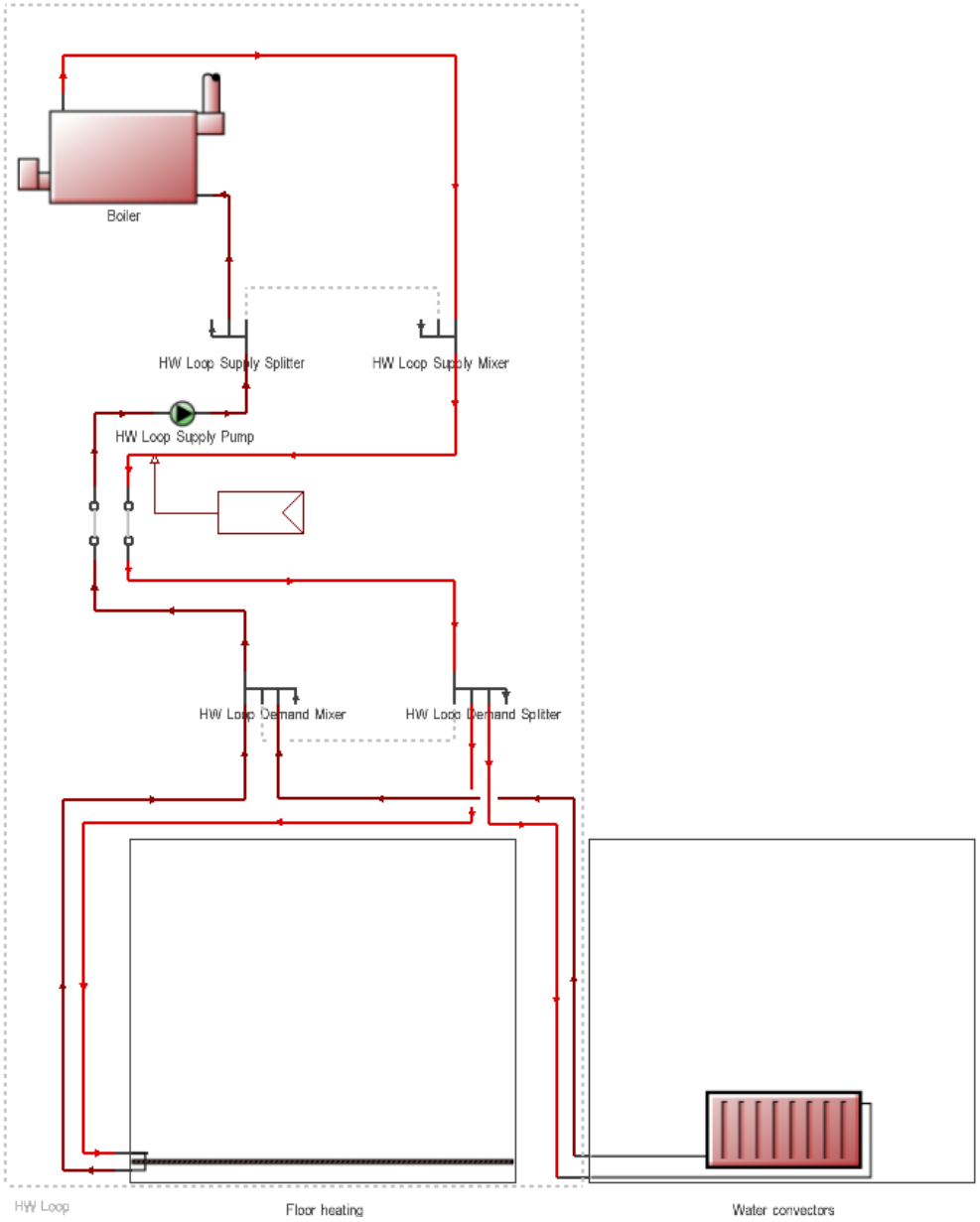


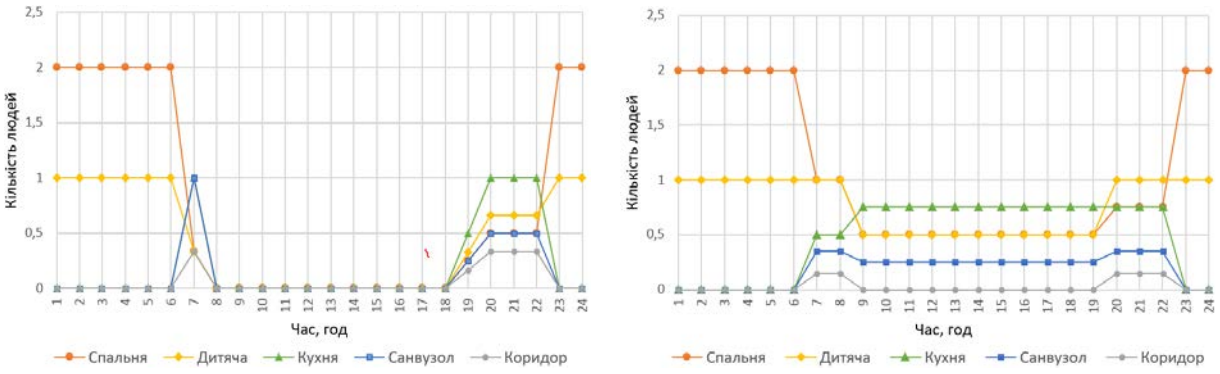
Рис. 2.9 – Схематичне зображення системи опалення квартири [9]

Теплопередача в приміщенні квартири здійснюється за наступним принципом. Тепло від опалювальних приладів потрапляє в кімнати шляхом випромінювання та конвекції, повітря накопичує частину тепла, а інша частина передається внутрішнім та зовнішнім конструкціям [11].

Система вентиляції квартири припливно-витяжна з природним спонуканням. Приплив свіжого повітря всередину відбувається шляхом інфільтрації (через нещільності у вікнах та дверях), а також через систему мікропровітрювання вікон. Повітрообмін відбувається за рахунок перепаду тиску всередині та ззовні будівлі. Будівля оснащена системою витяжних

вентиляційних повітроводів, які в місцях виходу облаштовані механічними витяжними системами. Продуктивність кухонної витяжки 400-800 м^3/год, в залежності від вибраного режиму її роботи. Продуктивність витяжного вентилятору у санвузлі 125 м^3/год.

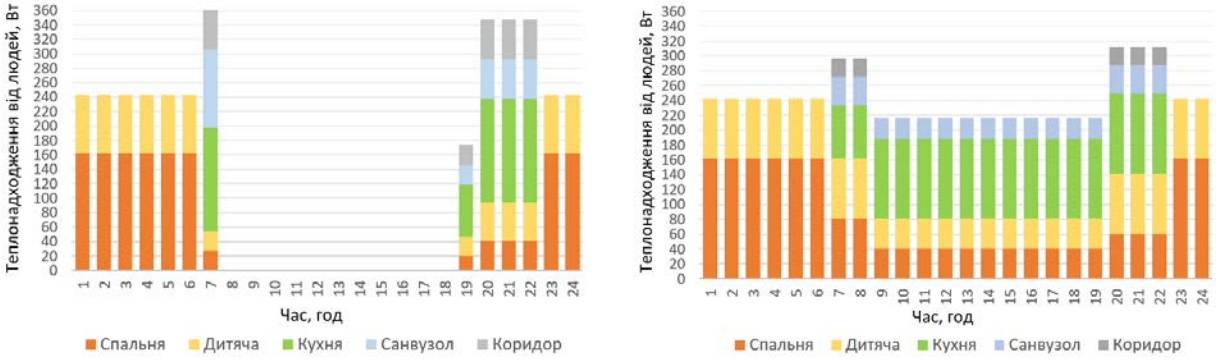
У досліджуваній квартирі проживає три людини, активність яких відрізняється у робочі та вихідні дні. Внутрішній режим експлуатації приміщень квартири безпосередньо впливає на графік використання теплової енергії та на внутрішні теплові надходження від людей, системи освітлення та електричного обладнання. Основою режиму експлуатації є графік присутності людей [14]. Графік, побудований шляхом використання частки від максимально можливої кількості присутніх людей у відповідній зоні, представлено на рисунку 2.10.



а) б)

Рис. 2.10 – Середньогодинна кількість мешканців в різних зонах квартири у робочий (а) та вихідний (б) дні

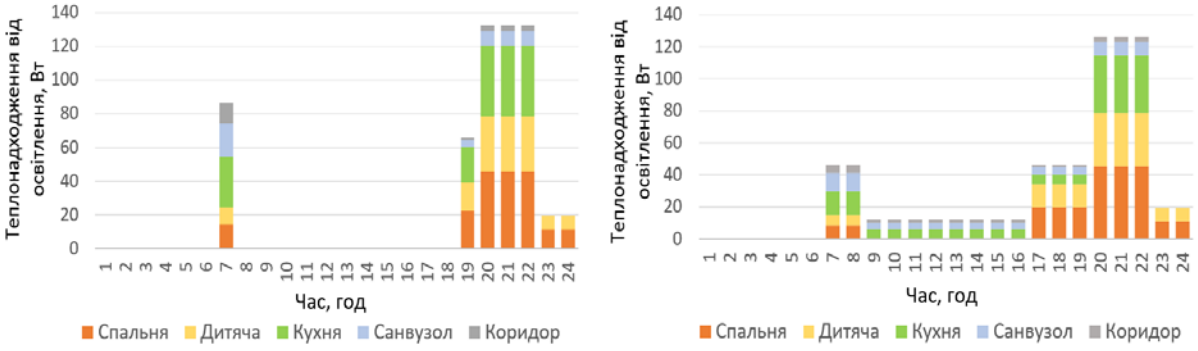
Внутрішній алгоритм розрахунку теплонадходжень від людей в EnergyPlus заснований на складанні енергетичного балансу, що враховує променеве, конвективне і приховане тепло вологи, що випаровується з поверхні тіла людини. Метаболічна теплота від людей, що мешкають в даній квартирі, була задана в програмній моделі на рівні 81-162 Вт/людину, в залежності від зони та рівня фізичної активності у відповідній зоні. Внутрішні теплонадходження від присутніх у квартирі людей в робочий та вихідний день для кожної зони представлені на гістограмах на рисунку 2.11.



а) б)

Рис. 2.11 – Погодинні теплоплонадходження від мешканців в різних зонах квартири у робочий (а) та вихідний (б) дні

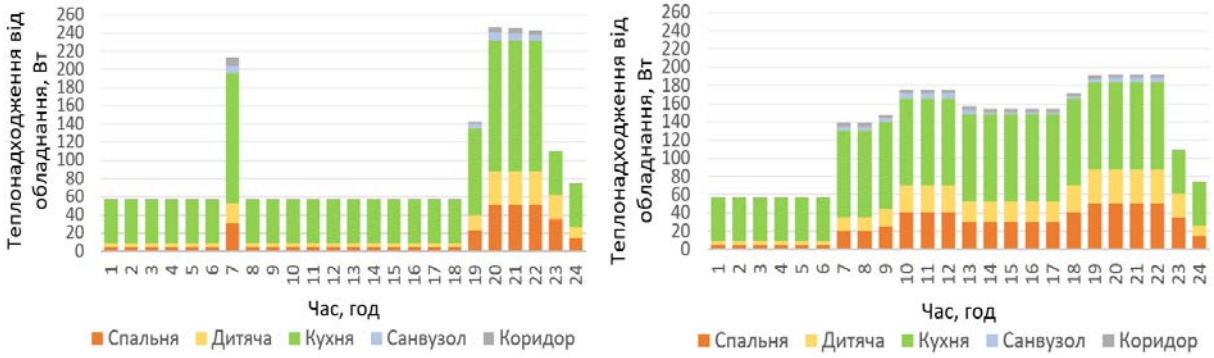
Теплонадходження від системи освітлення визначено в EnergyPlus методом задання навантаження на квадратний метр площі приміщення. Використовуючи фактичні дані щодо загального помісячного електроспоживання квартири та потужності ламп і наявного електричного обладнання, було виділено частку спожитої електроенергії, яка припадає на систему освітлення. Визначено, що максимальна потужність системи освітлення з світлодіодними лампами 3-5 Вт/м^2 в залежності від зони та фактичної освітленості у відповідній зоні. Максимальний рівень освітлення для різних зон: спальні – 4 Вт/м^2, кухня – 5 Вт/м^2; ванна кімната – 4 Вт/м^2; хол – 3 Вт/м^2. Загальні внутрішні теплонадходження від системи освітлення в робочий та вихідний день по зонам представлені на гістограмах (рисунок 2.12).



а) б)

Рис. 2.12 – Погодинні теплоплонадходження від системи освітлення в різних зонах квартири у робочий (а) та вихідний (б) дні

Метод задання електричного навантаження на квадратний метр приміщення також було використано при визначенні теплонадходжень від електричного обладнання в EnergyPlus. Максимальний рівень навантаження електрообладнання, заданий на основі фактичних даних для різних зон квартири: спальні – 3,58 Вт/м^2, кухня – 20 Вт/м^2; ванна кімната – 1,5 Вт/м^2; хол – 1,57 Вт/м^2. 20% теплонадходжень від обладнання враховано у вигляді довгохвильового випромінювання. Втрати, які не входять до теплового балансу приміщення при перетворенні електричної енергії в теплову, – 1%. Загальні внутрішні теплонадходження від електричного обладнання в робочий та вихідний день по зонам представлені на гістограмах на рисунку 2.13.



а) б)

Рис. 2.13 – Погодинні теплоплонадходження від електричного обладнання в різних зонах квартири у робочий (а) та вихідний (б) дні

Дані що внутрішніх теплонадходжень протягом робочого та вихідного днів зведені також у таблицях 2.7 і 2.8 відповідно.

Таблиця 2.7 – Теплонадходження в робочий день [15]

	Мешканці, Вт					Освітлення, Вт					Обладнання, Вт				
	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор
0-6	162,1	80,9	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	3,7	47,8	0	0,9
6-7	27,0	27,0	143,9	107,9	54,4	14,2	10,4	29,9	20,1	12,1	30,5	22,2	143,4	8,6	9,0
7-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	3,7	47,8	0	0,9
18-19	20,3	26,9	71,9	27,1	27,2	22,7	16,6	20,9	4,3	1,7	22,9	16,7	95,6	4,8	2,7
19-20	40,6	53,7	143,9	54,1	54,4	45,5	33,1	41,8	8,6	3,5	50,9	37,1	143,4	9,7	5,4
20-21	40,6	53,7	143,9	54,1	54,4	45,5	33,1	41,8	8,6	3,5	50,9	37,1	143,4	8,6	5,4
21-22	40,6	53,7	143,9	54,1	54,4	45,5	33,1	41,8	8,6	3,5	50,9	37,1	143,4	6,4	5,4
22-23	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	35,6	26,0	47,8	0	0,9
23-0	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	15,3	11,1	47,8	0	0,9

Таблиця 2.8 – Теплонадходження у вихідний день [15]

	Мешканці, Вт					Освітлення, Вт					Обладнання, Вт				
	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор
0-6	162,1	80,9	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	3,7	47,8	0	0,9
6-8	80,9	80,9	72,1	37,9	24,3	8,5	6,2	14,9	11,5	5,2	20,4	14,8	95,6	4,3	3,6
8-9	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	25,4	18,5	95,6	4,3	3,6
9-12	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	40,7	29,7	95,6	5,4	3,6
12-13	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	30,5	22,2	95,6	5,4	3,6
13-16	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	30,5	22,2	95,6	2,1	3,6
16-17	40,6	40,6	108	26,9	0	19,9	14,5	6,0	4,3	1,7	30,5	22,2	95,6	2,1	3,6
17-18	40,6	40,6	108	26,9	0	19,9	14,5	6,0	4,3	1,7	40,7	29,7	95,6	2,1	3,6
18-19	40,6	40,6	108	26,9	0	19,9	14,5	6,0	4,3	1,7	50,9	37,1	95,6	3,8	3,6
19-22	60,8	80,9	108	37,9	24,3	45,5	33,1	35,8	8,6	3,5	50,9	37,1	95,6	5,4	3,6
22-23	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	35,6	26,0	47,8	0	0,9
23-0	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	15,3	11,1	47,8	0	0,9

У досліджуваній квартирі реалізований переривчастий режим опалення згідно графіку присутності мешканців. Цей режим полягає у зниженні внутрішньої температури у робочий час, коли мешканці відсутні в квартирі, та у нічні години. Одним з критеріїв тривалості переривання теплопостачання та пов'язаного з ним зниження температури внутрішнього повітря є вимога, щоб конденсат не потрапляв на внутрішні поверхні зовнішніх огороджувальних конструкцій [15]. Фактичний переривчастий режим опалення, заданий в EnergyPlus за допомогою графіків для робочого та вихідного днів тижня, представлено на рисунку 2.14.

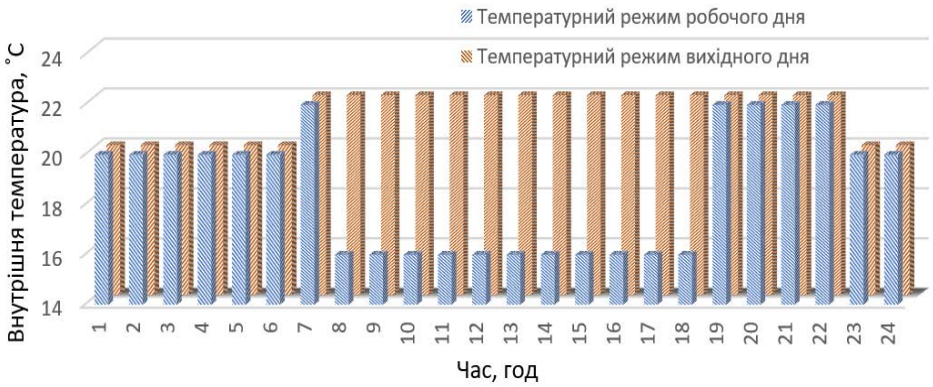


Рис. 2.14 – Внутрішня температура за переривчастого режиму опалення у робочий та вихідний дні

2.2.3 CFD-модель для дослідження теплового комфорту у житловому приміщення

Досліджуване приміщення – житлова кімната площею 10,5 м^2, розташована в багатоквартирному будинку з середнім рівнем теплового захисту (Зона 2 – Дитяча (рисунок 2.8)). Характеристики огороджувальних конструкцій наведені в таблиці 2.5. Кімната має одну зовнішню стіну та вікно. Три внутрішні стіни межують з іншими кімнатами з тим же температурним режимом.

CFD-модель кімнати була розроблена в програмному середовищі Ansys Fluent. Внутрішня температура в кімнаті задана на рівні 22˚C, при зовнішній розрахунковій проектній для міста Києва -22˚C. На рисунку 2.15 представлена розрахункова область для CFD-моделювання.

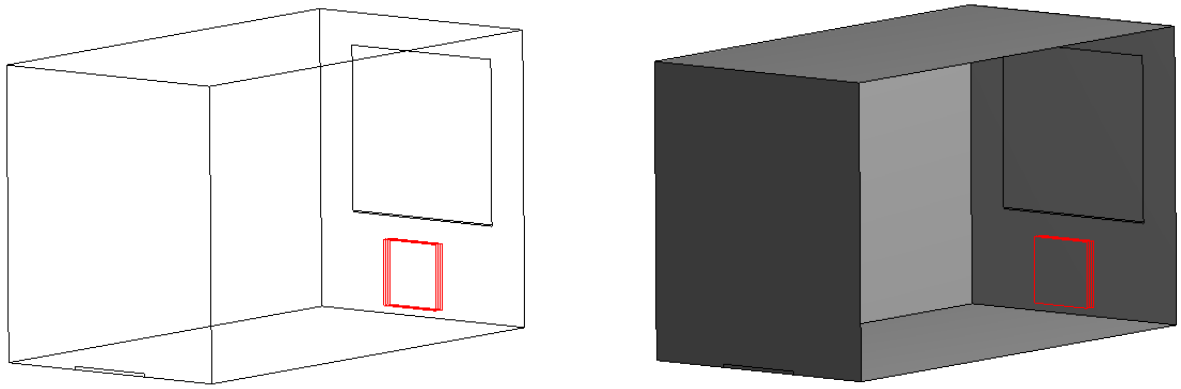


Рис. 2.15 – 3D-модель досліджуваної кімнати

Розрахункова сітка моделі кімнати була побудована в розрахунковому середовищі ANSYS Workbench та складається з 676144 вузлів і 637297 елементів (рисунок 2.16). Якість сітки оцінювалася такими показниками як “Orthogonal Quality” та “Skewness”, значення яких знаходились в межах, які характеризують якість сітки як дуже високу [16].

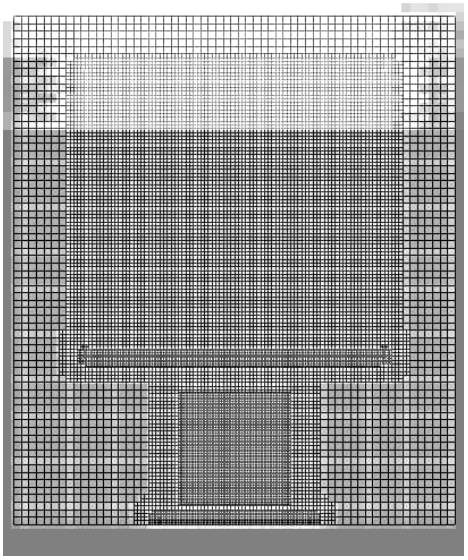


Рис. 2.16 – Розрахункова сітка

В моделі передбачено природний повітрообмін у кімнаті, який забезпечується шляхом інфільтрації крізь нещільності зовнішніх огороджувальних конструкцій на рівні 0,56 год$^{-1}$, що відповідає нормі для даного приміщення. Вентиляційний вхід розміщений у вигляді вузького отвору під вікном, а вихід повітря відбувається через отвір над підлогою на протилежній стіні, у місці розташування міжкімнатних дверей. Масова витрата повітря становить 0,0057 кг/с. Граничну умову на витяжці встановлено через тиск [16].

Опалення в кімнаті здійснюється за допомогою опалювального приладу – радіатора, розташованого на відстані 0,1 м від зовнішньої стіни та від підлоги відповідно. Радіатор складається з чотирьох поверхонь розмірами 0,6 м × 0,6 м та товщиною 2,5 мм. Розміри радіатору було підібрано таким чином, щоб забезпечити задану внутрішню температуру. Тепловий потік від радіатора встановлювався за допомогою температури на його поверхнях на рівні 51˚C, що забезпечує внутрішню температуру 22˚C [16]. В роботі [107] доведено, що використання постійної температури по поверхні нагрівача є прийнятним при CFD-моделюванні приміщення. Щоб врахувати можливість акумулювання тепла приладом опалення його теплотехнічні властивості було задано як середньомасові для сталі та води на кожній поверхні наступним чином [16]:

$$\frac{dt}{d\tau}C = Q\big|_{-} - Q\big|_{+}$$

$$t\big|_{-} = t\big|_{+}$$

$$C = (cm)_{steel} + (cm)_{water}$$

В CFD-моделі було застосоване поняття гомогенних еквівалентних стін для всіх поверхонь. Тож їх теплофізичні властивості було задані як середні, враховуючи товщину кожного шару. Характеристики гомогенних еквівалентних поверхонь зведені в таблицю 2.9.

Таблиця 2.9 – Характеристики гомогенних еквівалентних поверхонь

Тип конструкції	Товщина, м	Густина, кг/м^3	Теплоємність, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)
Зовнішня стіна (сх)	0,47	1271	874	0,535
Внутрішня стіна (пд)	0,42	1795	878	0,813
Внутрішня стіна (зх/пн)	0,165	1549	840	0,42
Стеля/підлога	0,22	2436	840	1,939
Вікно	0,038	1000	450	0,0483
Радіатор (4 ребра)	0,0025	7007	946	55,17

Для врахування теплоінерційних властивостей конструкцій між зовнішніми поверхнями стін/вікна та середовищем було задано конвективний теплообмін ($t_{зовн}$ = -22˚C, $t_{вн}$ = 22˚C, $\alpha_{зовн}$ = 23 Вт/(м^2·К), $\alpha_{вн}$ = 8,7 Вт/(м^2·К)). Для внутрішніх стін випробовувались дві різні умови: адіабатний та конвективний теплообмін. Але саме другий варіант був обраний для врахування теплоінерційних властивостей будівельних конструкцій при моделюванні нестаціонарного режиму.

При проведенні моделювання в Ansys Fluent були прийняті наступні допущення:

− в розрахунковій області має місце турбулентний режим течії з “k-epsilon” моделлю турбулентності;

− в розрахунковій області є радіаційний теплообмін, врахований за допомогою радіаційної моделі “surface to surface”;

− теплопровідність та в’язкістю повітря не залежать від його температури, на відміну від густини.

Стандартна “k-epsilon” модель турбулентності може бути представлена наступними рівняннями:

– для турбулентної кінетичної енергії *k*:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+2\mu_t E_{i,j}E_{i,j}-\rho^o$$

– для розсіювання ϵ:

$$\frac{\partial(\rho^o)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho^o u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial^o}{\partial x_i}\right]+C_{1^o}\frac{^o}{k}2\mu_t E_{i,j}E_{i,j}-C_{2^o}\rho\frac{^{o\,2}}{k}$$

де

u_i − компонент швидкості у відповідному напрямку;

$E_{i,j}$ – компонент швидкості деформації;

μ_t – турбулентна в'язкість;

C_μ = 0,09, σ_ϵ = 1,3, σ_k = 1,0, $C_{1\epsilon}$ = 1,44, $C_{2\epsilon}$ = 1,92 – константи.

Модель “surface to surface” передбачає, що всі поверхні є сірими та розсіяними. Рівняння виводиться з простого енергетичного балансу, припускаючи, що випромінювальна здатність дорівнює коефіцієнту поглинання, і що поверхні є непрозорими, так що враховуються лише відображення та пропускання:

$$q_{out,k}=\varepsilon_k\sigma T_k^4+\rho_k q_{in,k},$$

де

$q_{out,k}$ − потік енергії з поверхні;

$\mathcal{E}_k$ − випромінювальна здатність поверхні;

σ − константа Стефан-Больцмана;

T_k − температура поверхні *k*;

ρ_k − частка падаючого потоку, що відбивається;

$q_{k,in}$ − потік енергії, що падає на поверхню *k* з її оточення.

Для моделювання радіаційного теплообміну між поверхнями в кімнаті було застосовано дві моделі: “Discrete ordinates (DO)” та “Surface to Surface (S2S)”. В результаті виявлено, що загальний тепловий та радіаційний баланси кімнати подібні у обох випадках. Зауважимо, що сонячні теплонадходження не були задані в даній моделі [16].

Передбачена перевірка збіжності реалізовувалась шляхом спостереження за збіжністю змінних (швидкості руху повітря, температури внутрішньої та на поверхнях, тиску, тощо), а також нев'язки в балансі [16].

2.3 Методика експериментального визначення показників теплового комфорту приміщень

2.3.1 Дослідження динаміки внутрішньої температури за переривчастого режиму опалення

Для аналізу інерційності системи опалення житлового приміщення та верифікації результатів моделювання температурного режиму всередині було досліджено фактичну динаміку зміни внутрішньої температури за переривчастого режиму опалення.

Для моніторингу фактичної внутрішньої температури повітря в квартирі використовувалися реєстратори температури та вологості DS1923. Даний прилад являє собою двоканальний мікроконтролер, що складається з напівпровідникового датчику температури, датчику відносної вологості, літієвої батареї і пам'яті. Логер DS1923 призначений для вимірювання і реєстрації температури і відносної вологості з подальшою обробкою інформації на персональному комп’ютері. Точність вимірювання температури ±0,5°С.

Правильне розміщення датчиків є важливою частиною загальної стратегії моніторингу тому їх слід розміщувати в місцях, де вони можуть надати найбільш точні дані. Три датчики було розміщено у двох спальних

кімнатах та кухні для одночасного контролю внутрішньої температури. Внутрішня температура у різних частинах кімнати може відрізнятися, тому вибір місця розташування реєстраторів обмежувався не лише висотою від підлоги, а й відстанню від вікон, приладів опалення, зовнішніх та внутрішніх стін. Також не рекомендується розміщувати датчики на прямому повітряному потоці та необхідно уникати потрапляння сонячних променів на датчик, що може критично вплинути на результати моніторингу. Розміщення датчиків підбиралося таким чином, щоб виміряні дані відповідали середнім для приміщень. Методом практичного аналізу результатів при розміщенні датчиків в різних ділянках кімнат було визначено місця, де датчики працюють найбільш ефективно. Дослідження показали, що з точки зору просторових і часових коливань має сенс проводити вимірювання температури на відстані 1,2 м від підлоги та 2 м від зовнішньої стіни.

Моніторинг внутрішньої температури та вологості у приміщеннях проводився протягом тижня (2048 замірів). Дані були зібрані з 5-хвилинним інтервалом.

2.3.2 Дослідження динаміки концентрації CO_2 та кратності повітрообміну за переривчастого режиму опалення

Для дослідження кратності повітрообміну було застосовано метод моніторингу, зоснований на безперервному вимірюванні концентрації CO_2. Враховуючи, що на повітрообмін впливає велика кількість експлуатаційних та поведінкових факторів, були створені спеціальні умови для визначення швидкості повітрообміну. Для вимірювання концентрації CO_2 у спальнях і на кухні були проведені такі польові експерименти:

– з і без додаткових внутрішніх викидів CO_2 від людей;

– з і без використання системи мікропровітрювання вікон в кімнатах.

На початку експерименту концентрацію CO_2 було штучно збільшено шляхом спалювання сухих таблеток спирту в досліджуваних приміщеннях. Це дозволило більш якісно відстежувати динаміку зміни концентрації CO_2 [13].

Після цього експериментально відстежували зміну концентрації CO_2 у кімнатах.

Таким чином в ході експерименту було виміряно: зовнішню та внутрішню температуру та відносну вологість повітря; швидкість та напрямок вітру на вулиці; концентрацію CO_2 на вулиці (фонова); графік перебування людей та їх кількість у приміщенні; вид фізичної активності людей.

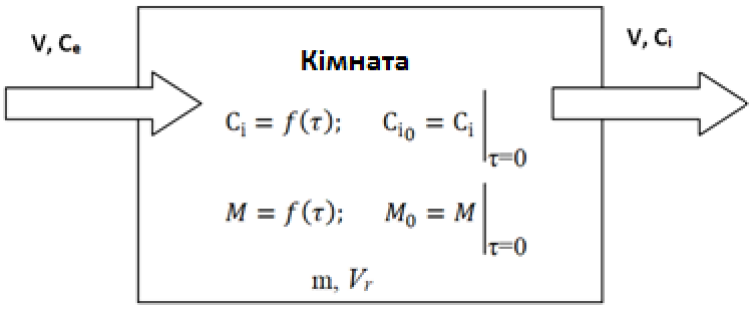
Для дослідження використовувався комплексний прилад регістратор CO_2 TR-75Ui з діапазоном вимірювань CO_2: 0…9999 ppm, температури: 0…55°C, відносної вологості: 10…95% [13].

Перед встановленням вимірювальних пристроїв досліджувалось локальне місце встановлення датчиків для визначення концентрації CO_2 та інших вхідних параметрів для розрахунку природної кратності повітрообміну в кімнатах. Було встановлено, що різниця між значеннями концентрації CO_2 на рівні 1-1,8 м від поверхні підлоги становила 30-50 ppm. Дослідження показали, що з точки зору просторових і часових коливань допустимо проводити вимірювання інтегральної характеристики концентрації CO_2 у центрі кімнати на висоті приблизно 1 метр від підлоги. Фіксація концентрації CO_2 проводили з кроком 1 хв.

В ході вимірювань температура повітря в квартирі була в межах 19-21,5˚C, а відносна вологість − 35-50%.

Також проводилось локальне дослідження фонової зовнішньої концентрації CO_2 біля розглянутого об’єкту впродовж доби з різною віддаленістю від нього. Зафіксовані значення знаходилися в діапазоні 400-420 ppm.

Обробка експериментальних даних проводилася за методом, що ґрунтується на співвідношенні даних концентрації CO_2 зі швидкістю повітрообміну. На основі балансів повітряних потоків та концентрацій CO_2 в приміщенні (рис. 2.17) були отримані наступні співвідношення (2.2-2.9) [13].



V_r – об'єм кімнати, м^3; V – витрата повітря, м^3/год; m – виділення CO_2 в приміщенні, г/год; M – маса CO_2 в приміщенні, г; M_0 – початкова маса CO_2 в приміщенні, г; C_e, C_i, C_{i0}, – концентрація CO_2 в припливному повітрі, у кімнаті в заданий момент часу та початкова відповідно, г/м^3

Рис. 2.17 − Схема зміни концентрацій CO_2 в приміщеннях [14]

Концентрація CO_2 в приміщенні визначається:

$$C_i = \frac{M}{V_r}, \tag{2.2}$$

Зміна кількості CO_2 у часі:

$$\frac{dM}{d\tau} = m + V \cdot C_e - \frac{V}{V_r} M, \tag{2.3}$$

Кількість CO_2 через інтервал часу $\Delta\tau_j$:

$$M_j = M_{j-1} + \overline{m_j} \triangle\tau_j + \overline{V_j} \cdot \overline{C_{e.j}} \triangle\tau_j - \frac{\overline{V_j}}{V_r} \cdot \frac{M_{j-1} + M_j}{2} \triangle\tau_j \tag{2.4}$$

Для n часових інтервалів рівняння (2.4) матиме наступний вигляд:

$$j = 1...n, \;\; M_n = M_0 + \sum_{j=1}^{n} m_j \triangle\tau_j + \sum_{j=1}^{n} V_j \cdot C_{e.j} \triangle\tau_j - \sum_{j=1}^{n} \frac{V}{V_r} \cdot M_j, \tag{2.5}$$

Рівняння (2.5) може бути використане для визначення маси CO_2 в припливному повітрі, через значення C, V та m для кожного часового інтервалу $\Delta\tau_j$.

Інтегрування рівняння (2.3) при сталих значеннях C_e, V та m дає вираз для маси CO_2 у внутрішньому повітрі в будь-який момент часу τ:

$$M = \frac{V_r}{V}\left\{m + V \cdot C_e + \left[\frac{V}{V_r} \cdot M_0 - \left(m + V \cdot C_e\right)\right] \cdot e^{-\frac{V}{V_r}\tau}\right\}, \quad (2.6)$$

З формули (2.6) слідує, що внутрішня концентрація CO_2 при сталих значеннях C_e, V і m визначається:

$$C_i = \frac{m}{V} + C_e + \left[C_{i0} - \left(\frac{m}{V} + C_e\right)\right] \cdot e^{-\frac{V}{V_r}\tau}, \quad (2.7)$$

Для граничних випадків, рівняння (2.7) виглядає наступним чином (2.8-2.9):

$$\text{ÿêù î } m \to 0, C_i = C_e\left(1 - e^{-\frac{V}{V_r}\tau}\right) + C_{i0} \cdot e^{-\frac{V}{V_r}}, \quad (2.8)$$

$$\text{ÿêù î } m \to 0 \text{ òà } C_i >> C_e, C_i = C_{i0} \cdot e^{-\frac{V}{V_r}\tau}. \quad (2.9)$$

Експериментальні дані зміни концентрації CO_2 в приміщеннях в часі оброблялися рівнянням (2.7).

2.3.3 Верифікація результатів

Перевірку адекватності моделі громадської будівлі, створеної в програмному середовищі EnergyPlus, було виконано шляхом порівняння енергоспоживанням за результатами складеної моделі та фактичного (таблиця 2.10). Таким чином різниця між фактичним теплоспоживання за опалювальний період, приведеним до стандартних погодних умов з врахуванням фактичних та нормативних градусо-діб (ГД), та результатом моделювання становить близько 3% [5].

Таблиця 2.10 – Енергоспоживання громадської будівлі

	EnergyPlus	Фактичне
Енергоспоживання на потреби опалення, кВт·год	19730,6	20265,3
Питоме енергоспоживання на потреби опалення, кВт·год/м^3	40,5	41,6

Верифікацію динамічної моделі житлового приміщення в програмному середовищі EnergyPlus реалізовано на основі моделі створеної у програмному середовищі MathLab. Перевірка адекватності моделі проведена для енергоспоживання приміщення в опалювальний період. Розбіжність розглянутої моделей з перевірочною становить 4-10% [19]. Даний інтервал пов'язаний із місцем розташування температурного датчика в моделі, створеній у MathLab.

Результати моделювання житлового приміщення дозволили отримати дані у часі щодо профілю внутрішньої температури у кімнатах. Ці дані корелюються з результатами ескпериментального визначення профілю внутрішньої температури при переривчастому режимі роботи системи опалення квартири. Також, дані щодо енергоспоживання квартири за опалювальний період, отримані в результаті моделювання, наближені до значень фактичного енергоспоживання. Різниця становить близько 17% (таблиця 2.11) [9].

Таблиця 2.11 – Енергоспоживання житлового приміщення

	EnergyPlus	Фактичне
Енергоспоживання на потреби опалення, кВт·год	4019,44	4824,92
Питоме енергоспоживання на потреби опалення, кВт·год/м^2	81,3	97,6

Верифікацію CFD-моделі житлової кімнати в програмному середовищі AnsysFluent реалізовано на основі порівняння теплового навантаження та балансу втрат та надходжень з даними отриманими з моделі цієї ж кімнати в програмному середовищі EnergyPlus (таблиця 2.12).

Таблиця 2.12 – Теплове навантаження житлової кімнати

	Ansys Fluent	EnergyPlus
Теплове навантаження, Вт/м^2	44,75	48,73

Висновки до розділу 2

1. Об'єктами дослідження було обрано громадську будівлю та житлове приміщення. В роботі враховано особливості експлуатаційного режиму об’єктів, а також вплив динамічних факторів. Для аналізу енергетичних показників динамічних режимів будівлі створено енергетичні моделі в спеціалізованих програмних середовищах. Певна частина вхідних даних моделей базується на результатах експериментальних вимірювань для підвищення точності результатів моделювання.

2. Енергетичні моделі громадської будівлі та житлового приміщення, створені в EnergyPlus, відображають їх роботу в реальних умовах. Тож для обох об’єктів були застосовані фактичні особливості функціонування, умови управління інженерними системами ОВК, динаміка внутрішніх теплонадходжень та повітрообміну. Графіки функціонування були деталізовані та задані в програмі погодинно, враховуючи режим експлуатації, динаміку внутрішніх теплонадходжень та рівень повітрообміну. При побудові 3D геометрії обох об’єктів їх внутрішній об’єм було розділено на зони з метою врахування різних режимів функціонування.

3. CFD-модель житлової кімнати, створена в програмі для моделювання гідродинамічних процесів Ansys Fluent, налаштована для роботи в стаціонарному та нестаціонарному режимах для дослідження енергетичних показників роботи підсистеми тепловіддачі. В розрахунковій області задано кімнату з фактичними характеристиками огороджувальних конструкцій, прилад опалення, вхідний та вихідний вентиляційний отвори, застосовано турбулентний режим течії та радіаційний теплообмін.

4. Методом моніторингу було експериментально досліджено динаміку внутрішньої температури та концентрації CO_2 для житлового приміщення. Обробка експериментальних даних щодо концентрації CO_2 здійснювалася за методом, що засновується на співвідношенні даних

концентрації зі швидкістю повітрообміну. Результати польових вимірювань були використані при розробці енергетичних моделей.

5. Перевірка адекватності моделей, що представлені в роботі, проведена за річним енергоспоживанням громадської будівлі та житлового приміщення на потреби опалення, а також за тепловим навантаженням однієї з кімнат житлового приміщення. Розбіжність результатів моделювання з фактичними даними становить до 17%, створених моделей з перевірочними – менше 10%. Результати верифікації є адекватною оцінкою та прийнятною розбіжністю для застосування створених моделей.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ БУДІВЕЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЕЙ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ENERGY PLUS

3.1 Експериментальне визначення показників режимів роботи систем опалення та повітрообміну

3.1.1 Фактичний профіль внутрішньої температури

Результати експериментального визначення профілю температур у житловому приміщенні приведені на діаграмах на рисунках 3.1 та 3.2.

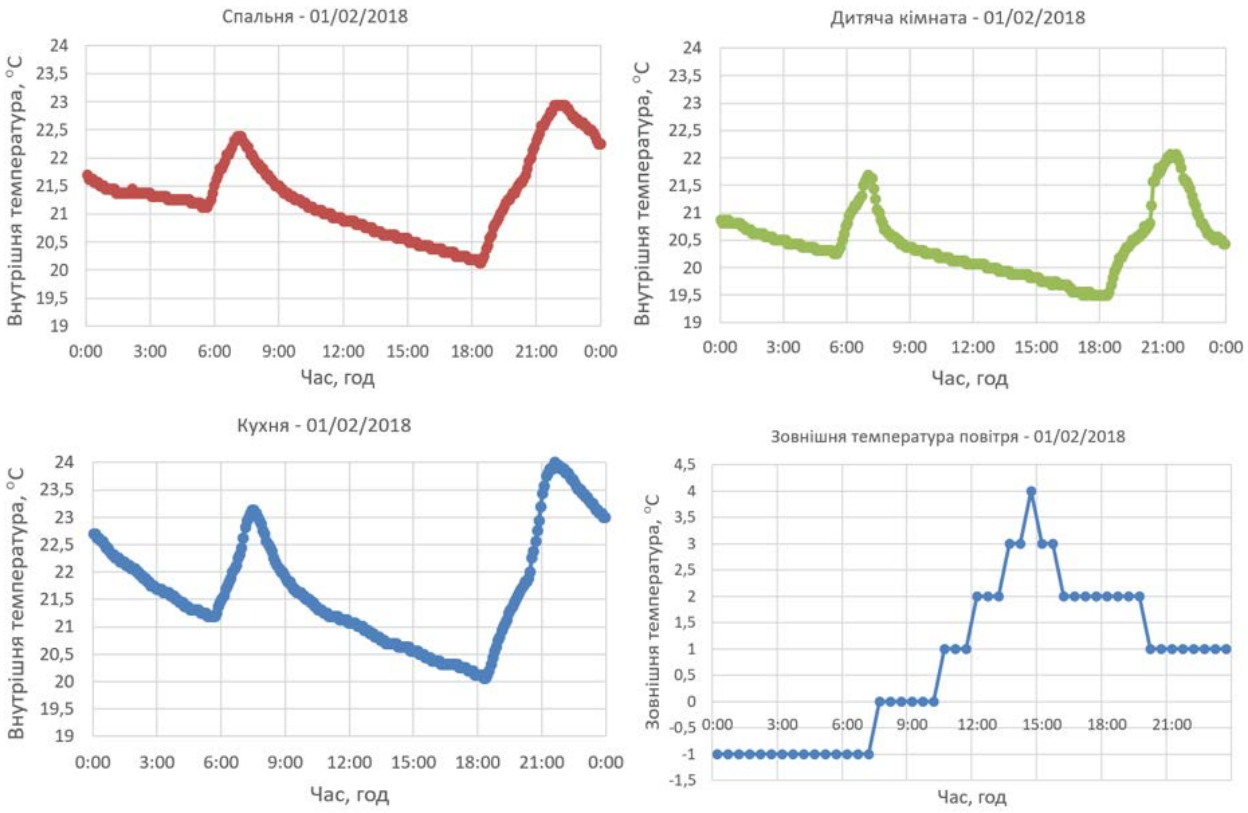


Рис. 3.1 – Профілі температури внутрішнього (спальня, дитяча, кухня) та зовнішнього повітря для робочого дня

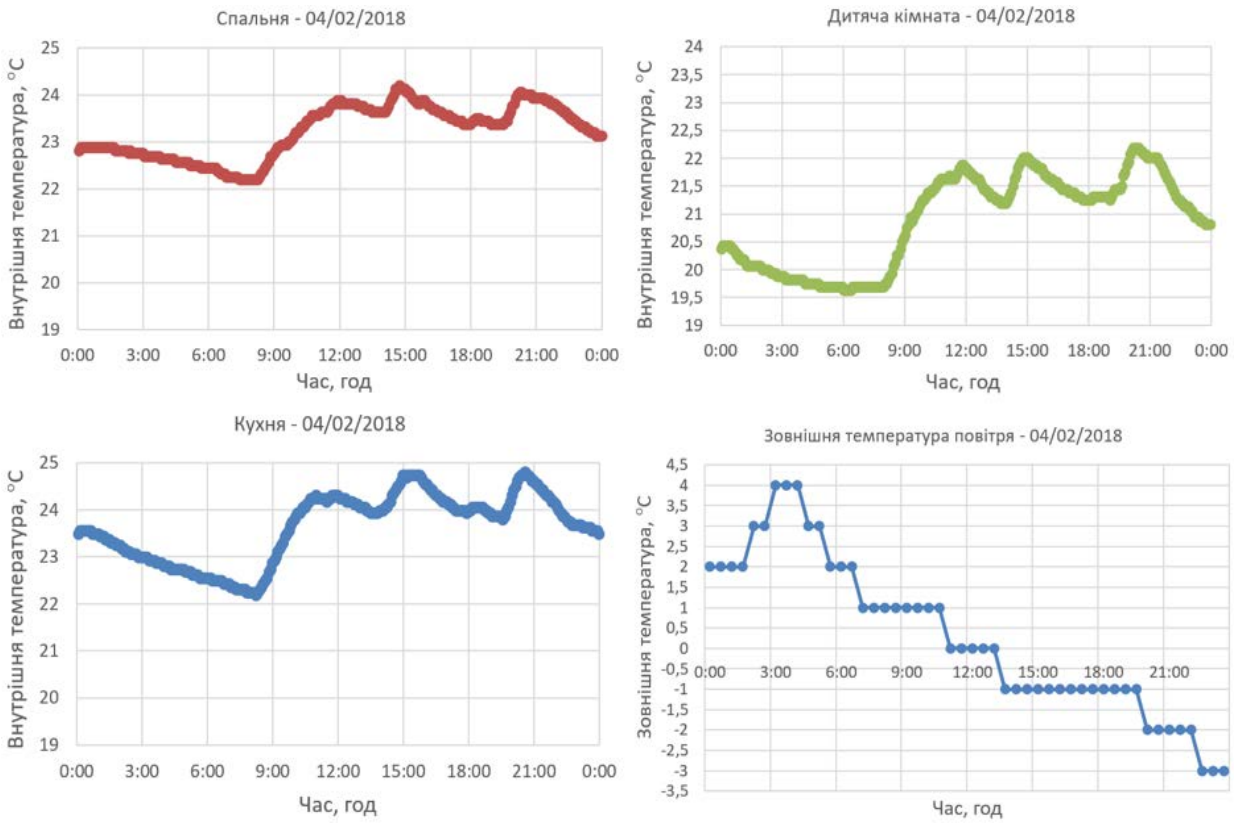


Рис. 3.2 – Профілі температури внутрішнього (спальня, дитяча, кухня) та зовнішнього повітря для вихідного дня

На графіках на рисунках 3.1 та 3.2 показано, що температура в досліджуваних кімнатах не опускається нижче 19,5 °С. Отже, програмовані 16°С не досягаються взагалі. Значною мірою на це впливає зовнішня температура, а також динамічні характеристики матеріалів огороджувальних конструкцій. На графіках також помітно, що внутрішня температура в спальні та на кухні перевищує задану. Це пов'язано з тим, що автоматика котла моделює виробництво тепла, в залежності від внутрішньої температури на термостаті, який розташований в дитячій кімнаті. Тож, аналізуючи графіки, слід зазначити, що система опалення квартири потребує гідравлічного балансування [11].

3.1.2 Фактичний рівень повітрообміну

На рисунку 3.3 показно зміну концентрації CO_2 протягом дня у спальній та дитячій кімнатах.

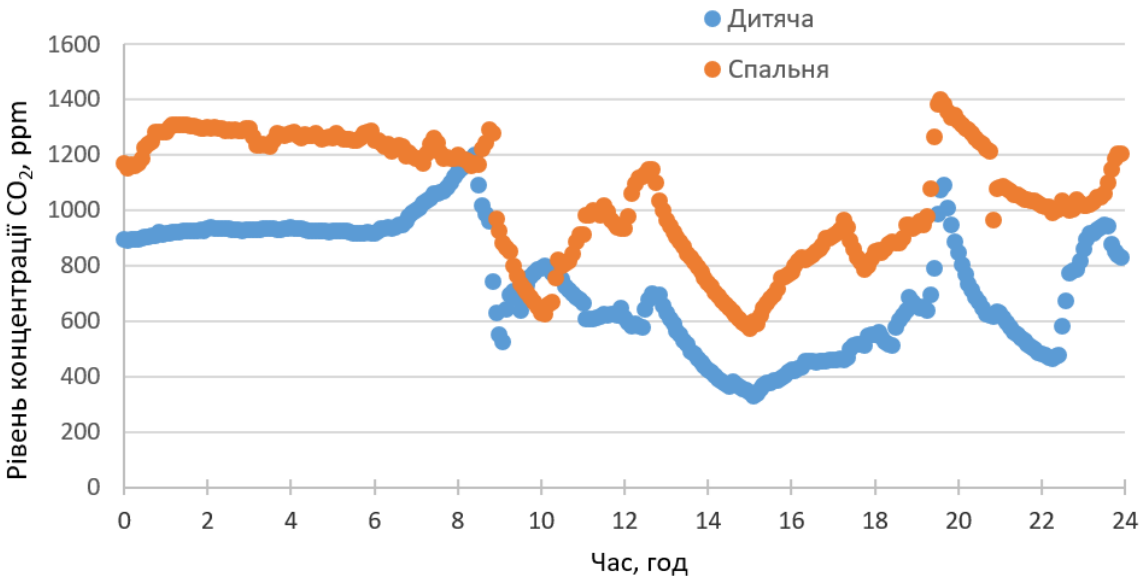


Рис. 3.3 – Рівень концентрації CO_2 протягом доби в спальній та дитячій кімнатах

Було виявлено, що найвищий рівень CO_2 характерний для нічного часу доби, коли люди знаходяться у спальнях із закритими вікнами. Пилоподібні зміни на графіку пояснюються періодичним провітрюванням протягом дня. Загалом, рівень внутрішнього CO_2 у спальній кімнаті вище, ніж у дитячій через наявність двох дорослих у спальні і лише однієї дитини у дитячій. Необхідний рівень концентрації CO_2 у спальнях повинен бути на рівні 750-1000 ppm [83]. З рисунку 3.3 також видно, що коли дві людини знаходяться у спальні з закритими вікнами, нормативне значення перевищується на 200 ppm. Рівень концентрації CO_2 на кухні коливався в діапазоні 600-1800 ppm, під впливом зайнятості та періодичності роботи витяжної системи вентиляції. Під час вимірювань фонова зовнішня концентрація CO_2 біля розглянутого об’єкту була в діапазоні 400-420 ppm.

На рисунку 3.4 (а, б) показано зміну концентрації CO_2 у спальній та дитячій кімнатах коли кімнати не провітрювались та людей не було всередині (спальня − рис. 3.4 (а), дитяча – рис. 3.4 (б)). На рисунку 3.4 (в, г) показано

зміну концентрації CO_2 у спальній та дитячій кімнатах під час мікропровітрювання (спальня − рис. 3.4 (в), дитяча – рис. 3.4 (г)). На рис. 4 (в, г) спостерігається більша кривизна графіків зміни концентрації порівняно з рис. 4 (а, б) через збільшення кількості свіжого повітря, що надходить у приміщення.

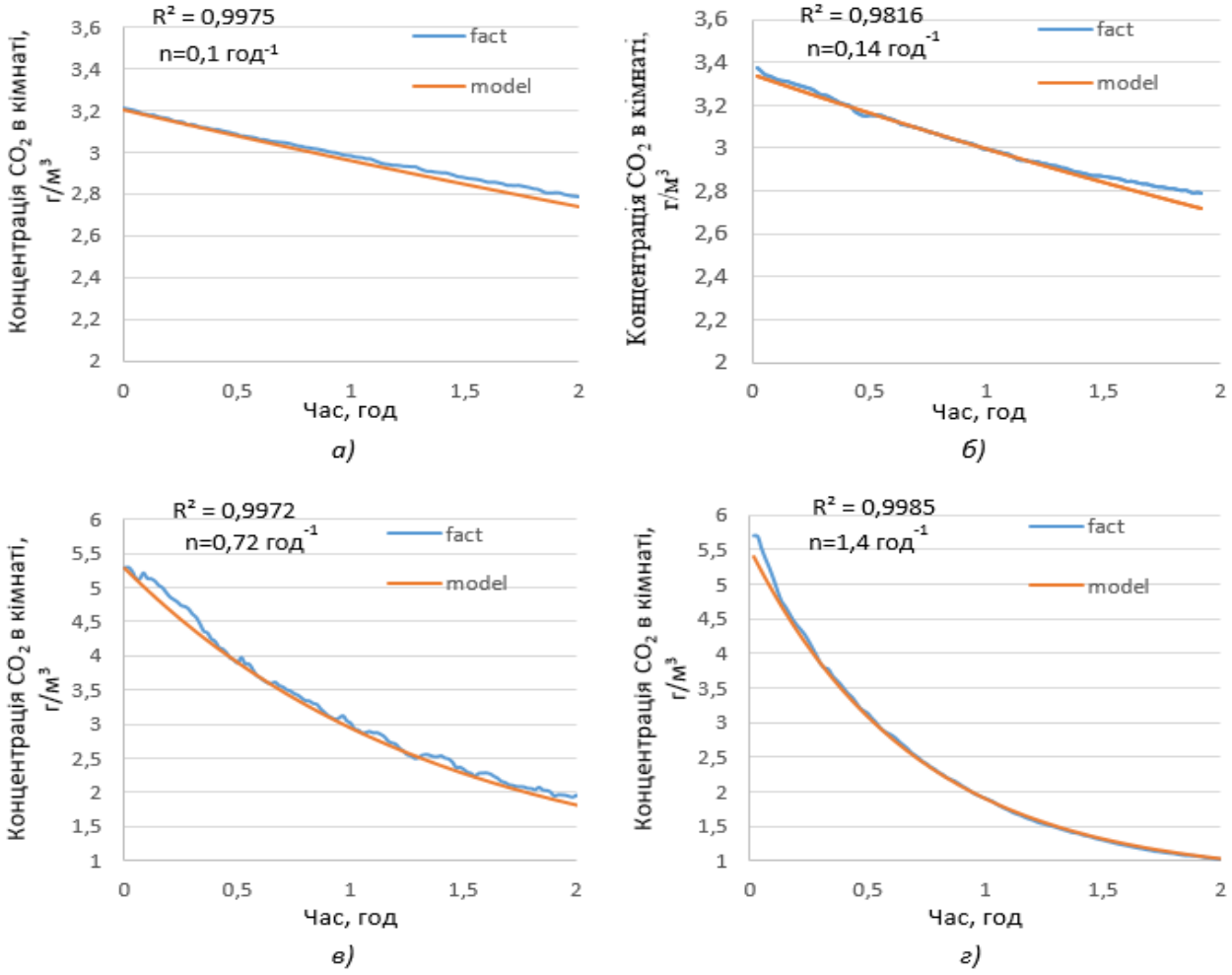


Рис. 3.4 – Повітрообмін в спальні (а, в) та дитячій (б, г) кімнатах без провітрювання (а, б) та з мікропровітрюванням (в, г)

На початку експерементального дослідження при закритому вікні і дверях у дитячій кімнаті концентрація CO_2 знаходиться на рівні 2000 ppm. Після години з відкритими дверима на коридор концентрація CO_2 зменшилася до 1700 ppm, тобто на 300 ppm. Аналогічна зміна концентрації CO_2, на 300 ppm, відбулася за 3 год у спальній кімнаті, при закритих дверях та вікні. При

відкритому на мікропровітрювання вікні та зачинених дверях за 2 години концентрація CO_2 в дитячій кімнаті змінилася від 3000 ppm до 580 ppm.

В спальній кімнаті при закритих вікнах та дверях за відсутності людей концентрація CO_2 змінювалася від 1950 ppm до 1250 ppm за 6 годин. За умови відкритого вікна на мікропровітрювання та відкритих внутрішніх міжкімнатних дверей за 2 години концентрація CO_2 зменшувалася від 2850 ppm до 1050 ppm, тобто на 1800 ppm. Концентраця CO_2 в спальній кімнаті повільніше зменшується порівняно з дитячою кімнатою, що пояснюється тим, що вікно зі спальної кімнати відкривається на засклений балкон на відміну від дитячої. Потрібно відмітити, що високі концентрації CO_2 в приміщені створені штучно для дослідження динаміки зміни CO_2 різними механізмами провітрювання [13].

На рисунку 3.5 показано зміну концентрації CO_2 на кухні при переривчастій роботі витяжної системи.

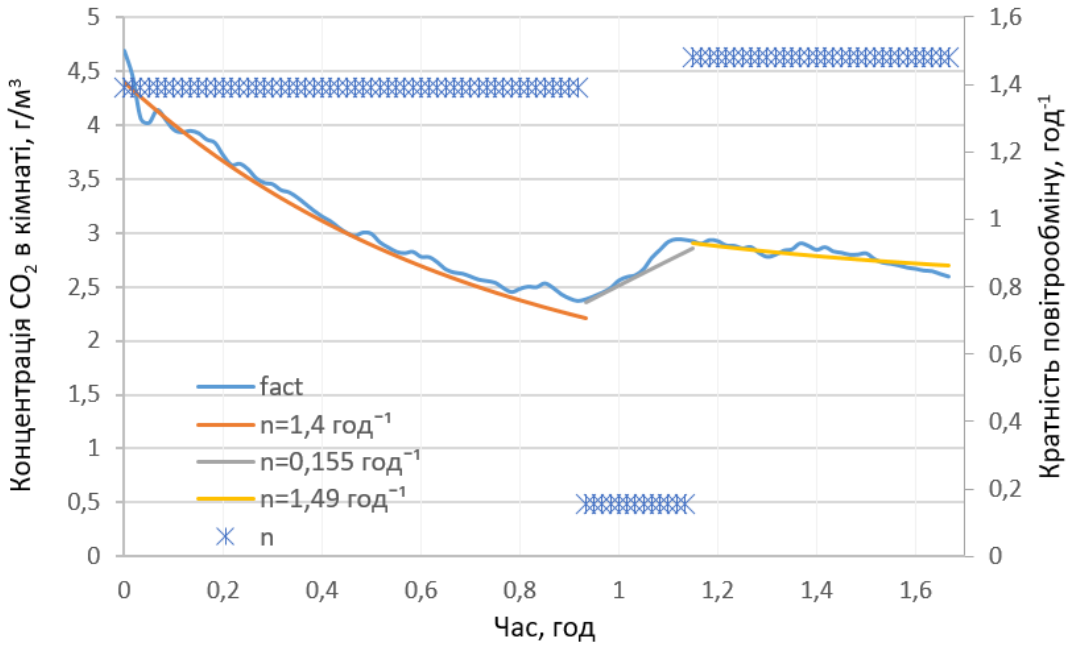


Рис. 3.5 – Повітрообмін в кухні за різних експлуатаційних режимів витяжної системи

На кухні встановлена кухонна витяжка з продуктивністю 200 $м^3$/год. Вимірювання концентрації CO_2 було проведено за працюючої та вимкненої витяжки. Під час приготування їжі на газовій плиті протягом 30 хв.

концентрація CO_2 збільшувалася від 1500 ppm (вимкнена витяжка та зачинене вікно) до 2200 ppm, тобто на 700 ppm. За умови інтервальної роботи витяжки в період приготування їжі концентрація CO_2 мала зростаючу і спадаючу тенденцію та знаходилася в діапазоні 2200…1300 ppm. Спочатку спостерігалося зменшення на 910 ppm за 1 год, далі спостерігалося зростання на 300 ppm за 15 хв. (витяжка вимкнена), за настуні 30 хв. концентрація CO_2 зменшилася на 200 ppm [13].

Експериментальні дані щодо концентрації CO_2 було оброблено з використанням формули (2.7), що дозволили визначити фактичну кратність повітрообміну. Кратність повітрообміну при закритих вікнах та дверях становила: 0,1 год$^{-1}$ у спальній кімнаті, 0,14 год$^{-1}$ у дитячій кімнаті та 0,15 год$^{-1}$ на кухні (витяжка вимкнена).

Кратність повітрообміну за умови встановлення вікон на мікропровітрювання: 0,73 год$^{-1}$ у спальній кімнаті, 1,4 год$^{-1}$ у дитячій кімнаті та 1,4-1,5 год$^{-1}$ (витяжка увімкнена).

Аналізуючи баланс повітрообміну в квартирі важливо зазначити, що для приміщень з зовнішніми вікнами та балконними дверима характерною є інфільтрація повітря, що збільшується під час роботи витяжної вентиляційної системи приблизно на 30% [14].

3.2 Вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на переривчастий режим роботи системи опалення

3.2.1 Дослідження впливу радіаційних теплонадходжень

В ході роботи було проведено дослідження впливу температури навколишнього середовища та радіаційної складової сонячних теплонадходжень на навантаження системи опалення квартири для заданих режимів постійного та переривчастого опалення [12].

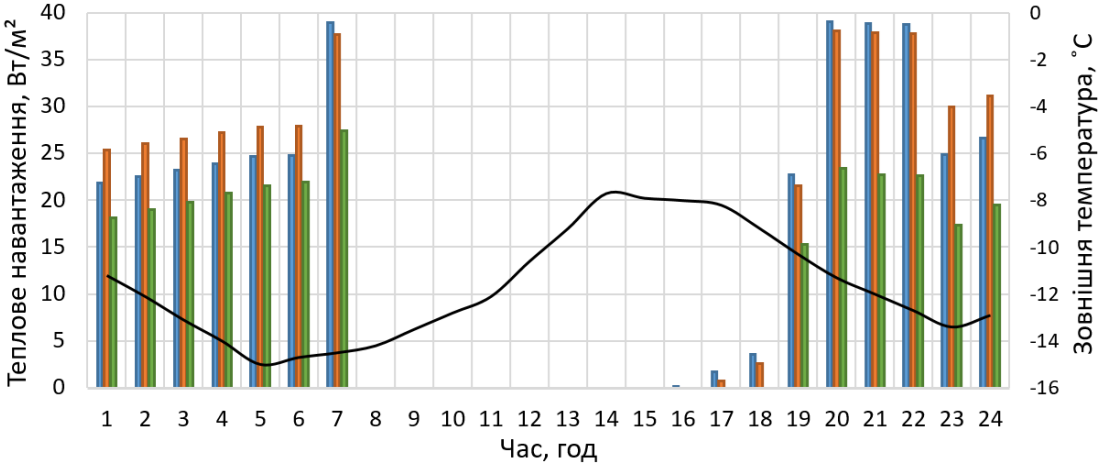
Аналіз впливу радіаційних теплонадходжень було проведено шляхом погодинної симуляції в динамічній моделі квартири в програмному середовищі EnergyPlus. Енергетична модель квартири враховує експлуатаційний режим та внутрішні теплонадходження (люди, освітлення та електрообладнання).

Результати розрахунків представлені для кліматичних умов сонячного зимового дня (10 лютого, робочий день), взятих з кліматичної бази даних IWEC для міста Києва [36]. Мінімальна температура зовнішнього повітря у вибраний день (-15°C) зафіксована о 5:00 ранку, а максимальна (-7,7°C) о 14:00. На рисунку 3.6 представлений графік температури зовнішнього повітря, а також гістограми кількості сонячної радіації, що проходить через вікна, залежно від їх орієнтації (дані щодо сонячної радіації взяті з IWEC).

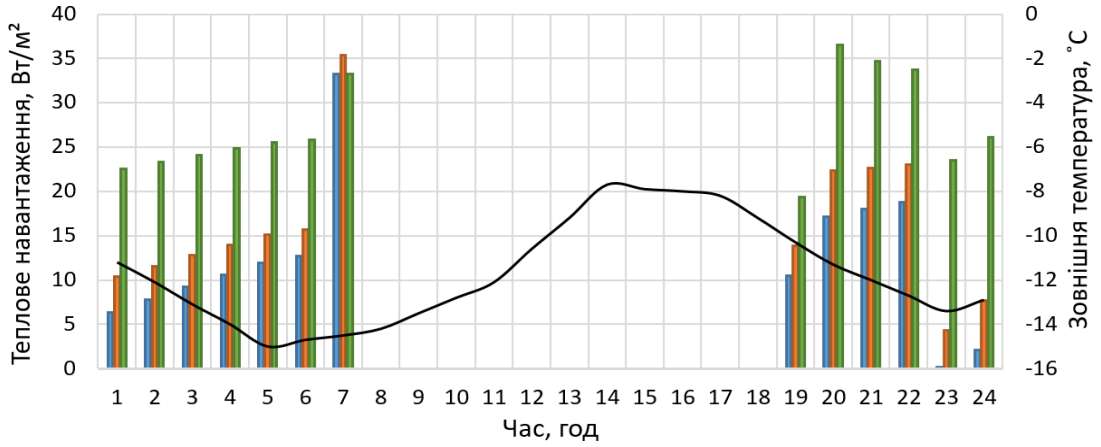
Рис. 3.6 – Кліматичні умови репрезентативного дня (IWEC)

Погодинне теплове навантаження на систему опалення квартири протягом дня досліджувалося при постійному та переривчастому режимах опалення для двох варіантів: коли зовнішні стіни спалень орієнтовані на північ та на південь. Площа засклення спальної кімнати становить 3,26 м², дитячої – 1,8 м², кухні – 1,32 м².

Вплив сонячної радіації на теплове навантаження було досліджено при постійному (22˚С) та переривчастому (16-22˚С, рис. 2.14) режимах та показано на рисунках 3.7 і 3.8.

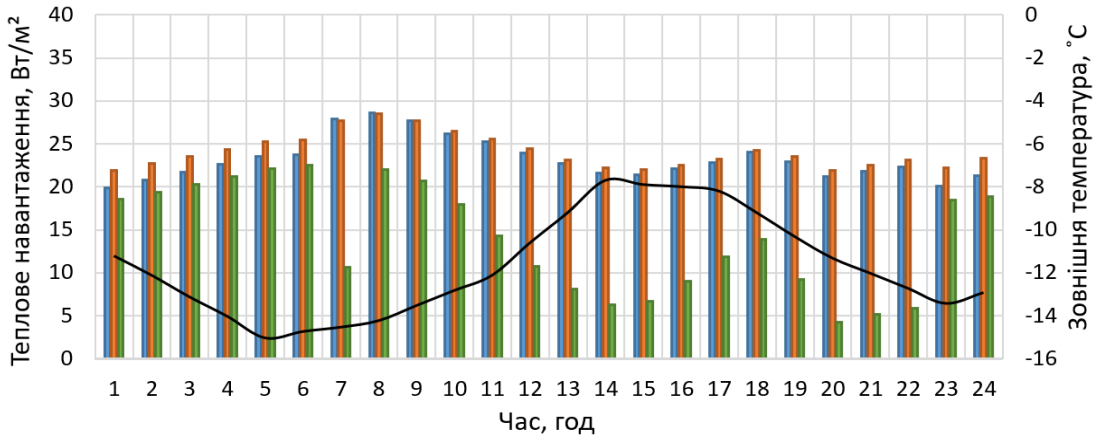


а)

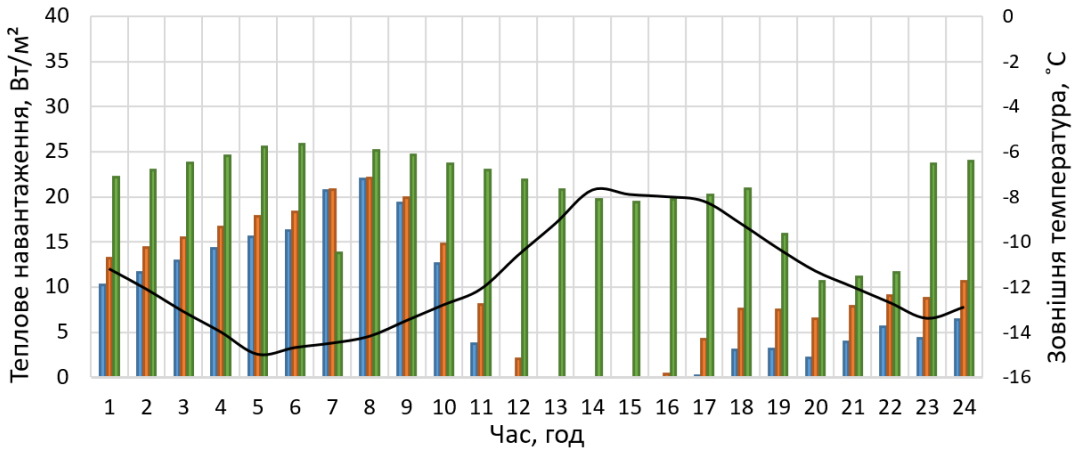


б)

Рис. 3.7 – Теплове навантаження протягом доби при переривчастому режимі опалення коли спальні орієнтовані на північ (а) та на південь (б)



а)



б)

Рис. 3.8 – Теплове навантаження протягом доби при постійному режимі опалення коли спальні орієнтовані на північ (а) та на південь (б)

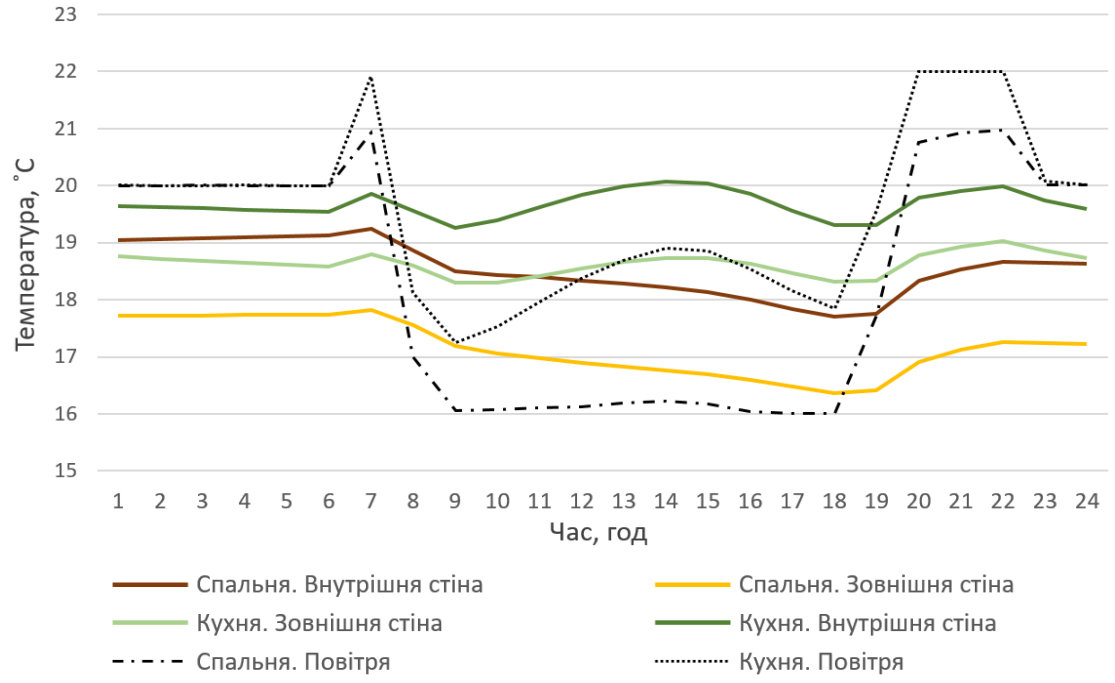
Також було проведено чисельний аналіз річного енергоспоживання квартири за погодними умовами з бази даних IWEC для міста Києва, при застосуванні постійного та переривчастого режимів опалення, а також залежно від орієнтації огороджувальних конструкцій за сторонами світу [12]. Коли зовнішні стіни спалень орієнтовані на південь, квартира споживає на 17,2% менше енергії в режимі постійного опалення та на 17,6% менше енергії в режимі переривчастого опалення, ніж у протилежному випадку. Для визначення річного енергоспоживання квартирою використовувалася також база даних погоди IWEC. Дані щодо енергоспоживання зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Енергоспоживання квартири за різної орієнтації за сторонами світу

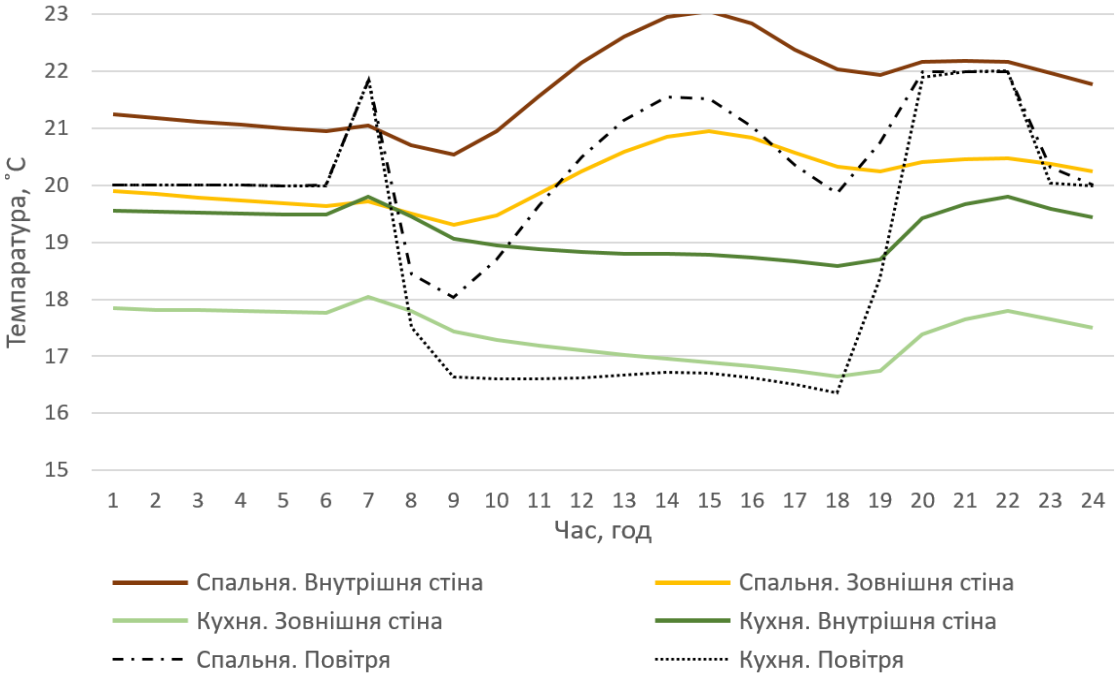
Орієнтація за сторонами світу	Питоме енергоспоживання, кВт·год/м²	
	Постійний режим опалення	Переривчастий режим опалення
Спальні – Пн, кухня – Пд	48,89	40,7
Спальні – Пд, кухня – Пн	40,49	33,52

Щоб провести детальну оцінки впливу сонячних теплонадходжень на тепловий стан приміщень було досліджено температуру на внутрішніх

поверхнях зовнішніх та внутрішніх стін кімнат за різної орієнтації за сторонами світу зовнішніх огороджувальних конструкцій (рисунок 3.9).



а)



б)

Рис. 3.9 – Температура на внутрішніх поверхнях зовнішніх стін та на внутрішніх стінах за переривчастого режиму опалення, коли спальні орієнтовані на північ (а) та на південь (б)

Графіки на рисунку 3.9 (а, б) показують, що зміна температури на внутрішніх поверхнях зовнішніх стін паралельна зміні температури на поверхнях внутрішніх стін. Аналізуючи наведені вище графіки необхідно зазначити, що в періоди відсутності сонячної активності температура внутрішніх поверхонь зовнішніх стін південної орієнтації нижча, ніж температура внутрішнього повітря. На північній стороні зафіксовані періоди, коли температура внутрішньої поверхні зовнішньої стіни вища за внутрішню середньооб'ємну температуру повітря. На це значною мірою впливають динамічні характеристики будівельних конструкцій. Важливо також зазначити, що внутрішня температура повітря в кімнатах не досягає запрограмованих 16°C під час періодів невикористання, коли опалення вимикається.

Для аналізу впливу масивності конструкцій досліджувалося енергоспоживання квартири при різних товщинах шару цегли зовнішніх стін. Саме шар цегли був обраний для аналізу, оскільки він більшою мірою впливає на масивність і має менший вплив на опір теплопередачі ніж інші шари зовнішніх стін. Ефект досліджувався в режимі переривчастого опалення, коли зовнішні стіни спалень відповідають північній орієнтації. Було встановлено, що зменшення товщини шару цегли в зовнішніх стінах на 20 см призведе до збільшення енергоспоживання в квартирі на 5,4%. За тих самих умов збільшення товщини шару цегли на 20 см призведе до зменшення енергоспоживання на 4,3%. Результати аналізу переривчастого режиму опалення показують, що зменшення масивності зовнішніх стін у 2 рази сприяє зниження внутрішньої температури на 0,5°C протягом періодів відключення опалення. Таким чином, масивность будівельних конструкцій беспосередньо впливає на температурний профіль.

3.2.2 Дослідження впливу режиму повітрообміну

Було проведено дослідження впливу режиму повітрообміну на теплове навантаження та енергоспоживання об’єкту. Аналіз здійснено за допомогою динамічної моделі квартири в програмному середовищі EnergyPlus шляхом погодинної симуляції. Енергетична модель квартири враховує експлуатаційний режим та внутрішні теплонадходження (люди, освітлення та електрообладнання).

Для представлення результатів моделювання було обрано кліматичні умови березня місяця. Так як вплив глобального потепління призводить до того, що період типовий для міжсезоння займає тепер значно більшу кількість часу опалювального періоду ніж раніше, тому і застосування переривчастого режиму опалення і вентиляції у такі періоди потребує більш детального аналізу. З метою наближення умов моделювання до реальних, було використано фактичні погодинні дані зовнішньої температури, швидкості та напряму вітру, зібрані за даними з найближчої до досліджуваного об’єкту метеостанції. Згідно з фактичними даними для березня місяця середньомісячна температура становила 5,6˚С, швидкість вітру – 4 м/с, переважний напрямок вітру – південно-південно-західний. Для погодинних досліджень було обрано погодні умови для типового дня березня, коли проводилися експериментальні вимірювання кратності повітрообміну [15].

На графіку на рисунку 3.10 відображено фактичні середньодобові показники температури та швидкості вітру протягом березня у 2020 році.

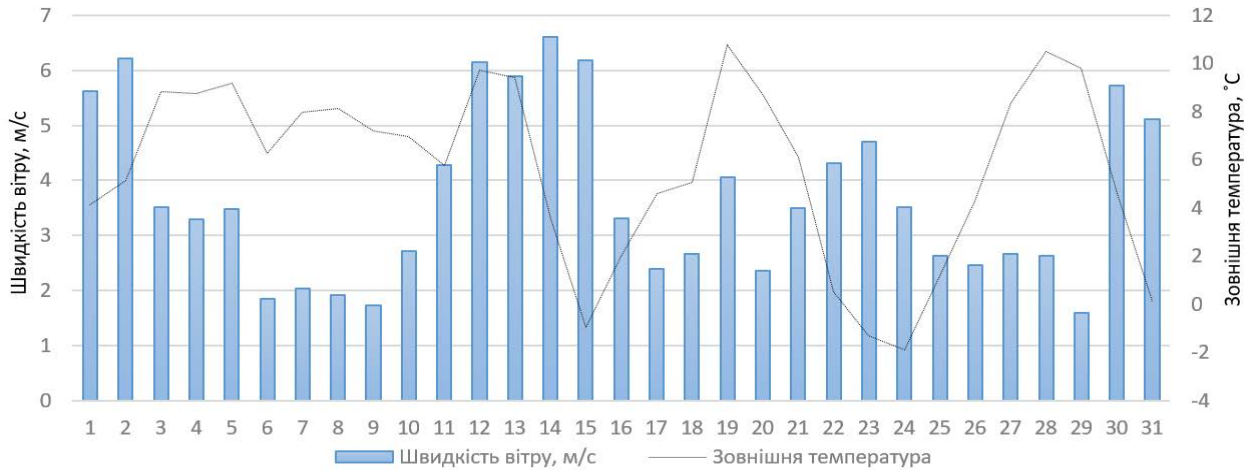


Рис. 3.10 – Фактична середньодобова температура та швидкість вітру протягом березня місяця

Враховуючи, що метеодані наводять лише швидкість та напрям вітру, а також зовнішню температуру, дані щодо сонячної інсоляції протягом вибраного періоду взяті для типового року з міжнародної кліматологічної бази даних IWEC для міста Києва. Параметри навколишнього середовища для вибраного дня (температура повітря, швидкість вітру та сонячні теплонадходження на вертикальні поверхні) представлено на рисунку 3.11. Сонячні теплонадходження представлені саме для південної та північної орієнтації, так як моделювання проводилося для цих двох варіантів, – коли зовнішні стіни спалень орієнтовані на південь та навпаки. Коефіцієнт пропускання сонячної радіації вікнами – 0,579 [15].

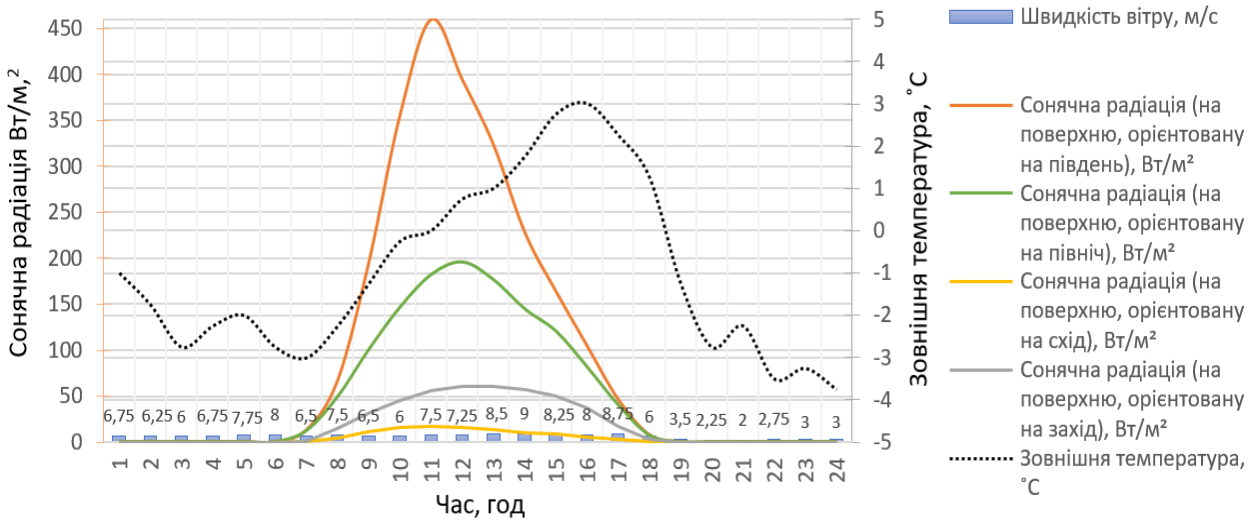


Рис. 3.11 – Параметри навколишнього середовища для репрезентативного дня

З метою аналізу впливу повітрообміну на теплове навантаження приміщень було проведено дослідження ряду підходів до задання повітрообміну в житлових приміщеннях, рекомендованих діючими стандартами: ASHRAE Std 62.2-2019 [84], EN 16798-1:2019 [86] та українським ДБН В.2.2-15:2019 [87]. Нормативні значення кратності повітрообміну та витяжних повітряних потоків за цими нормами для досліджуваного приміщення квартири зведено в таблицю 3.2 [15].

Таблиця 3.2 – Вимоги до повітрообміну досліджуваного приміщення відповідно до діючих стандартів

Стандарт	Приточний повітряний потік				Витяжний повітряний потік			
	Будівля в цілому		Спальня		Кухня		Санвузол	
	л/с	год$^{-1}$	л/с, особу	год$^{-1}$	л/с	год$^{-1}$	л/с	год$^{-1}$
ASHRAE Std 62.2-2019	17,92	0,483			50		25	
EN 16798-1:2019	20,76	0,56	7		20		25	
ДБН В.2.2-15-2019				0,5		1,5		1,5

В ASHRAE Std 62.2-2019 [84] є можливість використання загальних значень кратності повітрообміну для всього житла. В стандарті приведено таблиці з вимогами щодо витрати зовнішнього повітря в залежності від площі житла та кількості спалень. Також, за цим стандартом є можливість визначення потреби в зовнішньому повітрі (л/с) за формулою [15]:

$$Q_{tot} = 0{,}15A_{floor} + 3{,}5(N_{br} + 1) \quad (3.1)$$

де

Q_{tot} – загальний необхідний рівень повітрообміну, л/с;

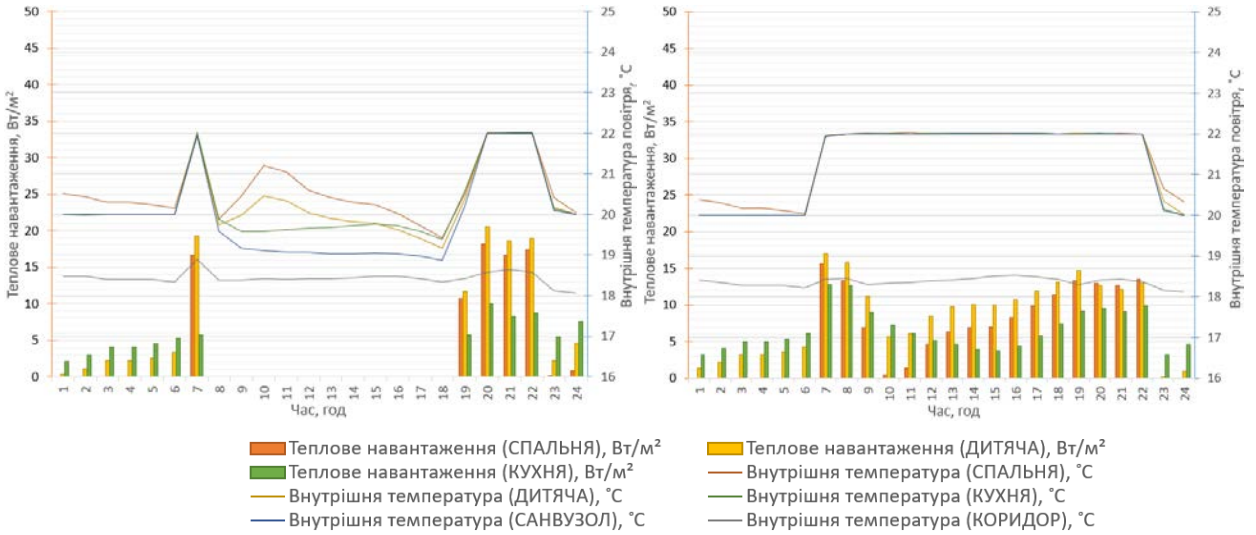
A_{floor} – площа житла, м^2

N_{br} – кількість спалень.

Загальна витрата повітря, розрахована за формулою (3.1) для досліджуваного житла з двома спальнями та загальною площею 49,44 м^2,

складає 17,92 л/с, що еквівалентно кратності повітрообміну 0,483 год$^{-1}$ (таблиця 3.2) [15].

Підхід до визначення необхідного повітрообміну за EN 16798-1:2019 [86] заснований на принципі врахування всіх наявних джерел забруднення у будинку. Як і в Standard 62.2, в даному документі представлено приклад загальних норм вентиляції при неперервному режимі вентилювання протягом часу використання житла. Але в цьому стандарті така норма визначаються за категорією будівлі, яка залежить від підвищення внутрішньої концентрації CO_2, в порівнянні з зовнішньою у PPM. Оцінка категорії внутрішнього середовища будівлі базується на ряду факторів: розрахункова внутрішня температура протягом періодів опалення та охолодження, розрахункове значення вентиляції, вологості, освітлення, шуму. Досліджуване приміщення відноситься до категорії II, що відображає нормальний рівень очікувань щодо більшості факторів. Загальна норма вентиляції житла в EN 16798-1:2019 виражена в л/с на квадратний метр, а також через кратність повітрообміну, при внутрішній висоті стелі 2,5 м. Для досліджуваного приміщення використовувалось значення витрати повітря 0,42 л/с на квадратний метр, що еквівалентно кратності повітрообміну 0,56 год$^{-1}$ при внутрішній висоті 2,7 м (таблиця 3.2) [15]. Динаміка теплового навантаження та внутрішньої температури при використанні постійного значення кратності повітрообміну за EN 16798-1:2019 в кімнатах квартири для вихідного та робочого днів при фактичній орієнтації огороджувальних конструкцій приведена на рисунку 3.12.



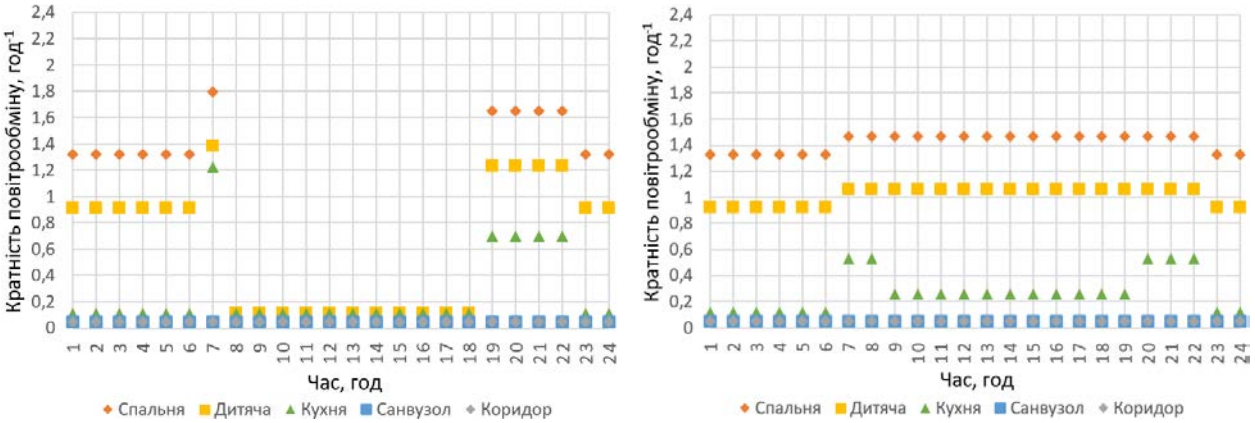
а) б)

Рис. 3.12 – Погодинне теплове навантаження при використанні постійної кратності повітрообміну 0,56 год$^{-1}$ (EN 16798-1) для робочого (а) та вихідного (б) дня

Українські будівельні норми для житлових будинків ДБН В.2.2-15:2019 [87] визначають мінімальні вимоги до повітрообміну в різних приміщеннях при природній системі вентиляції. Так мінімальна кратність повітрообміну для спалень за цим документом визначається на рівні 0,5 год$^{-1}$, для кухні та суміщеного санвузла – 1,5 год$^{-1}$ (таблиця 3.2) [15].

Три підходи, наведені вище, засновуються на використанні значень загальної норми повітрообміну для житла в цілому або для окремих кімнат (ДБН В.2.2-15:2019). Для наближення розрахункових умов повітрообміну до реального експлуатаційного графіку було також проведено дослідження нормативного рівня повітрообміну для окремих приміщень за EN 16798-1:2019, з врахуванням годин використання та невикористання приміщень. В цьому стандарті, окрім загальної норми повітрообміну для житла в цілому, також приведено значення необхідної витрати повітря на одну людину. Для будівлі II категорії це значення становить 7 л/с на людину. Для кухні та санвузла за цим стандартом норма визначається за витратою витяжного повітряного потоку на точку. У випадку досліджуваної квартири необхідна витрата для кухні становить 20 л/с, для санвузла – 25 л/с. Необхідно зазначити,

що при створенні графіку вентиляції за нормами EN 16798-1:2019 витяжні потоки було скориговано відповідно до експлуатаційного режиму квартири. В періоди відсутності людей відсутня потреба забезпечення комфортного рівня повітрообміну. В EN 16798-1:2019 рекомендується використовувати мінімальну норму вентиляції на рівні від 0,05 л/с на м^2 до 0,1 л/с на м^2 протягом годин невикористання приміщень. В українському ДБН В.2.5-67:2013 ОВК також зазначено, що кратність повітрообміну слід приймати 0,1 год$^{-1}$ у період невикористання приміщення за умови зачинених вікон і дверей. Тож задана нормативна кратність повітрообміну житла в робочі дні, в період відсутності людей (з 7:00 до 18:30) визначена на рівні 0,1 год$^{-1}$. Дане значення також застосовано для всіх приміщень, окрім спалень, в той час коли вони не використовуються за графіком присутності людей (рисунок 2.10). Заданий режим повітрообміну на основі експлуатаційного режиму та нормативних вимог EN 16798-1:2019, для робочого та вихідного днів представлено на рисунку 3.13 (а, б) та в таблиці 3.3 [15].



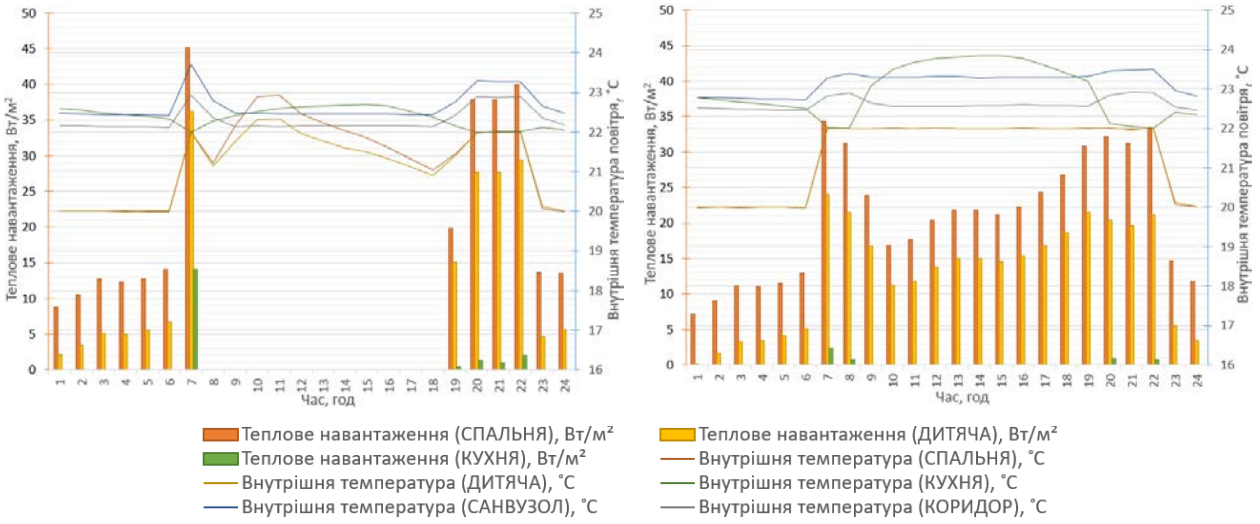
а) б)

Рис. 3.13 – Погодинна кратність повітрообміну за рекомендаціями EN 16798-1:2019, задана відповідно до експлуатаційного режиму робочого (а) та вихідного (б) дня

Таблиця 3.3 – Погодинна кратність повітрообміну за рекомендаціями EN 16798-1:2019 та за результатами фактичних вимірів, задана відповідно до експлуатаційного режиму робочого та вихідного дня

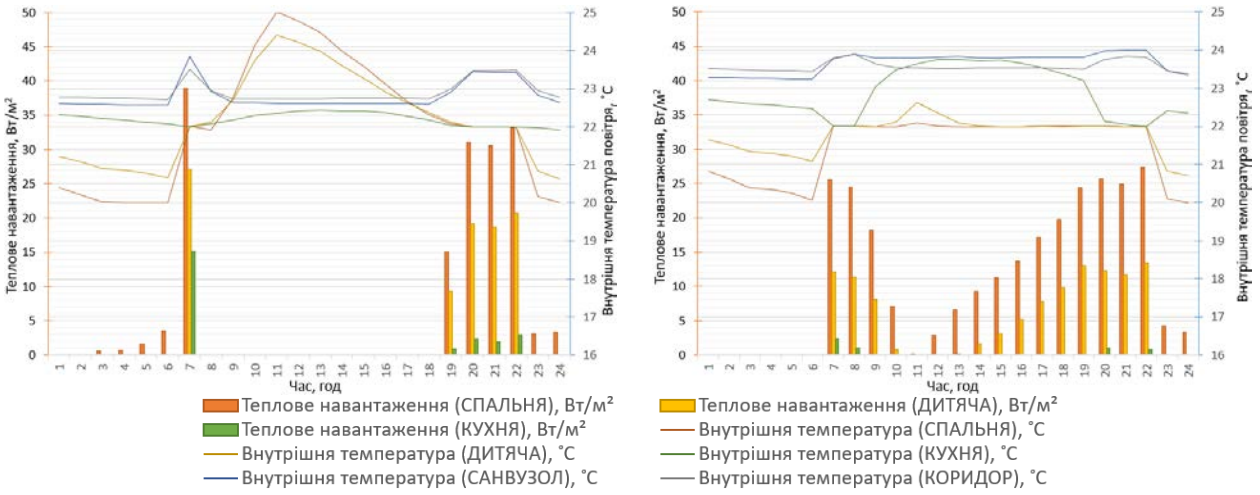
	EN 16798-1:2019					Експеримент				
	Робочий день									
	Спальня	Дитяча	Кухня	Санвузол	Коридор	Спальня	Дитяча	Кухня	Санвузол	Коридор
0-6	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05
6-18	1,8	1,39	1,23	0,05	0,05	1,17	1,87	0,94	0,05	0,05
18-22	1,65	1,24	0,71	0,05	0,05	1,02	1,72	0,54	0,05	0,05
22-0	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05
	Вихідний день									
0-6	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05
6-8	1,47	1,06	0,53	0,05	0,05	0,86	1,56	0,38	0,05	0,05
8-18	1,47	1,06	0,26	0,05	0,05	0,86	1,56	0,28	0,05	0,05
18-19	1,47	1,06	0,26	0,05	0,05	0,86	1,56	0,28	0,05	0,05
19-22	1,47	1,06	0,53	0,05	0,05	0,86	1,56	0,38	0,05	0,05
22-0	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05

Результати енергетичного моделювання теплового навантаження квартири за умов нормативного повітрообміну за заданим графіком у досліджуваній квартирі для обраної доби (рисунок 3.11) при експлуатаційному режимі робочого та вихідного днів та для різної орієнтації вікон за сторонами світу представлені на рисунку 3.14 [15].



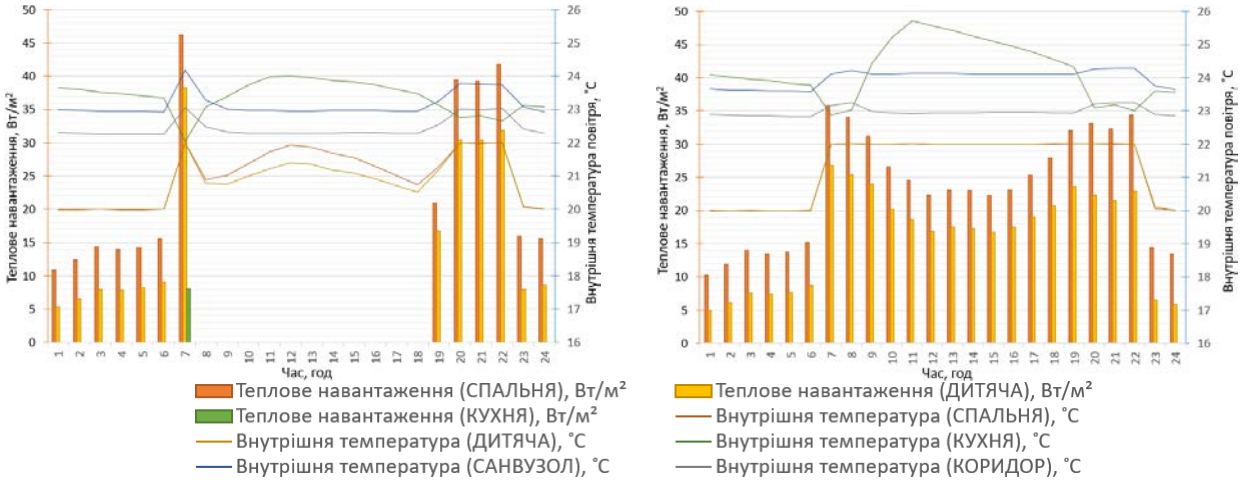
а) б)

(спальні орієнтовані на схід, кухня – на захід (а, б))



в) г)

(спальні орієнтовані на південь, кухня – на північ (в, г))



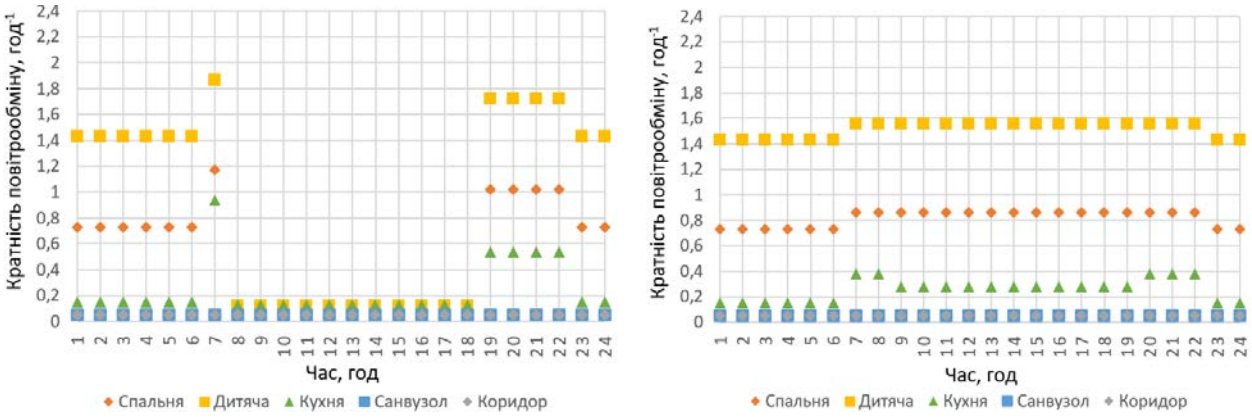
д) е)

(спальні орієнтовані на північ, кухня – на південь (д, е))

Рис. 3.14 – Погодинне теплове навантаження при використанні заданого графіку повітрообміну за рекомендаціями EN 16798-1:2019 (рис. 8) для робочого (а, в, д) та вихідного (б, г, е) дня

За результатами проведеного експерименту (розділ 2.3.2) було проаналізовано фактичні дані про витрату повітря у кожній кімнаті. При заданні графіку повітрообміну за результатами вимірювань в квартирі, передбачається, що зовнішнє повітря надходить безпосередньо до приміщень, в яких є вікна (спальні та кухня), шляхом інфільтрації. Фактичний рівень повітрообміну для спальної та дитячої кімнат обрано за експериментально виміряною кратністю повітрообміну: в режимі мікропровітрювання, за присутності людей в квартирі – 0,73 год$^{-1}$ та 1,43 год$^{-1}$; при закритих вікнах, за

відсутності людей – 0,1 год$^{-1}$ та 0,14 год$^{-1}$ для спальні та дитячої кімнат відповідно. Усереднена погодинна кратність повітрообміну в кухні та санвузлі визначена за витратою повітря при включенні механічних витяжних систем. Частота використання витяжок визначена експлуатаційним режимом приміщень та графіком присутності людей (рисунок 2.10). Подача повітря до коридору та санвузла здійснюється шляхом перенесення нагрітого повітря зі спалень і кухні та збільшується при включенні витяжних систем на витрату витяжного повітряного потоку. Тож за умови, що повітря нагрівається в кімнатах, через які воно надходить при формуванні графіку повітрообміну вважаємо, що кратність повітрообміну по відношенню до припливного зовнішнього повітря в коридорі та санвузлі задається на мінімальному рівні 0,05 год$^{-1}$. Користуючись результатами аналізу даних щодо фактичної кратності повітрообміну в приміщеннях, а також продуктивності наявних витяжних систем в кухні та санвузлі, побудовано графіки кратності повітрообміну по відношенню до припливного зовнішнього повітря на рисунку 3.15 (а, б) та в таблиці 3.4 [15].

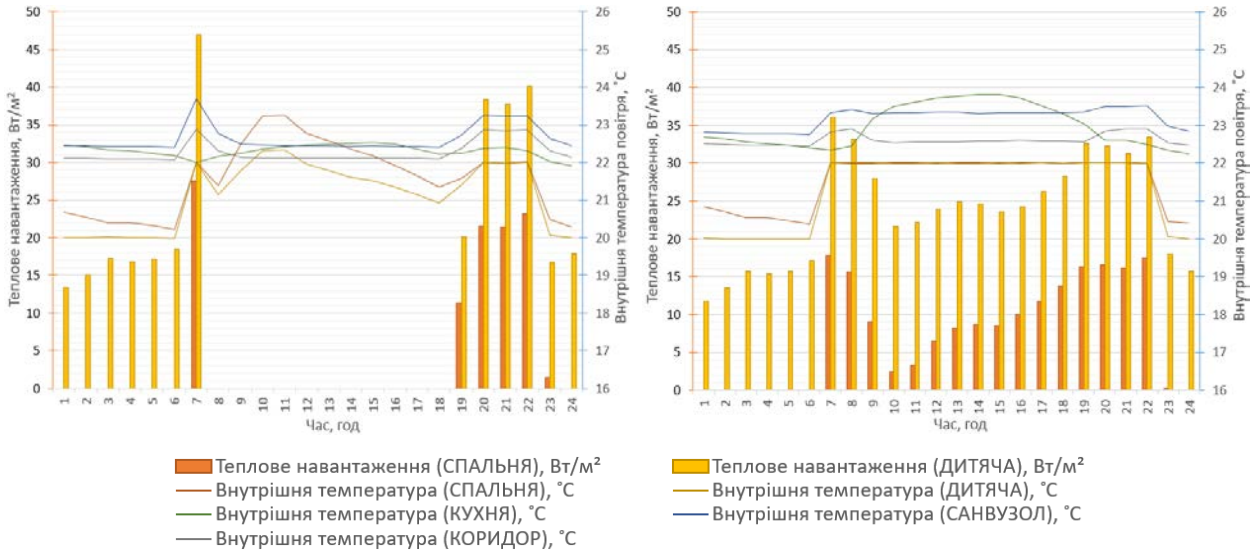


а) б)

Рис. 3.15 – Погодинна кратність повітрообміну за результатами фактичних вимірів, задана відповідно до експлуатаційного режиму робочого (а) та вихідного (б) дня

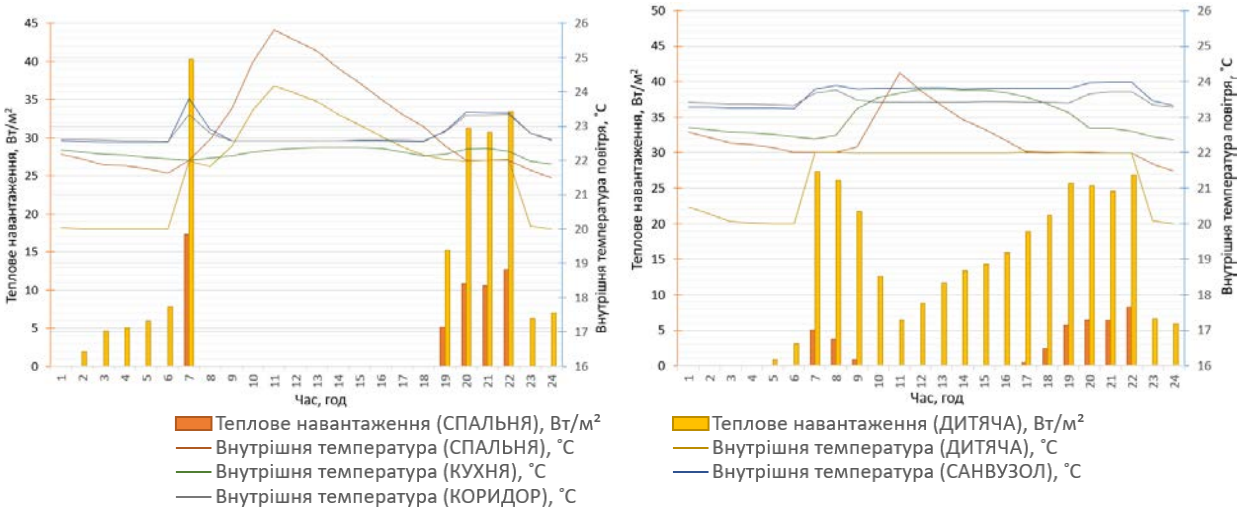
Результати моделювання теплового навантаження кімнат квартири та внутрішніх температур за фактичним графіком повітрообміну для обраної доби (рисунок 3.11) при експлуатаційному режимі робочого та вихідного днів

та для різної орієнтації вікон за сторонами світу представлені на рисунку 3.16 [15].



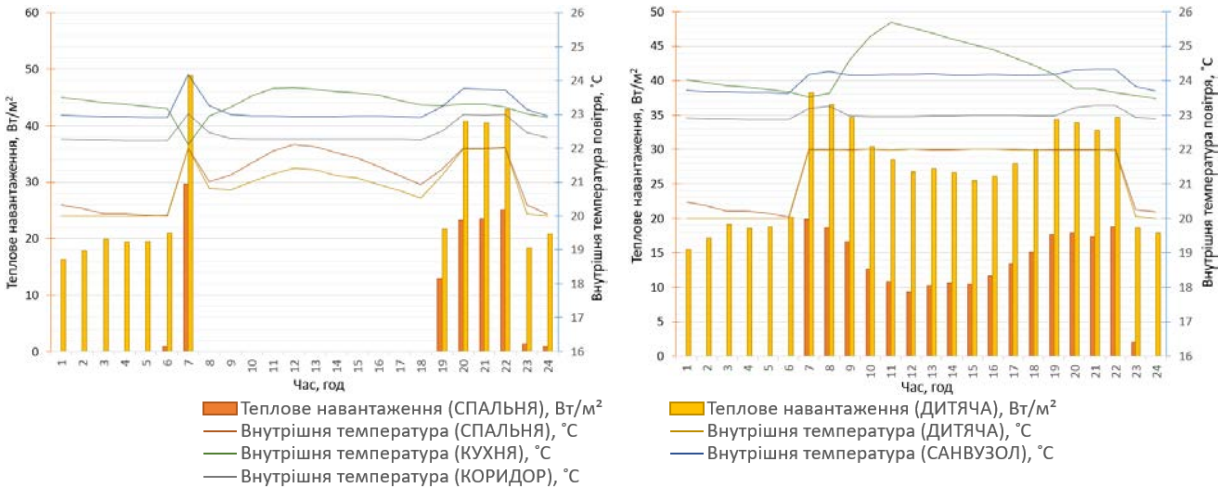
а) б)

(спальні орієнтовані на схід, кухня – на захід (а, б))



в) г)

(спальні орієнтовані на південь, кухня – на північ (в, г))



д) е)

(спальні орієнтовані на північ, кухня – на південь (в, г))

Рис. 3.16 – Погодинне теплове навантаження при використанні заданого графіку повітрообміну за результатами фактичних замірів (рис. 10) для робочого (а, в, д) та вихідного (б, г, е) дня

Відповідно до рисунків 3.14 (а, в, д) та 3.16 (а, в, д) в години невикористання квартири котел вимикається тому що внутрішня температура в кімнатах не досягає нижньої запрограмованої грані – 16˚С. Відсутність теплового навантаження в кухні на більшості графіків пояснюється низьким рівнем повітрообміну, зафіксованим під час роботи витяжки. Теплове навантаження санвузла відсутнє, так як на нього майже не впливає повітрообмін через те що до санвузла, як і до коридору, потрапляє вже нагріте в інших кімнатах повітря. В денні години в спальнях або в кухні внутрішня температура часту перевищує задану 22˚С. Це пов’язано з наявністю сонячних теплонадходжень через світлопрозорі конструкції від 7 до 19 год (рисунок 3.11), значне підвищення внутрішньої температури спостерігаються в кімнатах, огороджувальні конструкції яких орієнтовані на південь [15].

За результатами моделювання було проведено оцінку впливу режиму повітрообміну на рівень і динаміку енергетичних показників квартири при переривчастому опаленні з урахуванням графіків зміни режиму експлуатації і погодних умов. В таблицю 3.4 зведено дані результатів моделювання за різних підходів до задання повітрообміну в квартирі з переривчастим режимом

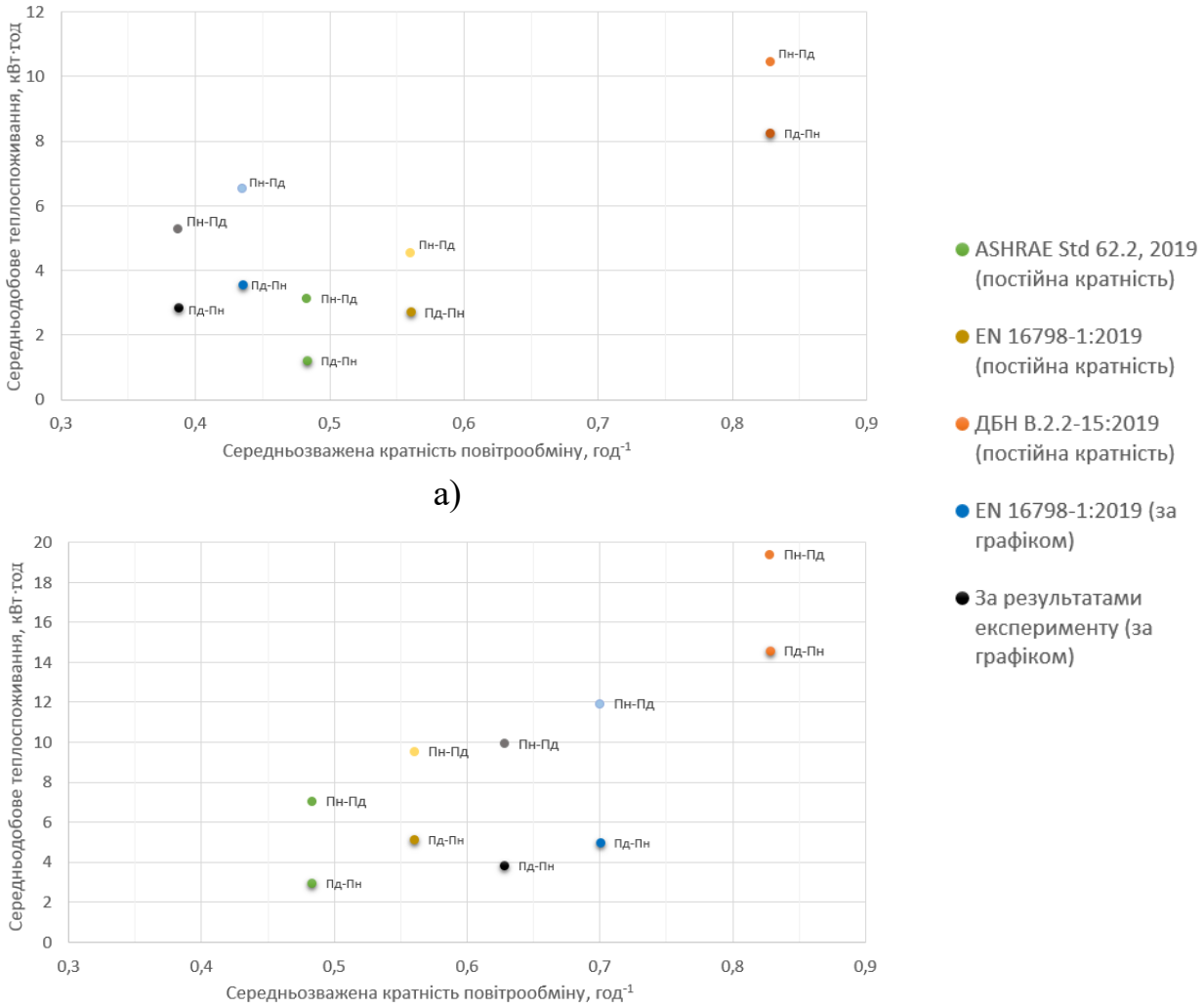
опалення. Результати включають дані щодо енергоспоживання, середньозваженої кратності повітрообміну та внутрішньої температури досліджуваного приміщення для експлуатаційних режимів робочого та вихідного дня за однакових погодних умов (рисунок 3.11) щодо цих показників [15].

Таблиця 3.4 – Результати моделювання за різними підходами до задання повітрообміну в квартирі

Підхід до задання повітрообміну	Орієнтація[1]	Споживання теплової енергії, кВт·год			Внутрішня температура, °С			Середньозважена кратність повітрообміну, год$^{-1}$		
		Середньо-добова	Робочий день	Вихідний день	Середньо-добова	Робочий день	Вихідний день	Середньо-добова	Робочий день	Вихідний день
ASHRAE Std 62.2, 2019 (постійна кратність)	Сх-Зх	2,92	2,93	6,06	20,76	20,37	21,13	0,483	0,483	0,483
	Пд-Пн	1,97	1,23	2,98	21,21	21,02	21,56			
	Пн-Пд	3,44	3,15	7,07	20,47	20,09	20,91			
EN 16798-1:2019 (постійна кратність)	Сх-Зх	3,93	4,31	8,72	20,56	20,08	21,02	0,56	0,56	0,56
	Пд-Пн	2,83	2,72	5,16	20,88	20,63	21,22			
	Пн-Пд	4,46	4,55	9,54	20,26	19,8	20,74			
ДБН В.2.2-15:2019 (постійна кратність)	Сх-Зх	8,19	9,766	17,79	20,65	20,09	21,33	0,828	0,828	0,828
	Пд-Пн	7,36	8,25	14,6	21,26	20,95	21,92			
	Пн-Пд	8,72	10,47	19,4	20,43	19,9	21,2			
EN 16798-1:2019 (за графіком)	Сх-Зх	4,11	5,84	10,05	21,89	21,84	22,13	0,503	0,435	0,7
	Пд-Пн	2,59	3,56	4,98	22,37	22,43	22,67			
	Пн-Пд	5,02	6,54	11,93	22,16	22,17	22,77			
За результатами експерименту (за графіком)	Сх-Зх	3,49	4,73	8,26	21,94	21,9	22,2	0,449	0,387	0,628
	Пд-Пн	2,09	2,85	3,85	22,42	22,5	22,78			
	Пн-Пд	4,37	5,28	9,94	22,17	22,17	22,82			

[1] – Сх-Зх – спальні орієнтовані на схід, кухня – на захід;
– Пд-Пн – спальні орієнтовані на південь, кухня – на північ;
– Пн-Пд – спальні орієнтовані на північ, кухня – на південь.

Досліджені підходи включають як метод задання постійної кратності повітрообміну (CVA) для всього житла, визначеної згідно рекомендацій ASHRAE Std 62.2, EN 16798-1:2019 та ДБН В.2.2-15:2019, так і використання графіків повітрообміну в різних кімнатах (SVA) відповідно до EN 16798-1:2019 та типового експлуатаційного режиму в різних кімнатах. Графічна інтерпретація результатів представлена на рисунку 3.17 [15].



а)

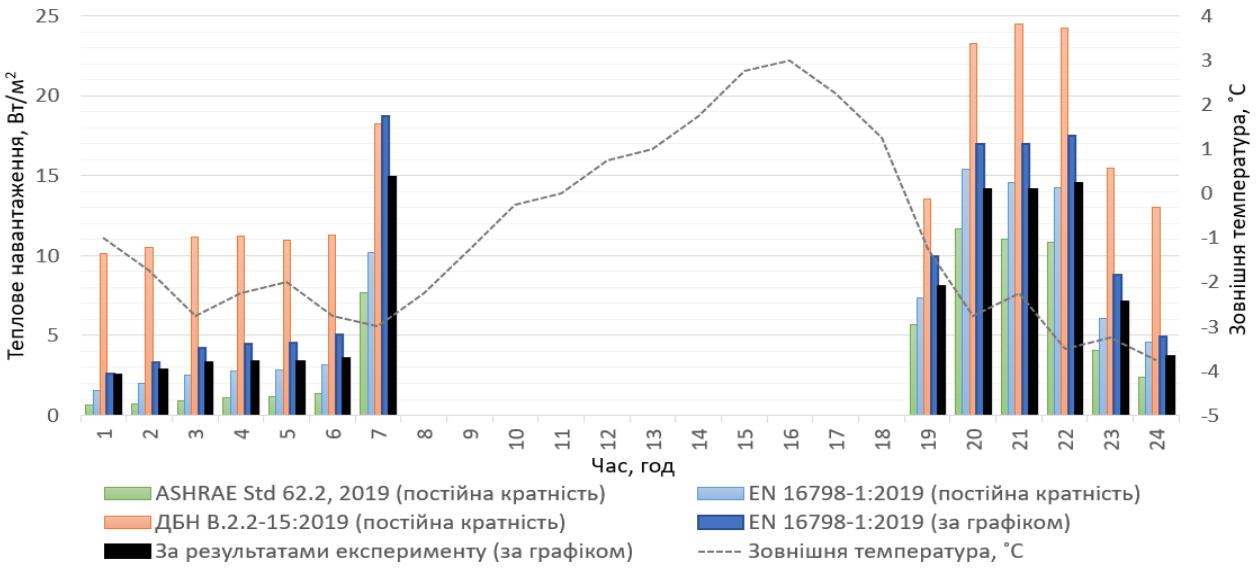
б)

Рис. 3.17 – Залежність середньодобового енергоспоживання від середньозваженої кратності повітрообміну, на базі різних підходів до задання повітрообміну, для робочого (а) та вихідного (б) дня

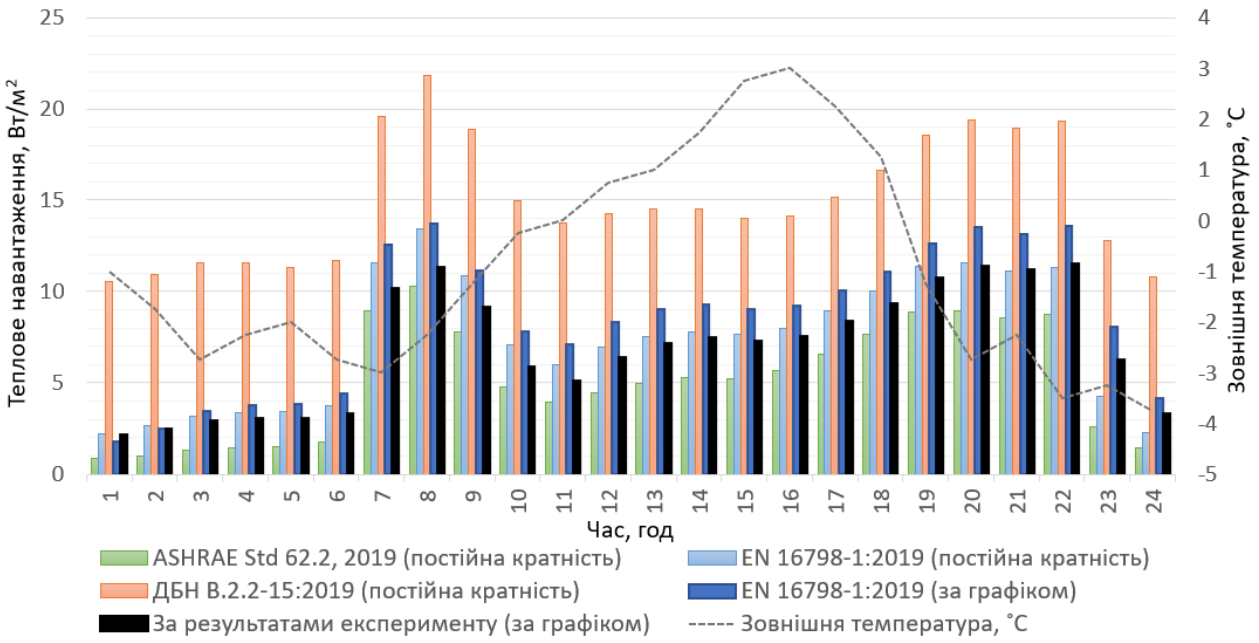
Результати динамічного моделювання свідчать про те, що від обраного підходу до задання повітрообміну в значній мірі залежить кількість теплоти, що витрачається на нагрів свіжого повітря, яке надходить ззовні, та результат визначення споживання енергії на опалення. У випадку використання постійних значень кратності той самий рівень повітрообміну забезпечується у години використання і невикористання приміщень. При цьому маємо практично пряму пропорційну залежність кратності повітрообміну від енергоспоживання для робочого та вихідного дня (рисунок 3.17). За заданим режимом переривчастого опалення у робочі дні, при відсутності людей в квартирі (7:00 – 18:30), в результаті моделювання виявлено, що використання

навіть найвищого з досліджуваних значень кратності не призведе до увімкнення котла та збільшення теплового навантаження в ці години. Це відповідає режиму роботи котла, що має місце на практиці для розглянутих погодних умов. За умов поєднання з впливами графіків переривчастого опалення та теплонадходжень від інших джерел, перш за все від сонця, вплив кратності на середні температури внутрішнього повітря не має регулярного характеру. Для репрезентативних робочого та вихідного днів прийняті найбільш холодні для обраного періоду погодні умови, тому для цих днів дані по споживанню енергії на опалення вищі за середньодобові за місяць. Таким чином, результати свідчать про те, що підхід до врахування режиму повітрообміну безпосередньо впливає на енергоспоживання будівлі [15]. Зрозуміло, що зменшення кратності повітрообміну призводить і до зменшення витрат на опалення. Використання різних значень кратності для окремих приміщень зменшує рівень енергоспоживання у порівнянні з однаковим еквівалентним значенням для усієї квартири (рисунок 3.17 (б), вихідний день). При цьому зменшення кратності в робочі години при забезпеченні того ж рівня загальної кратності навпаки збільшує рівень енергоспоживання на опалення (рисунок 3.17 (а), робочий день).

Вплив вибраного методу до задання повітрообміну на погодинне теплове навантаження квартири представлено на графіках на рисунку 3.18.



а)



б)

Рис. 3.18 – Погодинне теплове навантаження в залежності від підходу до задання повітрообміну в квартирі за тих самих кліматичних умов для робочого (а) та вихідного (б) дня

Застосовування постійних значення кратності повітрообміну для всього житла, наведених в нормах ASHRAE і CEN є доцільним для визначення енергетичних показників житлових будівель за умов експлуатації, що доводиться подібним рівнем енергоспоживання як при постійній кратності повітрообміну так і при врахуванні експлуатаційного режиму. Необхідно зазначити, що українські норми ДБН В.2.2-15:2019 є завищеними, порівняно з вищезгаданими, так як вони є проектними. Задання ж графіку повітрообміну в першу чергу має сенс при наявності індивідуального регулювання опалення. В такому випадку, при використанні приміщень можна забезпечити комфортний рівень повітрообміну, а при відсутності людей знизити його до мінімального рівня [15].

З точки зору енергоефективності встановлення вікон на мікропровітрювання за присутності людей, їх закриття за відсутності, та контроль роботи витяжних систем може забезпечити рівень енергоспоживання, властивий приміщенням з механічною системою

вентиляції. Але для виключення впливу людського фактору більш доцільним є використання сучасних вентиляційних систем з контролем витрати повітря. Застосування регульованого режиму повітрообміну дозволяє підтримувати високу якість внутрішнього повітря за присутності людей, уникаючи при цьому підвищених втрат теплоти на нагрів зовнішнього повітря в години невикористання приміщень. При цьому механічна система вентиляції має бути обладнана сенсорними датчиками присутності людей, внутрішньої температури, концентрації CO_2 та летючих органічних сполук. Необхідно також зазначити, що з метою енергозбереження, використання вентиляційних систем з контролем витрати повітря має супроводжуватись можливістю задання переривчастого режиму опалення приміщень за допомогою термостатів в кожній кімнаті. З точки зору індивідуального рівня комфортності застосування контролю повітрообміну за графіком може забезпечити кращу якість повітря в години використання приміщення [15].

За допомогою динамічного моделювання приміщення було отримано динаміку теплового навантаження квартири протягом березня для фактичних кліматичних умов. Результати по кожній з кімнат, аналогічні до рисунку 3.19, можуть лягти в основу локального програмування контролерів [15].

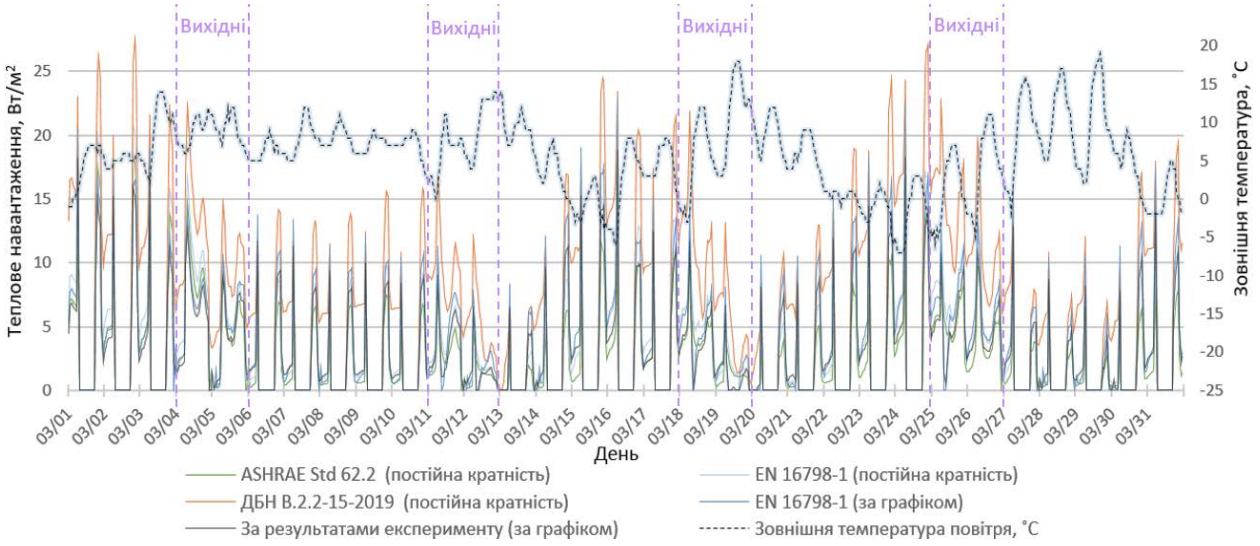


Рис. 3.19 – Теплове навантаження квартири протягом березня при різних підходах до розрахунку повітрообміну

3.3 Результати щодо енергетичної ефективності використання переривчастих режимів опалення

3.3.1 Дослідження ефективності переривчастого режиму опалення для житлового приміщення

В результаті моделювання переривчастого режиму опалення в програмному забезпеченні EnergyPlus, для тих самих зовнішніх температур повітря, що були під час експерименту (розділ 2.3.1) були отримані графіки профілю температури (рисунок 3.20 і 3.21).

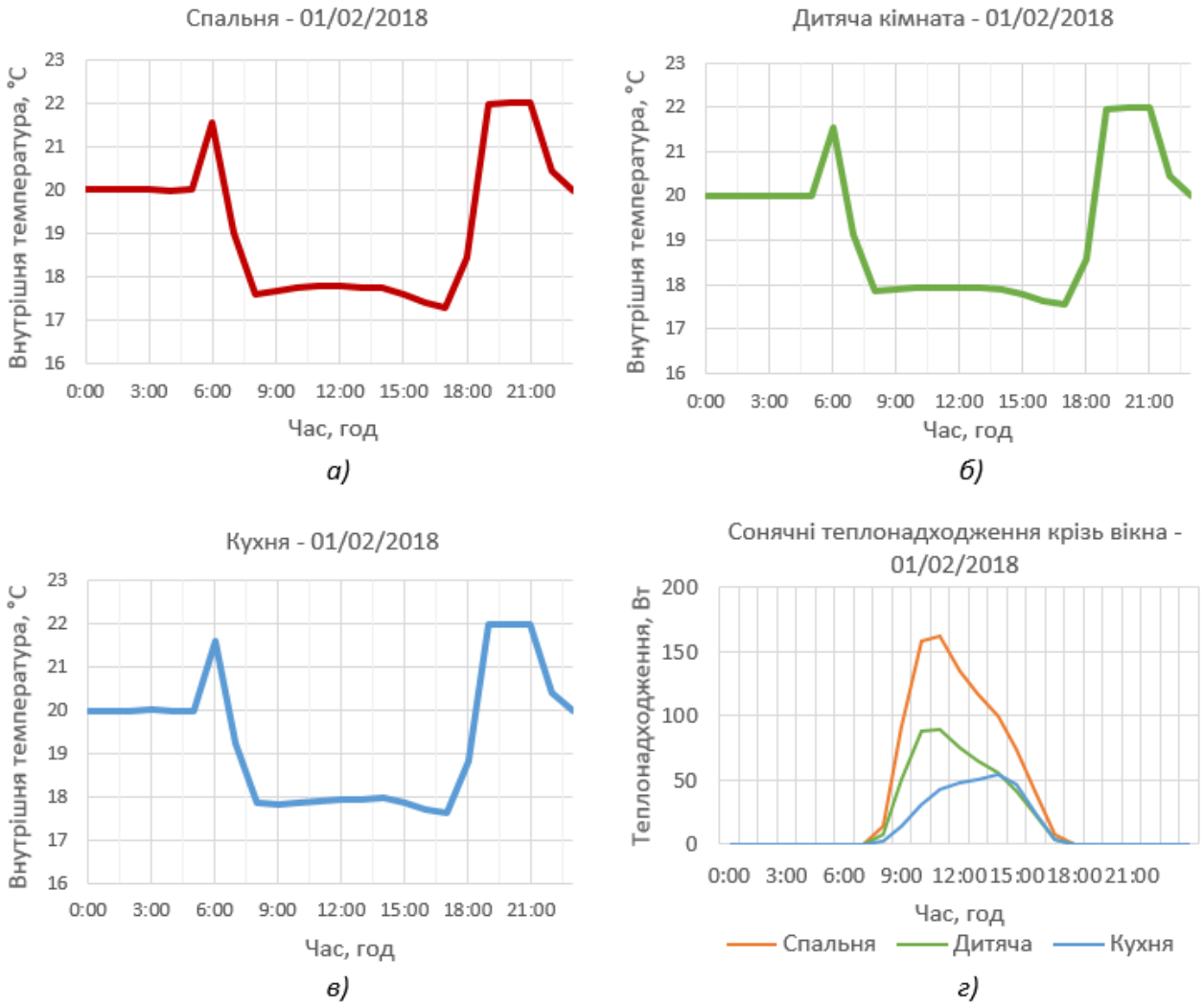


Рис. 3.20 – Профілі температури внутрішнього повітря, отримані в результаті динамічного моделювання, (а – спальня, б – дитяча, в – кухня) та сонячної радіації (г) для робочого дня

Для врахування різниці між фактичним та програмним (з IWEC файлу) сонячним випромінюванням, також наведені графіки кількості сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню вікон в аналізовані дні, в програмній моделі [11].

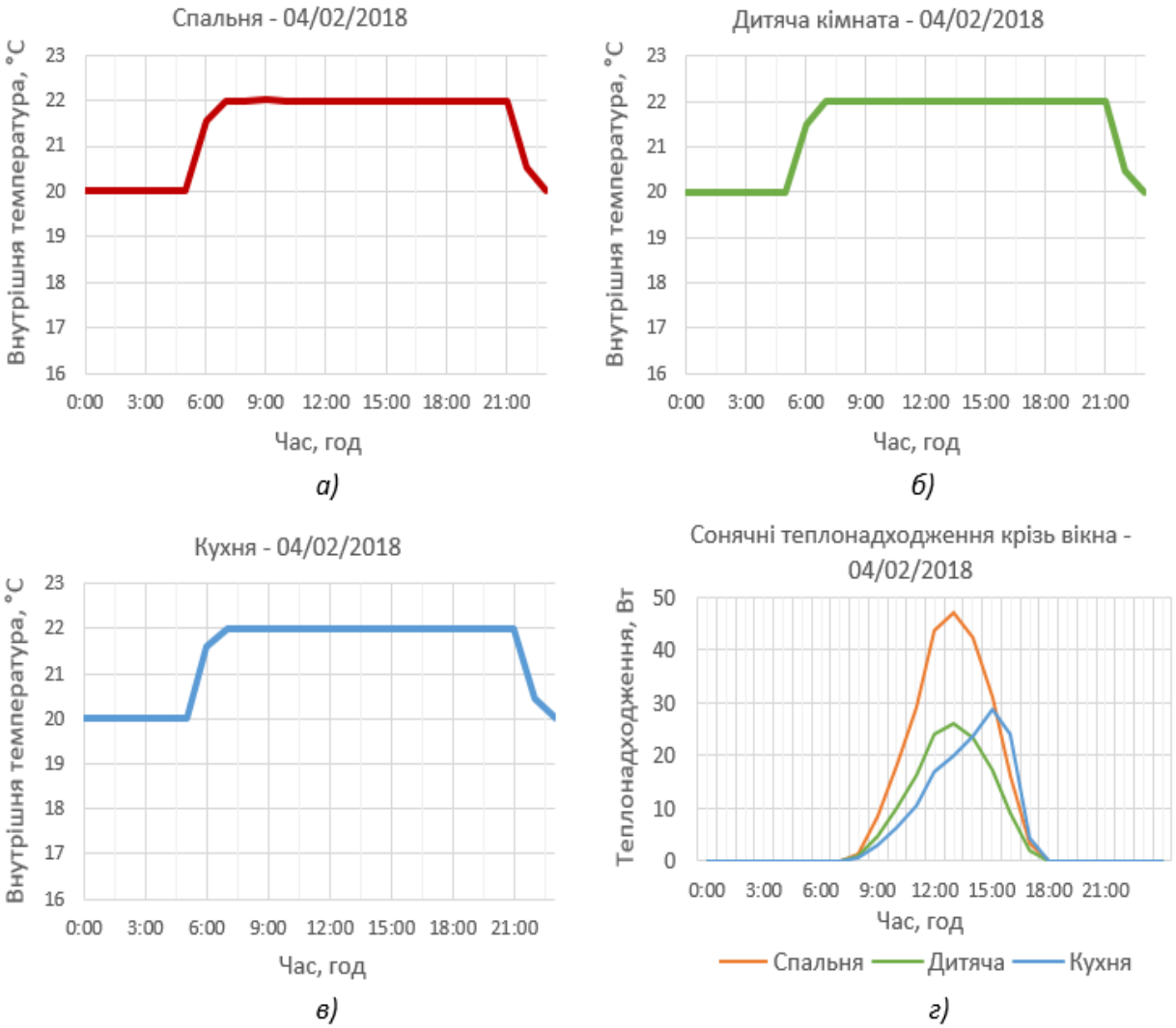
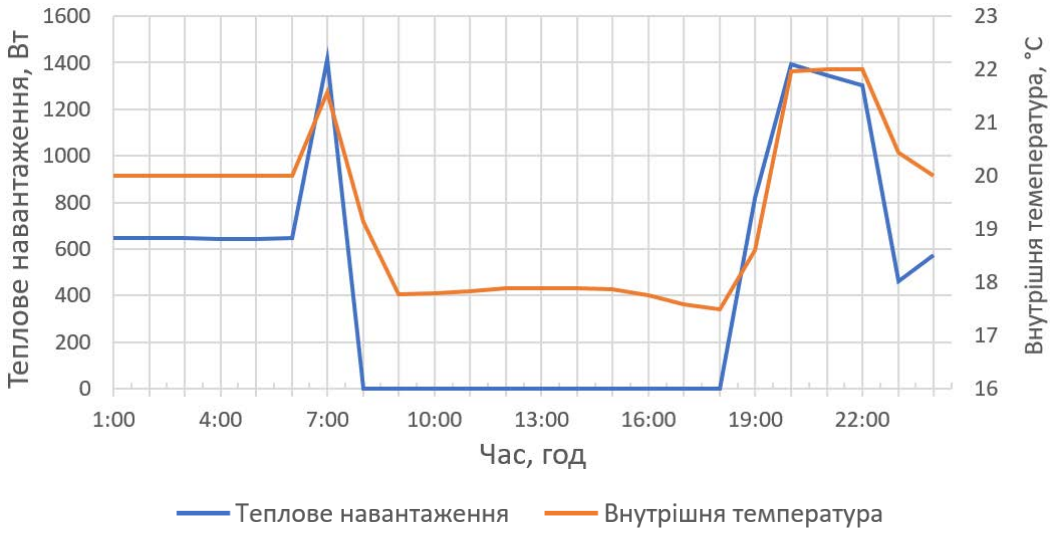


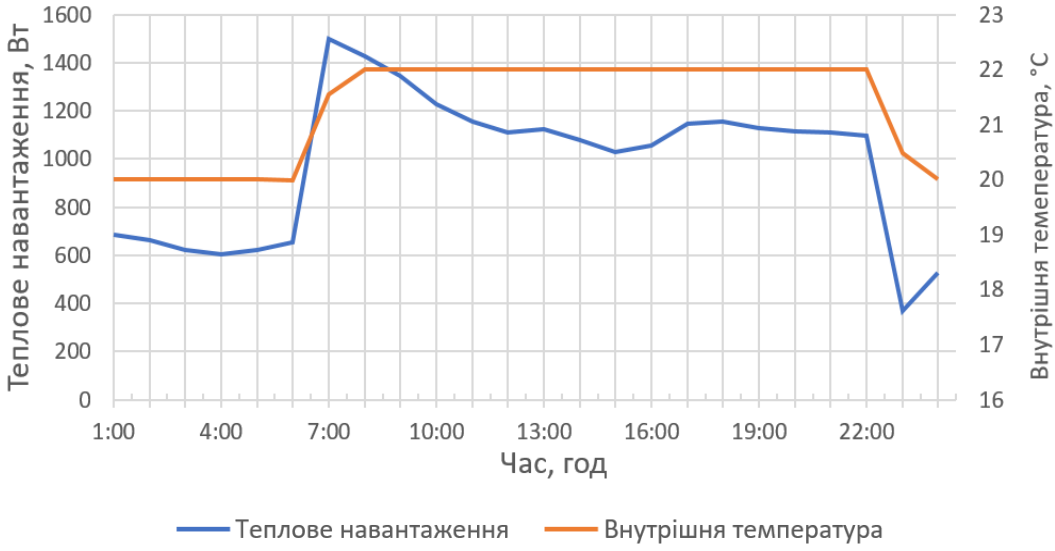
Рис. 3.21 – Профілі температури внутрішнього повітря, отримані в результаті динамічного моделювання, (а – спальня, б – дитяча, в – кухня) та сонячної радіації (г) для вихідного дня

Необхідно зазначити, що вплив теплової інерції конструкцій більше виражений в реальних графіках на рисунках 3.1 і 3.2 [11].

Для аналізу навантаження на систему опалення всієї квартири в ті самі дні, були створені графіки, зображені на рисунку 3.22 [11].



а)



б)

Рис. 3.22 – Результати моделювання залежності середньої температури в квартирі (internal temperature) від навантаження (heating rate) на систему опалення в робочий (а) та вихідний (б) дні

При постійному регулюванні системи опалення можна досягти значних заощаджень. Програмно створена динамічна модель надає можливість аналізувати потенціал енергозбереження при застосуванні різних варіантів переривчастого режиму опалення. За допомогою енергетичної моделі квартири в EnergyPlus було визначено економію теплової енергії, використовуваної на потреби опалення квартири, за опалювальний період. Тож, досліджено енергоспоживання при постійному режимі опалення 22°C та

переривчастому режимі 16-22°С (рисунок 2.14). В таблиці 3.5 неведені змодельовані та фактичні результати енергоспоживання квартири. Фактичне споживання за опалювальний період було приведено до стандартних погодних умов з врахуванням фактичних та нормативних градусо-діб (ГД) [11].

Таблиця 3.5 – Енергоспоживання квартири

Режим роботи системи опалення	EnergyPlus	Фактичне
Постійний, кВт·год	4805,56	-
Переривчастий, кВт·год	4019,44	4824,92

Згідно з результатами моделювання в EnergyPlus, економія теплової енергії від застосування переривчастого режиму опалення для розглянутої квартири сягає 16,4%. Також, необхідно зазначити, що кількість спожитої теплової енергії за результатами складеної моделі наближена до значення фактичного теплоспоживання квартири за опалювальний період [11].

На рисунку 3.23 наведено результати помісячного моделювання енергоспоживання квартири для різних зон при постійному та переривчастому режимах роботи системи опалення [11].

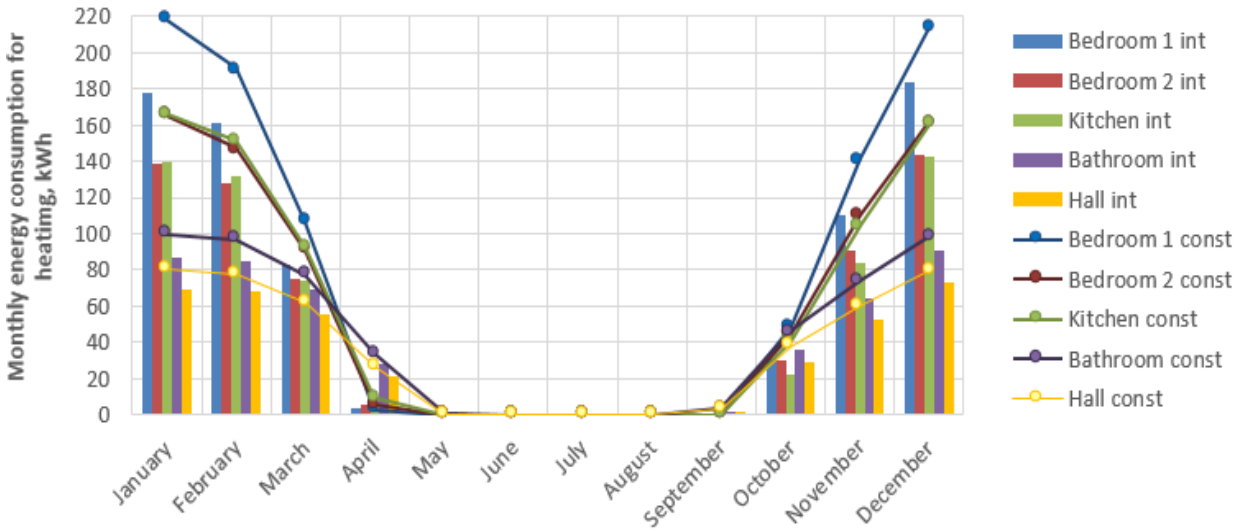


Рис. 3.23 – Результати помісячного моделювання енергоспоживання квартири при постійному (const) та переривчастому (int) режимах роботи системи опалення

3.3.2 Дослідження ефективності переривчастого режиму опалення для громадської будівлі

Для громадської будівлі було також визначено енергетичну ефективність застосування переривчастого режиму опалення. Використовуючи програмне середовище EnergyPlus, було досліджено питому надбавку до теплового навантаження зони в залежності від швидкості виходу системи опалення на режим, коли встановлюється розрахункова внутрішня температура у приміщенні [7].

Динаміка теплового навантаження за постійного та переривчастого режиму наведена на рисунку 3.24.

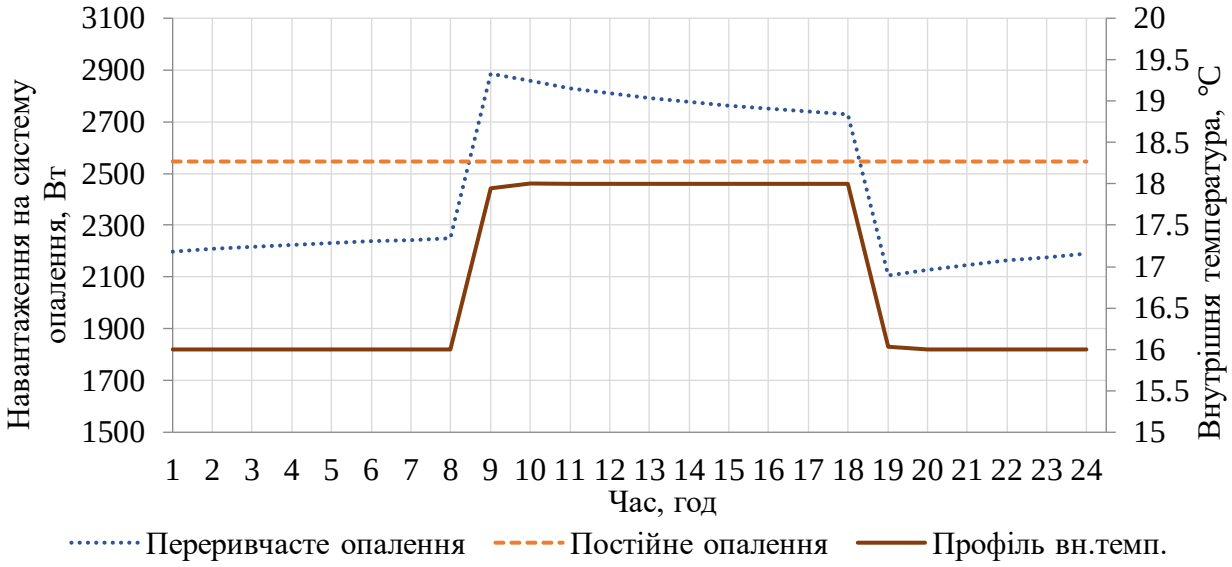


Рис. 3.24 − Середнє навантаження при постійному та переривчастому опаленні з перепадом температур 2 К та тривалістю розігріву 1 год

На рисунку 3.24 видно, як за годину системою опалення здійснюється розігрів приміщення. При цьому помітно, що існує додаткове теплове навантаження на систему для швидкого виходу на режим. Таке навантаження визначається питомою надбавкою при зниженні температури повітря у приміщенні та необхідне для компенсації швидкого виходу на стаціонарний режим щоб забезпечити задану температуру у години використання приміщень. Величину питомої надбавки було також досліджено в залежності

від величини температурного перепаду та необхідної швидкості розігріву приміщення (рисунок 3.25) [7].

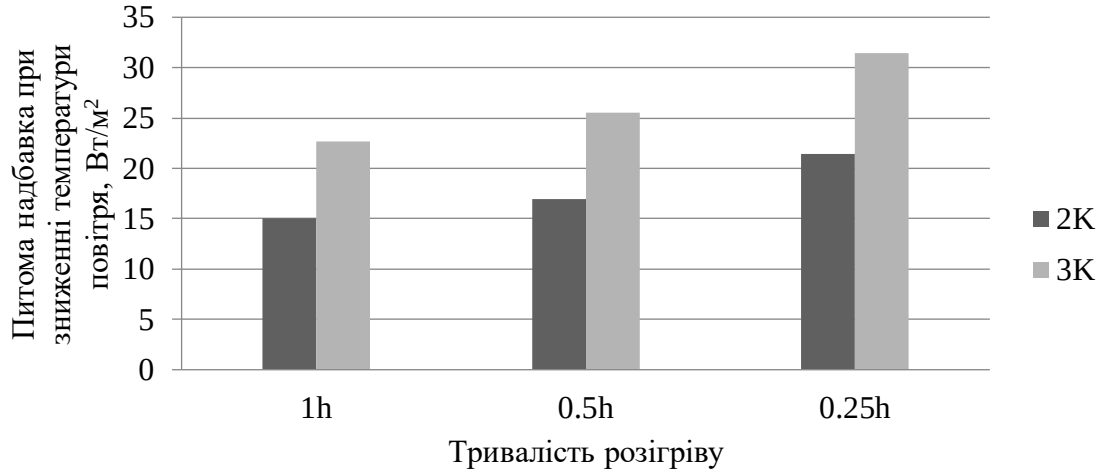


Рис. 3.25 − Питома надбавка до теплового навантаження в залежності від температурного перепаду та швидкості розігріву

Порівнюючи з нормами, зазначимо, що в [108] є інформація щодо запасу потужності при змінному тепловому режимі. Тож питома надбавка при зниженні температури повітря приміщення для масивної будівлі згідно цих ДБН становить 29 Вт/м^2 при кратності повітрообміну в неробочі години 0,1 год$^{-1}$ та 43 Вт/м^2 при кратності 0,5 год$^{-1}$. При цьому в [108] не вказано температурний перепад для якого визначені наведені значення. Зазначено лише, що зниження температури повітря має бути не нижче ніж до 15°С [7].

В той же час в EN 12831 [109] прописано, що при годинному розігріві питома надбавка при зниженні температури для масивної будівлі становить 25 Вт/м^2 при температурному перепаді 2°С та 27 Вт/м^2 – при 3°С. Результати моделювання за допомогою EnergyPlus є ближчими до надбавок, що приведені в EN 12831 [7].

Також було проаналізовано споживання енергії протягом опалювального періоду в одній із зон громадської будівлі (зона 4) за переривчастого режиму опалення при застосуванні різних температурних перепадів між годинами використання та невикористання приміщення (рисунок 3.26).

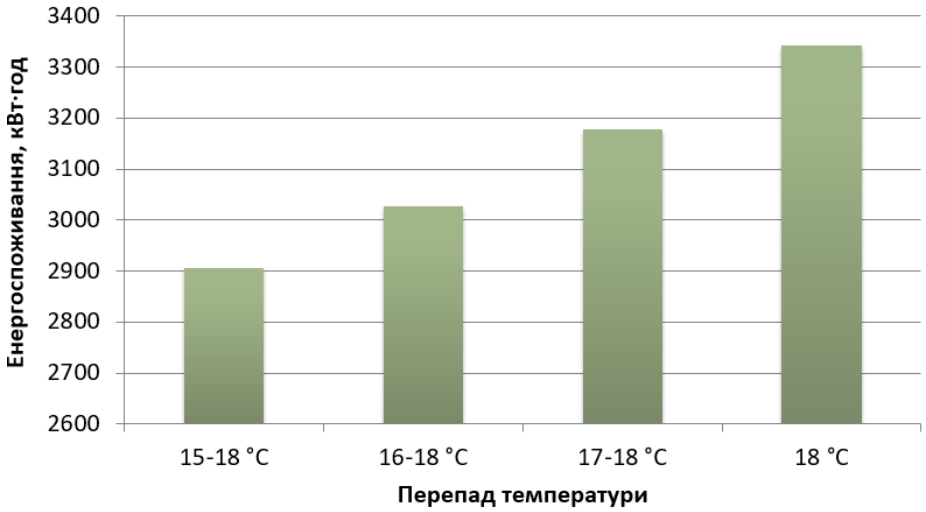


Рис. 3.26 – Енергоспоживання зони 4 громадської будівлі в залежності від температурного перепаду

Якщо в опалювальний період в зоні будівлі використовується температурний режим 15-18°C, то оптимальний коефіцієнт питомої надбавки до теплового навантаження (Sizing Factor) знаходиться на рівні 1,2 (рисунок 3.27) з точки зору швидкості виходу на стаціонарний режим та забезпечення комфортних умов в години використання приміщення [8].

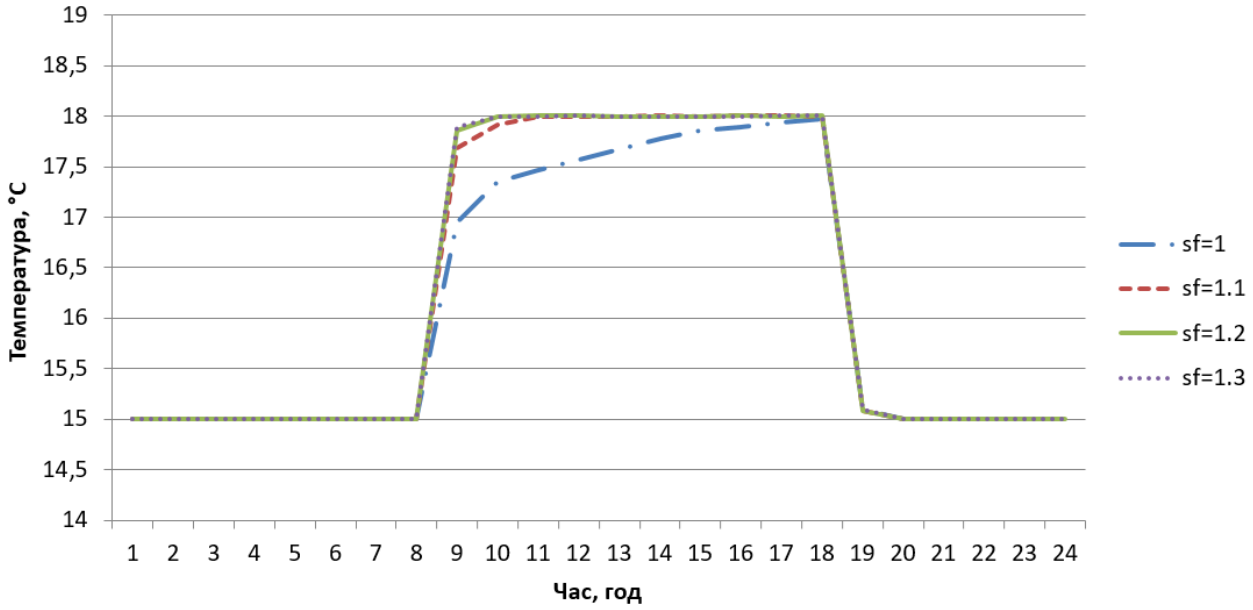


Рис. 3.27 – Профіль внутрішньої температури в залежності від коефіцієнта питомої надбавки до теплового навантаження при температурному режимі 15-18°C

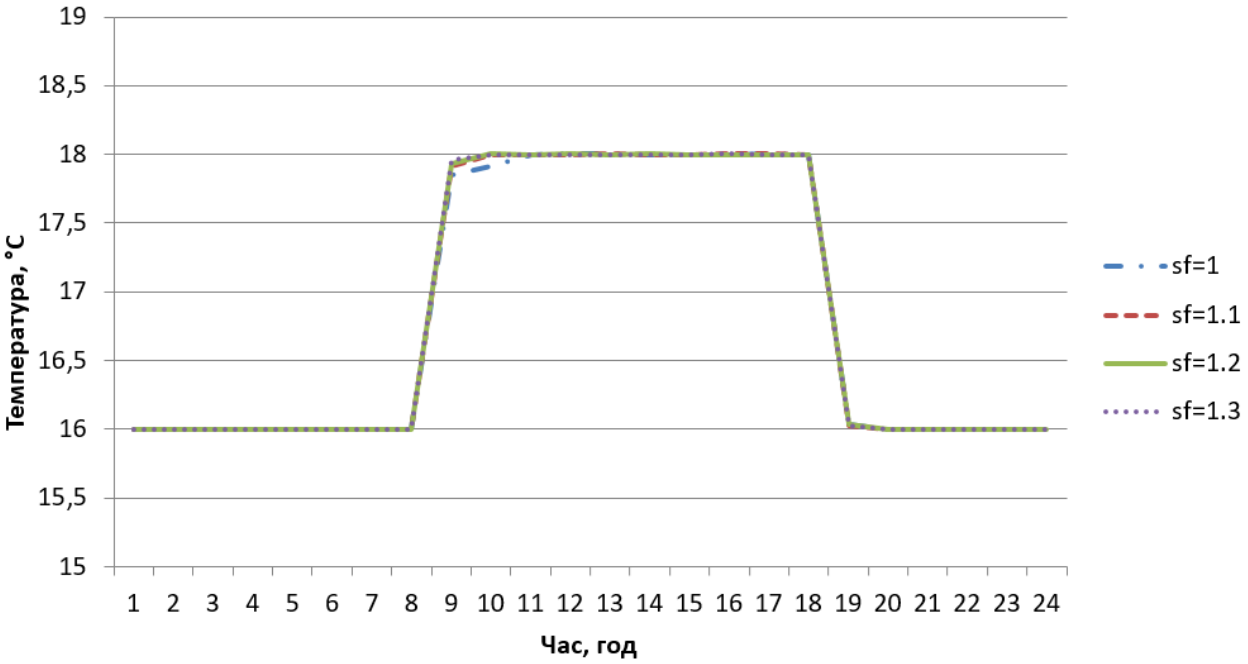


Рис. 3.28 – Профіль внутрішньої температури в залежності від коефіцієнта питомої надбавки до теплового навантаження при температурному режимі 16-18°С

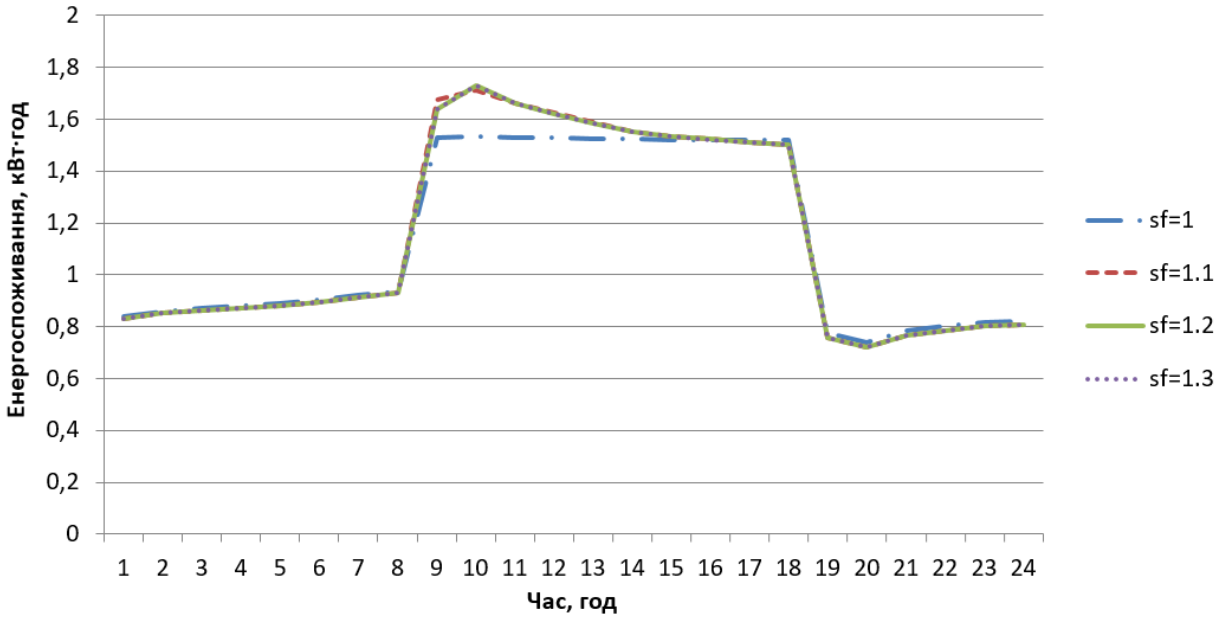


Рис. 3.29 – Профіль енергоспоживання в залежності від коефіцієнта питомої надбавки до теплового навантаження при температурному режимі 15-18°С

Аналізуючи температурний перепад необхідно зазначити, що чим більше зниження внутрішньої температури протягом годин невикористання

тим більша ефективність використання переривчастого режиму опалення з точки зору енергозбереження (рисунок 3.26). Однак навіть різниця температур 2-3°С вимагає значної питомої надбавки до теплового навантаження, оскільки важливою є також швидкість розігріву приміщення до заданої комфортної температури. Тож вибір переривчастого режиму для системи опалення потребує оптимального рішення як з точки зору енергозбереження, так і з точки зору комфортності і технічних можливостей системи.

Висновки до розділу 3

1. Наявність результатів практичного дослідження профілю температури при переривчастому режимі роботи системи опалення квартири дає можливість прослідкувати недоліки в роботі системи опалення та порівняти фактичні дані з результатами моделювання [11].

2. Результати експериментального дослідження рівня фактичної концентрації CO_2 дозволяють встановити кратність повітрообміну при різних умовах експлуатації та визначити динаміку зміни досліджуваних факторів в часі під впливом експлуатаційних та поведінкових характеристик приміщень в години їх використання та невикористання [13].

3. Врахування динаміки повітрообміну при розрахунках енергетичних характеристик призводить до підвищення середньодобової температури в приміщенні приблизно на 1-1,5˚С в порівнянні з використанням постійних значень кратності повітрообміну, рекомендованих діючими стандартами. Проведений аналіз температур на внутрішніх поверхнях зовнішніх стін і на внутрішніх стінах доводить важливість врахування теплоінерційних властивостей конструкцій в контексті динаміки зміни сонячної радіації та комфортних умов. Цей контекст слід враховувати при аналізі переривчастих режимів опалення та їх прогнозуванні.

З точки зору енергоспоживання, результати досліджень у вихідні дні показали, що використання підходу до повітрообміну за графіком призводить

до меншого споживання енергії приблизно на 25% порівняно з постійним повітрообміном. У будні, навпаки, спостерігається збільшення споживання енергії приблизно на 50% при використанні планової вентиляції за рахунок більших значень кратності повітрообміну в робочі години та зниження зовнішньої температури вночі приблизно на 30%. Тож порівняння підходів до задання повітрообміну в квартирі варто проводити не лише з точки зору енергоефективності, а й враховуючи комфортні умови і якість повітря у кімнатах.

4. В результаті дослідження вимог до повітрообміну житлових приміщені виявлено, що вентиляція в спальнях визначає загальний рівень вентиляції всього житла в типових малогабаритних квартирах. Зазвичай, для розрахунку рівня енергетичної ефективності будівель використовують нормативне значення кратності повітрообміну. Використання постійних значень кратності повітрообміну (наведених в нормах ASHRAE і CEN) при розрахунках житлових будівель, є доцільним для визначення енергетичних показників цих будівель за умов експлуатації, що доводиться подібним рівнем енергоспоживання як при постійній кратності повітрообміну так і при врахуванні експлуатаційного режиму. Необхідно зазначити, що українські норми ДБН В.2.2-15:2019 є завищеними, порівняно з вищезгаданими, так як вони є проектними. Врахування ж графіку повітрообміну в першу чергу має сенс при наявності індивідуального регулювання опалення. В такому випадку, при використанні приміщень можна забезпечити комфортний рівень повітрообміну, а при відсутності людей знизити його до мінімального рівня. Використання експериментально-розрахункових значень кратності повітрообміну дозволить більш точно визначити енергетичні характеристики будівель відповідно до реальних умов та підібрати оптимальний графік управління інженерними мережами будівлі, в тому числі підібрати оптимальні переривчасті режими опалення з забезпечення комфортних умов в робочі години [15].

5. Використання даних моделювання переривчастого режиму опалення громадської будівлі демонструє доцільність уточнення ДБН В.2.5-67:2013 та конкретизації EN 12831 стосовно запасу потужності, який виражається надбавкою до питомих тепловтрат приміщення при переривчастому опаленні.

РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ПІДСИСТЕМИ ТЕПЛОВІДДАЧІ НА БАЗІ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ

4.1 Аналіз швидкості розігріву та охолодження приміщення при застосуванні переривчастого режиму опалення

Було досліджено питання організації теплового режиму локальних приладів опалення, за допомогою яких і забезпечуються комфортні температурні умови та ефективне використання енергії. Моделювання гідродинамічних процесів у приміщенні проводилося за допомогою програмного середовища Ansys Fluent на базі CFD-моделі для дослідження теплового комфорту у житловому приміщення (п. 2.2.3).

Для перевірки якості моделі теплове навантаження приміщення в ANSYS Fluent порівнювалося з результатами моделювання для подібної моделі, створеної в програмному середовищі EnergyPlus (п. 2.3.3). Також, за результатами моделювання було складено тепловий баланс втрат та надходжень приміщення (рисунок 4.1).

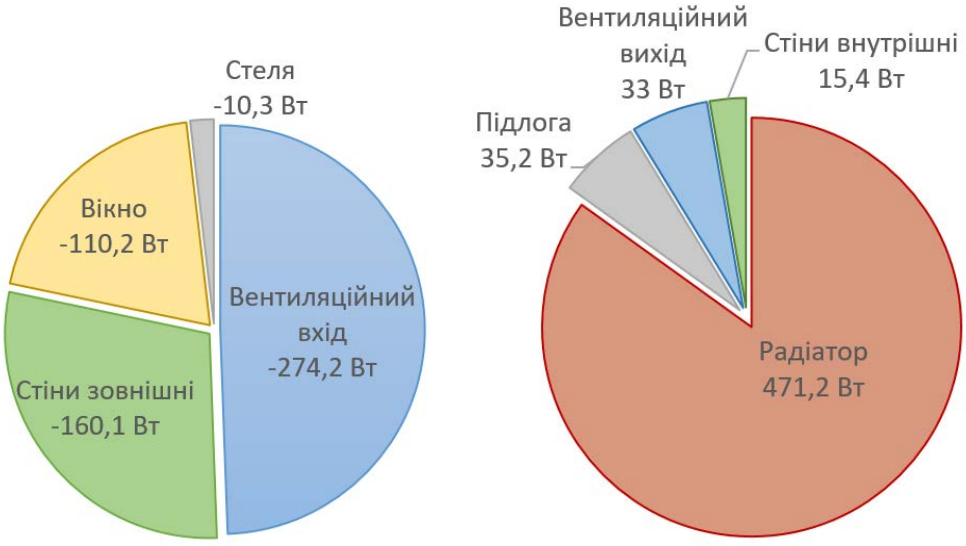


Рис. 4.1 – Баланс втрат та надходжень

Перед початком моделювання нестаціонарного режиму температуру поверхонь радіатора, яка забезпечує внутрішню температуру близько 22°C,

досліджували за постійних умов. Таким чином для заданих характеристик радіатора (розділ 2.2.3) температура поверхні радіатора була підібрана на рівні 51˚С.

Моделювання нестаціонарного режиму проводилося з урахуванням геометричних характеристик обчислювальної області, і для моделювання було обрано часовий крок в 60 секунд.

На рисунку 4.2 показані результати моделювання нестаціонарних процесів у часі.

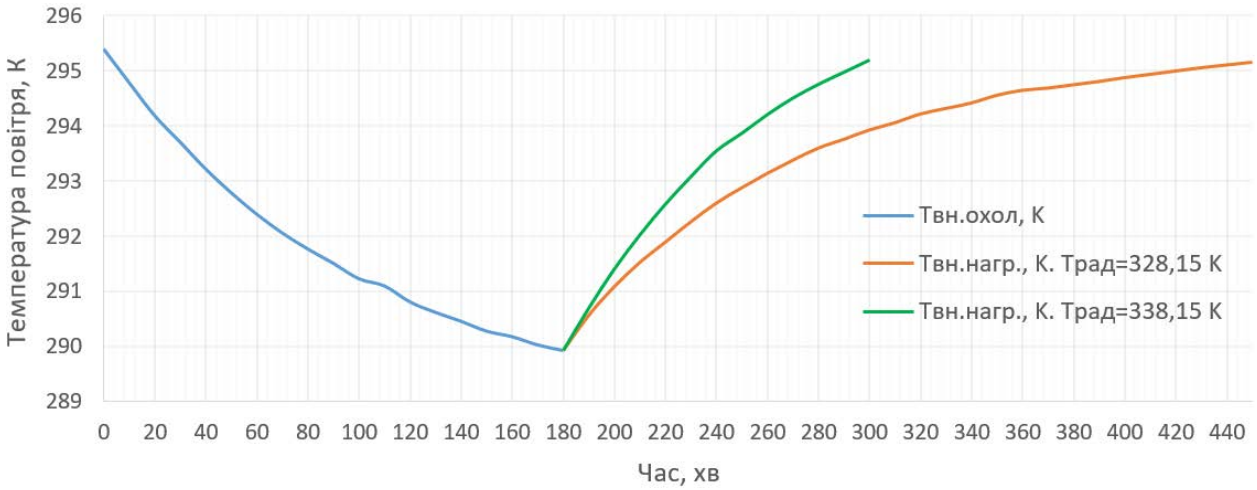


Рис. 4.2 – Результати моделювання нестаціонарних режимів охолодження та опалення

Разом з увімкненням нестаціонарного режиму прилад опалення було вимкнено і досліджено час охолодження кімнати. Середньомасова внутрішня температура знизилась на 5,5˚С за 180 хв. Також, необхідно зазначити що в процесі охолодження перші 60 хв середньорадіаційна температура була нижчою за середньомасову температуру, але при подальшому охолодженні ситуація стає зворотною [18].

Варто зазначити, що середньомасова внутрішня температура – це температура внутрішнього об’єму приміщення, в той час як середньорадіаційна температура – це усереднена за площею температура внутрішніх поверхонь огороджувальних конструкцій приміщення та приладу опалення.

Для аналізу швидкості нагрівання приміщення було досліджено два варіанти з різною температурою поверхонь радіатора (55˚С та 65˚С):

- при температурі поверхні радіатора 55˚С, приміщення нагрівається до 22˚С за 280 хвилин;
- при температурі поверхні радіатора 65˚С, приміщення нагрівається до 22˚С за 120 хвилин.

4.2 Показник впливу приладу опалення на енергоефективність системи тепловіддачі

Загальне енергоспоживання будівлі на опалення визначається як сума енергопотреби, регулярних неутилізованих втрат теплоти в системі та необхідної додаткової енергії. Регулярні втрати теплоти включають тепловтрати при генеруванні, акумулюванні, транспортуванні, регулюванні, розподіленні та тепловіддачі [30].

Метод розрахунку регулярних втрат теплоти в інженерній системі згідно з [30] заснований на аналізі наступних підсистем:

- підсистема тепловіддачі/тепловиділення та регулювання в цій підсистемі;
- підсистема розподілення та регулювання в цій підсистемі;
- підсистема генерування та акумулювання, включаючи регулювання в цій підсистемі.

При визначенні тепловтрат в підсистемі тепловіддачі/тепловиділення (тепловіддавальній складовій системи опалення) враховується енергетичний взаємозв’язок між приладом опалення (тип, характеристика, розміщення) та приміщенням, в якому він розміщений, а також враховується метод теплового регулювання у приміщенні та тип обладнання, що забезпечує це регулювання (його здатність до зменшення відхилень та коливань внутрішньої температури) [16]. Тож, згідно з [110] теплові втрати у підсистемі тепловіддачі/тепловиділення спричинені наступними факторами:

- втрати теплоти в результаті нерівномірністю розподілення внутрішньої температури $Q_{em,str}$;

- втрати теплоти для вбудованих в огороджувальні конструкції опалювальних приладів (систем підлогового, стельового та стінового опалення), які враховуються коли одна сторона огороджувальної конструкції, в якій розміщено прилад опалення, контактує з неопалювальним об'ємом, $Q_{em,emb}$;

- втрати теплоти, спричинені регулюванням внутрішньої температури у тепловіддавальній складовій системи, які залежать від підходу до регулювання внутрішнього навантаження, $Q_{em,ctr}$.

Таким чином регулярні втрати теплоти у підсистемі тепловіддачі/тепловиділення визначаються наступним чином:

$$Q_{em,ls} = Q_{em,str} + Q_{em,str} + Q_{em,ctr}. \quad (4.1)$$

У разі якщо система опалення будівлі обладнана декількома різними підсистемами тепловіддачі, то, за необхідності, така підсистема може бути розділена на зони з відповідними тепловіддавальними складовими, при цьому визначення втрат теплоти буде проведено окремо для кожної зони.

В [110] передбачено два підходи до визначення тепловтрат в підсистемі тепловіддачі/тепловиділення:

- метод, що базується на показниках ефективності підсистеми;
- метод, що базується на визначенні еквівалентної внутрішньої температури.

Представлені методи не забезпечують однакові результати для тих самих умов, але мають відносну спільну тенденцію. В [110] рекомендовано застосовувати один з методів, при цьому поєднання двох вищезазначених методів не допустиме.

В національній Методиці визначення енергетичної ефективності будівель [111] представлено саме перший метод, який дозволяє визначити загальні

втрати теплоти в підсистемі тепловіддачі/тепловиділення за наступною формулою:

$$Q_{H,em,ls} = \left(\frac{f_{hydr} \cdot f_{im} \cdot f_{rad}}{\eta_{em}} - 1 \right) \cdot Q_{H,em,out}, \tag{4.2}$$

де

$Q_{H,em,out}$ – енергія виходу від підсистеми тепловіддачі/тепловиділення (енергопотреба для опалення за обраний період часу), кВт·год;

f_{hydr} – коефіцієнт, який залежить від гідравлічного налагодження системи опалення;

f_{im} – коефіцієнт, що враховує наявність змінного теплового режиму у приміщенні, для постійного теплового режиму $f_{im} = 1$;

f_{rad} – коефіцієнт, що включає променеву складову теплового потоку і застосовується тільки для променевих систем опалення;

η_{em} – загальна ефективність тепловіддавальної складової системи опалення приміщення, що визначається за формулою:

$$\eta_{em} = \frac{1}{\left[1 - \left(\eta_{str} + \eta_{ctr} + \eta_{emb} \right) \right]}, \tag{4.3}$$

де

η_{ctr} – складова загальної ефективності, яка відповідає за регулювання внутрішньої температури у тепловіддавальній складовій системи опалення приміщення;

η_{emb} – складова загальної ефективності, яка відповідає за втрати теплоти за рахунок вбудованих в огороджувальні конструкції опалювальних приладів;

η_{str} – складова загальної ефективності, яка відповідає за вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні, визначається за формулою:

$$\eta_{str} = \frac{\eta_{str1} + \eta_{str2}}{2}, \tag{4.4}$$

де

η_{str1} – коефіцієнт, що враховує вплив температурного напору;

η_{str2} – коефіцієнт, що враховує питомі тепловтрати через зовнішні огороджувальні конструкції.

Приклад значень наведених вище коефіцієнтів для приміщення висотою не більше 4 м з радіаторною системою тепловіддачі приведено в таблиці 4.1. Всі коефіцієнти, запозичені із європейських стандартів, були розраховані для певних умов [16].

Таблиця 4.1 – Ефективність системи тепловіддачі з радіаторами для приміщення висотою не більше 4 м [110]

Впливовий фактор		Складові загальної ефективності			
		η_{str1}	η_{str2}	η_{ctr}	η_{emb}
Регулювання температури повітря в приміщенні	Відсутнє			0,86	
	За усередненої температури повітря приміщень будівлі			0,88	
	П-регулювання (2 К)			0,93	
	П-регулювання (1 К)			0,95	
	ПІ-регулювання			0,97	
	ПІ-регулювання з оптимізацією (напр. диспетчеризацією)			0,99	
Температурний напір (при внутрішній температурі повітря 20°С)	60 К (наприклад, 90/70)	0,88			
	42,5 К (наприклад, 70/55)	0,93			
	30 К (наприклад, 55/45)	0,95			
Специфічні втрати теплоти через зовнішні огороджувальні конструкції	Радіатор встановлено біля внутрішньої стіни		0,87		1
	Радіатор встановлено біля зовнішньої стіни:				
	- вікно без радіаційного захисту;		0,83		1
	- вікно з радіаційним захистом;		0,88		1
	- звичайна стіна.		0,95		1

В основі розрахунку енергоспоживання на потреби опалення згідно з [30] є припущення, що температура в робочій зоні та внутрішня середньооб’ємна однакові та рівномірно розподілені у приміщенні. Тому існує необхідність враховувати додаткові втрати теплової енергії, спричинені неоднорідністю розподілення внутрішньої температури, яка може бути

результатом температурної стратифікації, радіації та конвекції від системи тепловіддачі через інші поверхні, підвищеним коефіцієнтом тепловіддачі біля вікон тощо. Саме за ці втрати відповідає складова загальної ефективності, яка враховує вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні [16, 17]. Враховуючи наведені вище формули ця складова розраховується наступним чином:

$$\eta_{str} = 1 - \frac{Q_{H.em.ls}}{Q_{H.nd}} \tag{4.5}$$

На базі 3D моделі житлової кімнати (розділ 2.2.3), створеної у програмному середовищі для моделювання гідродинамічних процесів Ansys Fluent, було досліджено коефіцієнти, що відповідають за вертикальний профіль розподілення температури повітря. У заданій моделі температурний напір при внутрішній температурі повітря 22°С становить 29 К, а радіатор встановлений біля зовнішньої стіни під вікном без радіаційного захисту. За розрахункову температуру всередині житлового приміщення приймалася температура в робочій зоні на висоті 1,2 м від підлоги [112] і на відстані 2 м від огородження, яка становить $t_{роб.з.}$ = 296,047 К за температури поверхні радіатора $t_{рад}$ = 324,15 К та теплового потоку від приладу опалення 471,2 Вт [16].

На рисунках 4.3 та 4.4 представлено об’ємну візуалізацію розподілу внутрішньої температури та швидкості повітря у кімнаті за заданих умов.

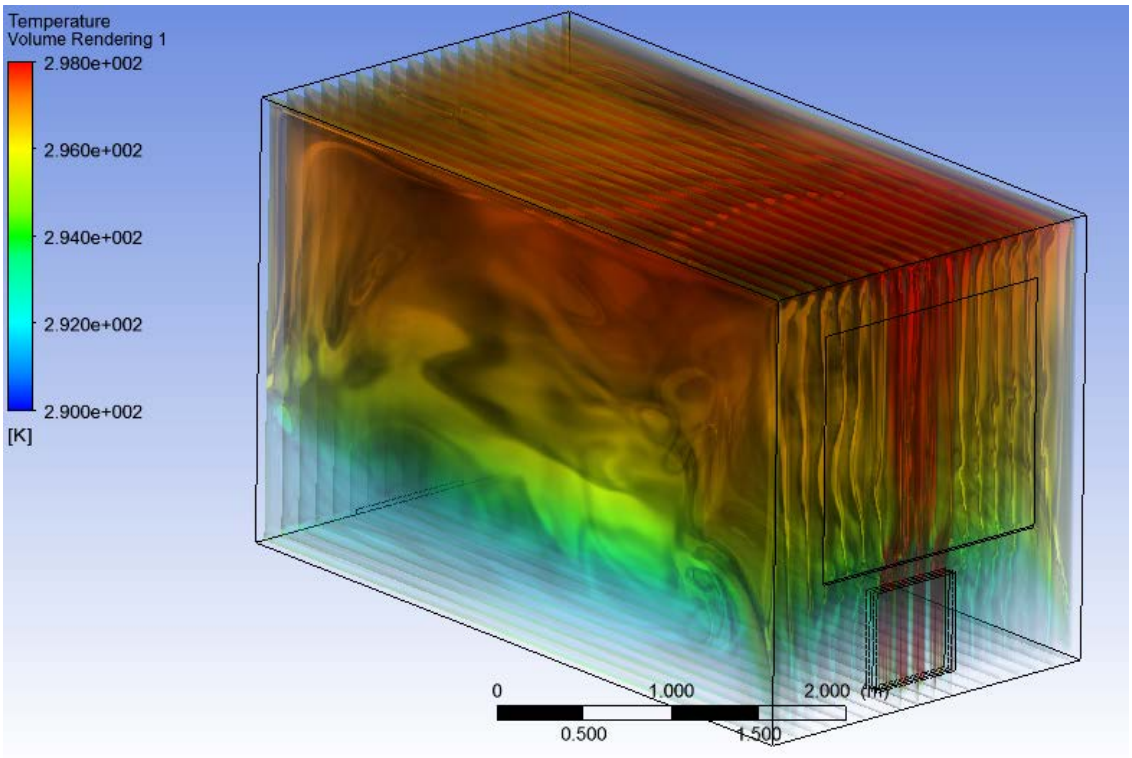


Рис. 4.3 – Об’ємна візуалізація розподілу температур у кімнаті

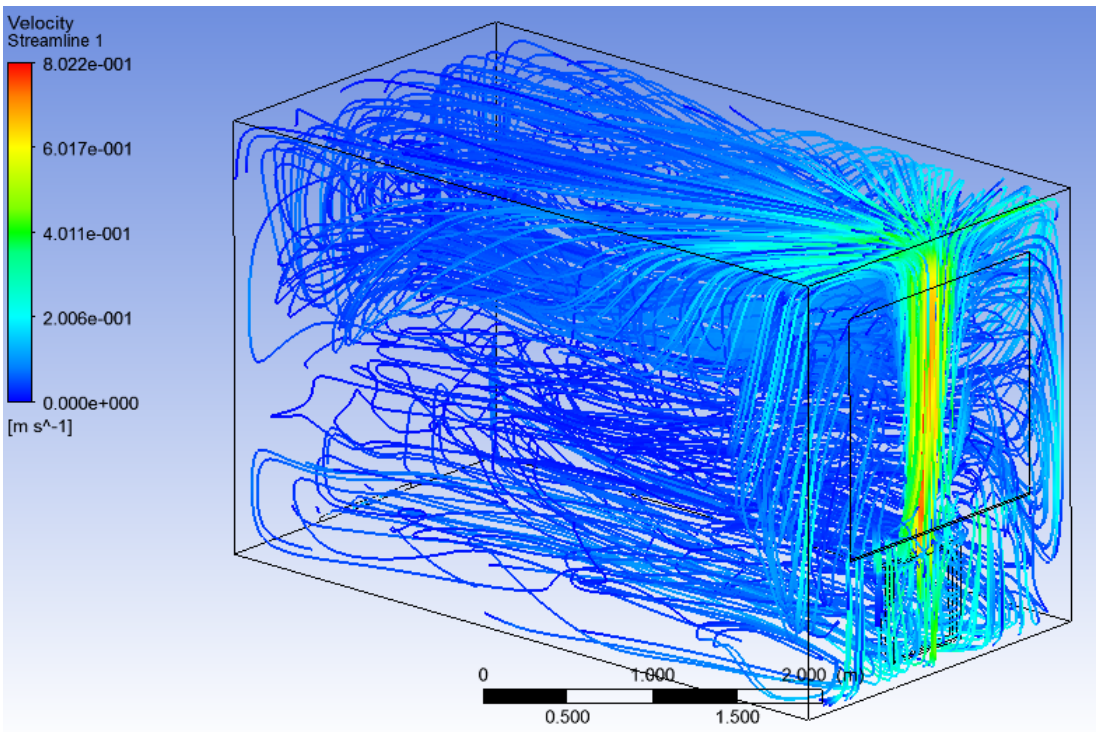


Рис. 4.4 – Об’ємна візуалізація траєкторій та швидкості руху повітря у кімнаті

Розподіл температури по висоті на відстані 2 м від огородження показано на рисунках 4.5 та 4.6 [16].

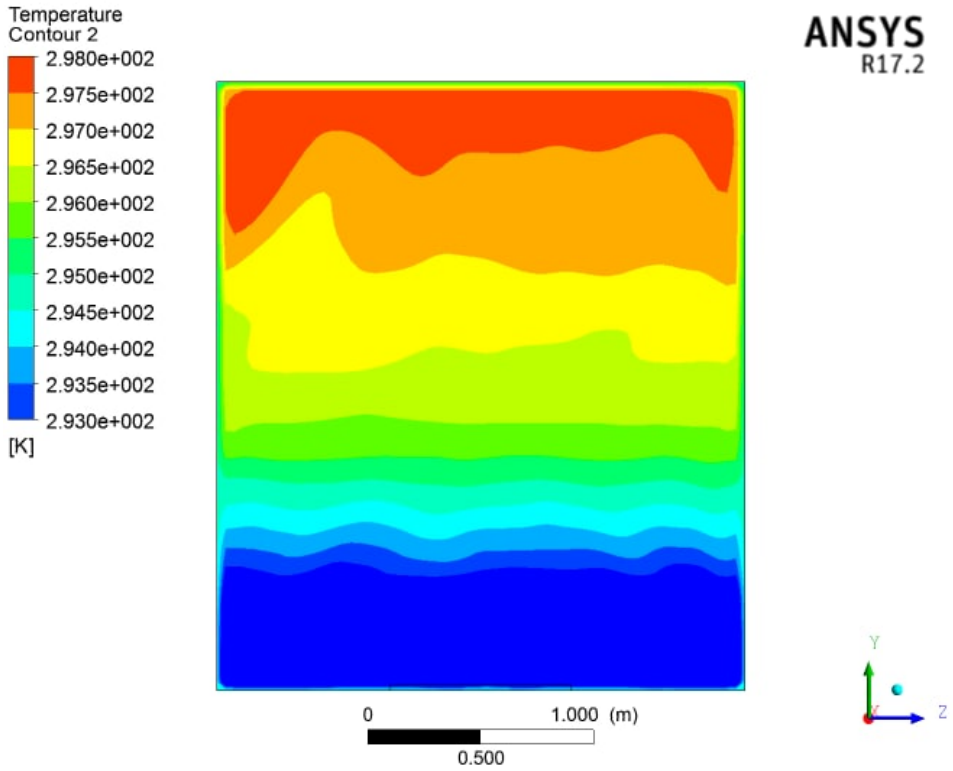


Рис. 4.5 – Контури температури у розрізі на відстані 2 м від огородження

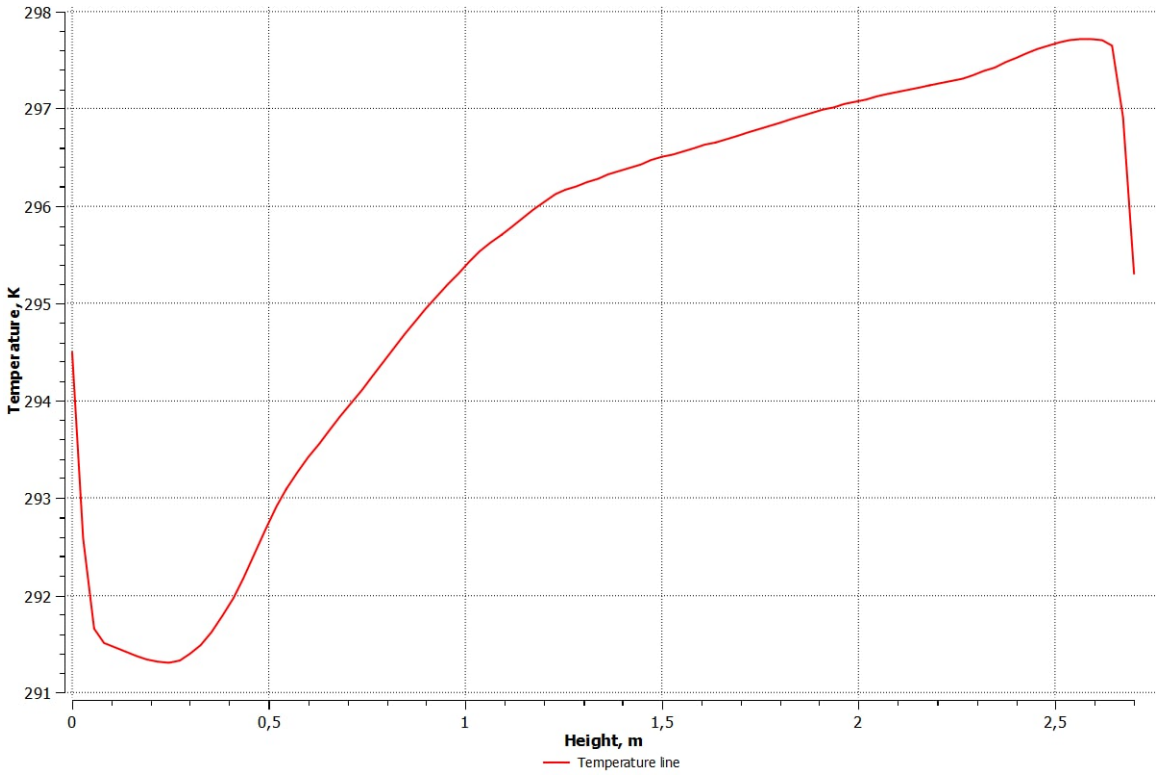
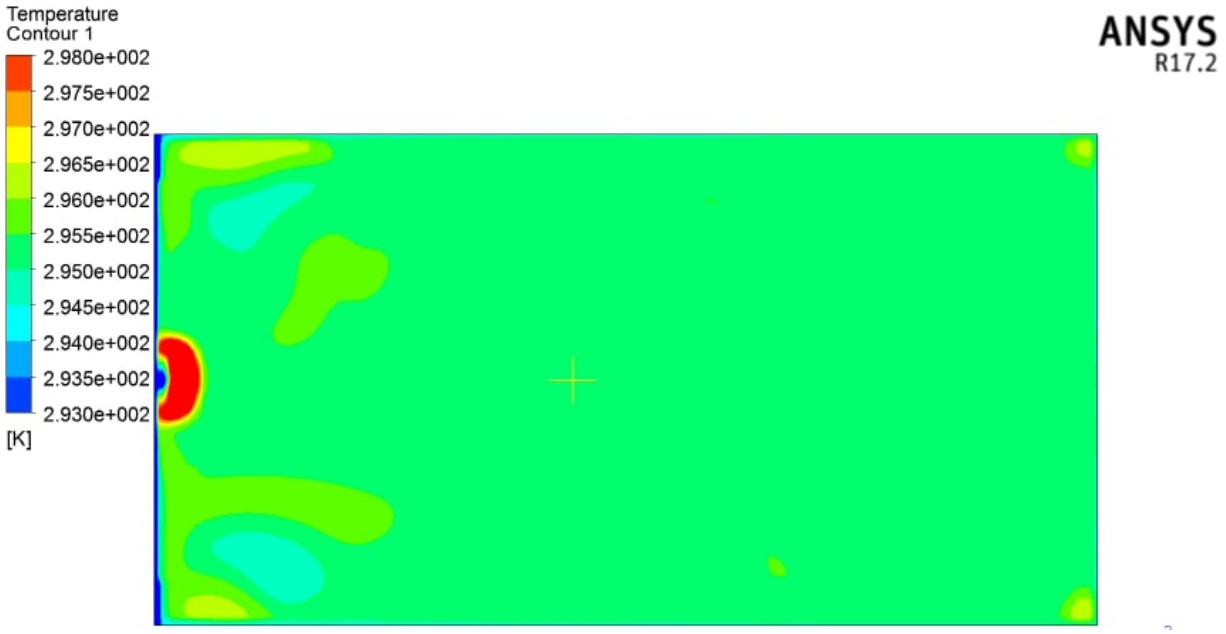
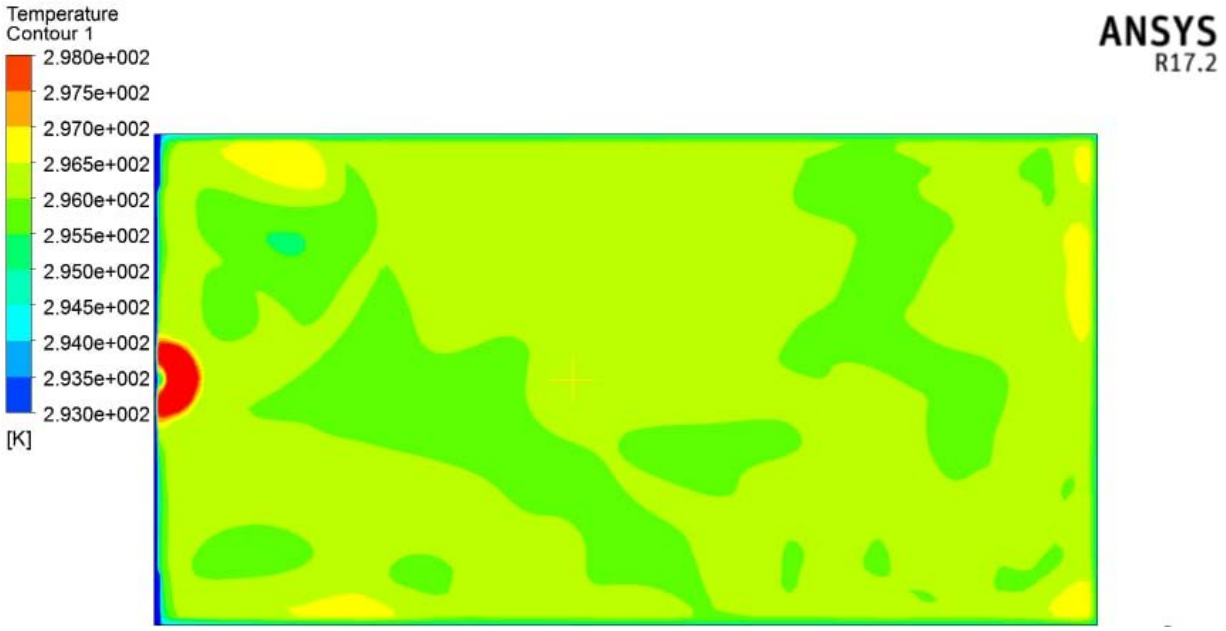


Рис. 4.6 – Графік розподілу температури по висоті на відстані 2 м від огородження

Розподіл внутрішньої температури на горизонтальній поверхні було також досліджено для висоти 1 м, 1,2 м та 1,4 м від підлоги. Контури температури на цих поверхнях представлені на рисунку 4.7 [16].



а)



б)

в)

Рис. 4.7 – Контури температури у розрізі на горизонтальній поверхі на висоті 1 м (а), 1,2 м (б) та 1,4 м (в) від підлоги

Середньооб'ємна температура у розглянутій кімнаті за тих же умов становила $t_{\text{сер.об.}}$ = 295,39 К. Враховуючи результати моделювання щодо температур, а також формули (4.4) та (4.5) визначено коефіцієнти η_{str1} та η_{str2} для заданих умов за формулами (4.6) та (4.7) [16].

Коефіцієнт, що враховує вплив температурного напору:

$$\eta_{str1} = 1 - \frac{2 \cdot Q_{H.em.ls}}{Q_{H.nd}} = 1 - \frac{2 \cdot ((t_{\text{рад.}} - t_{\text{сер.об.}}) - (t_{\text{рад.}} - t_{\text{роб.з.}}))}{(t_{\text{рад.}} - t_{\text{роб.з.}})}, \quad (4.6)$$

$$\eta_{str1} = 1 - \frac{2 \cdot ((324{,}15 - 295{,}39) - (324{,}15 - 296{,}047))}{324{,}15 - 296{,}047} = 0{,}953.$$

Коефіцієнт, що враховує питомі тепловтрати через зовнішні огороджувальні конструкції:

$$\eta_{str2} = 1 - \frac{2 \cdot Q_{H.em.ls}}{Q_{H.nd}} = 1 - \frac{2 \cdot ((t_{\text{роб.з.}} - t_{\text{н.с.}}) - (t_{\text{сер.об.}} - t_{\text{н.с.}}))}{(t_{\text{сер.об.}} - t_{\text{н.с.}})}, \quad (4.7)$$

$$\eta_{str2} = 1 - \frac{2 \cdot ((296{,}047 - 251{,}15) - (295{,}39 - 251{,}15))}{295{,}39 - 251{,}15} = 0{,}97.$$

В ході моделювання було отримано зміну середньооб'ємної температури та температури на робочій поверхні. Різниця між ними і впливає безпосередньо на значення цих коефіцієнтів, наведених в ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Таким чином методом гідродинамічного моделювання можна уточнити тепловтрати підсистеми тепловіддачі та наведені в стандарті коефіцієнти [16].

Досліджуючи вплив температурного напору, необхідно зазначити, що при розрахунку втрат теплоти в підсистемі тепловіддачі за наведеною методикою, вищий температурний напір призводить до збільшення тепловтрат в цій підсистемі, а відповідно і до підвищення загального енергоспоживання.

4.3 Як змінюються умови комфортності при різному повітрообміні та різній температурі опалювального приладу

На комфортні умови всередині приміщень впливає не лише температура та вологість повітря, а й швидкість повітрообміну. Оптимальною умовою кліматичного комфорту в приміщенні можна вважати такий баланс температури, вологості та швидкості повітря, при якому людина здатна довго обходитися без напруги механізмів терморегуляції. Втім, ці параметри - всі разом чи окремо - не повинні змінюватися довільно, а лише в деяких певних межах, що відповідають умовам комфорту мешканців. Причому швидкість повітрообміну безпосередньо впливає на два інші показники.

У розділі 3.2.2 було досліджено можливості щодо регулювання рівня повітрообміну у приміщеннях, в залежності від фактичної необхідності у конкретний час для оптимального підтримання комфортних умов. При збільшенні швидкості повітрообміну (наприклад, коли мешканці повертаються додому (рисунок 3.13, таблиця 3.3)) виникає потреба у забезпеченні додаткового теплового навантаження на прилад опалення. До того ж, якщо у приміщенні реалізовано переривчастий режим опалення, це

також потребує збільшення теплового навантаження. У розділі 3.3.2 було проаналізовано коефіцієнт питомої надбавки до теплового навантаження при розігріві приміщення. Тож в ході проведення досліджень виникла необхідність оцінити безпосередній вплив рівня повітрообміну у приміщенні на внутрішню температуру та тепловий потік від приладу опалення.

На базі 3D-моделі приміщення в Ansys Fluent (розділ 2.2.3) було досліджено залежність внутрішньої температури та теплового навантаження від кратності повітрообміну за стаціонарних умов. Температура поверхні приладу опалення приймалася незмінною $t_{рад}$ = 324,15 К (51°С), як і зовнішня проектна температура 251,15 К (-22°С). При цьому тепловий потік від радіатора змінювався зі зміною кратності повітрообміну, через вплив швидкості повітря на коефіцієнт тепловіддачі від поверхні радіатора до повітря.

Так як внутрішня середньооб'ємна та температура в робочій зоні відмінні, результати представлені для обох температур. Результати CFD-моделювання впливу рівня кратності повітрообміну на внутрішню температуру та тепловий потік від радіатора представлені на рисунку 4.8.

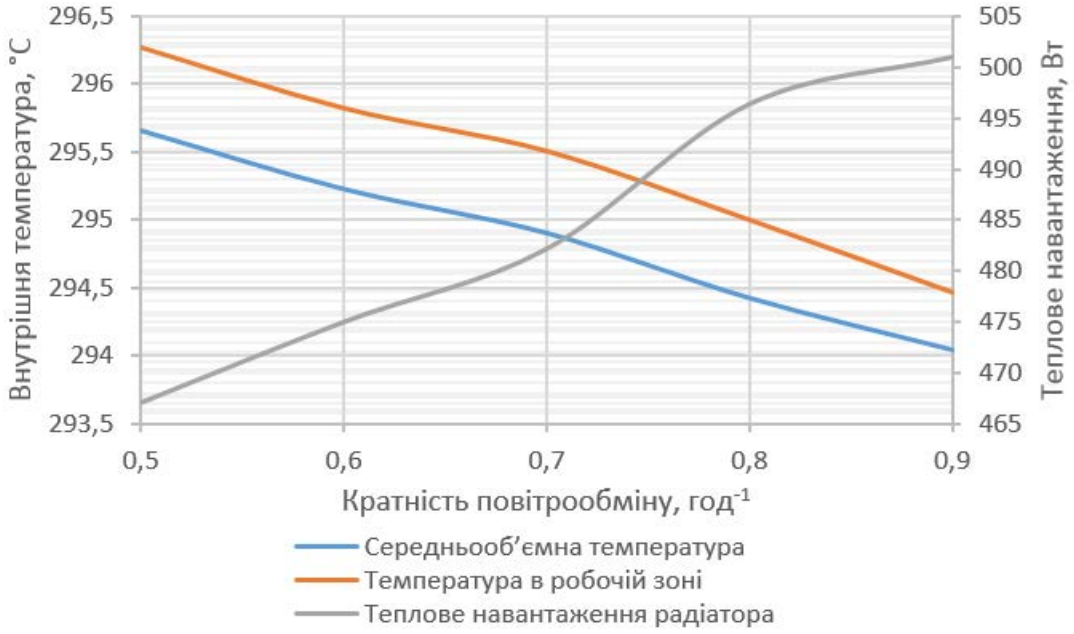


Рис. 4.8 – Вплив кратності повітрообміну на внутрішню температуру та теплове навантаження

Результати моделювання (рисунок 4.8) показують, що кожне збільшення кратності повітрообміну на 0,1 год$^{-1}$ призводило до зростання теплового навантаження на 1-2%, та зменшення внутрішньої температури на 0,35 – 0,45 К. Співвідношення внутрішньої середньооб'ємної температури до температури в робочі зоні залишалося постійним.

Також було проведено дослідження впливу температури опалювального приладу на теплове навантаження та внутрішню температуру у кімнаті за стаціонарних умов. В ході аналізу результатів моделювання було виявлено, що за постійної кратності повітрообміну 0,56 год$^{-1}$ та зовнішньої температури -22°С, підвищення температури поверхні радіатору на 5°С (від 51°С до 56°С) збільшило теплове навантаження на 13,6% (від 471,2 Вт до 544,3 Вт), а внутрішню температуру майже на 1°С (від 22,2 °С до 23,1°С).

Висновок до розділу 4

1. В ході досліджень було здійснено CFD-моделювання нестаціонарного режиму на основі 3D-моделі кімнати, створеної в програмному середовищі ANSYS Fluent. Згідно з результатами моделювання, повітря у приміщенні охолоджується швидше ніж нагрівається за тієї ж самої температури радіатора. Тож існує необхідність у надбавці до теплового навантаження при роботі системи опалення в переривчастому режимі. Результати моделювання для даної кімнати можуть лягти в основу локального програмування контролерів.

2. На базі 3D моделі було також досліджено коефіцієнти, що враховують вплив температурного напору та питомих тепловтрат через зовнішні огороджувальні конструкції при розрахунку втрат теплоти в підсистемі тепловіддачі. В ході моделювання отримано зміну середньооб'ємної температури та температури на робочій поверхні. Різниця між ними і впливає безпосередньо на значення цих коефіцієнтів, наведених в ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Тож методом гідродинамічного моделювання можна

уточнити тепловтрати підсистеми тепловіддачі та наведені в ДСТУ коефіцієнти.

3. Для того щоб оцінити питому надбавку до теплового навантаження при розігріві приміщення та підвищенні швидкості повітрообміну потрібно провести комплексний аналіз всіх факторів, які впливають, дослідивши на скільки потрібно підвищити температуру радіатора щоб забезпечити комфортні умови при необхідній кратності повітрообміну. Проведена оцінка показала, що якщо теплове навантаження приладу опалення не змінювати, при підвищенні кратності повітрообміну від 0,5 год$^{-1}$ до 0,9 год$^{-1}$ та зовнішній температурі -22°С, внутрішня температура впаде майже на 2°С.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить нові науково обґрунтовані результати застосування та подальшого розвитку методів і засобів оцінювання енергоефективності управління режимами роботи інженерних систем будівель при врахуванні впливу динаміки контрольованих та неконтрольованих факторів. У процесі виконання роботи отримано наступні науково-практичні результати:

1. Для оцінювання енергоефективності будівель та інженерних систем отримали розвиток динамічні моделі для визначення енергетичних показників за рахунок врахування експлуатаційного режиму та динаміки погодних умов, що дозволяє підвищити точність енергетичних розрахунків будівель та, використовуючи їх, дослідити вплив змін в інженерних та технічних характеристиках будівель на енергетичні показники.

2. Перевірка адекватності моделей, що розглядаються в роботі проведена для енергоспоживання будівлі в опалювальний період. Розбіжність розглянутих моделей з перевірочними становить 4-10%.

3. Визначено умови дослідження ефективності застосування переривчастих режимів опалення за різних часових інтервалів розрахунку.

4. Проведено чисельний та програмний аналіз річного енергоспоживання досліджуваних будівель при застосуванні постійного та переривчастого режимів опалення, а також залежно від орієнтації огороджувальних конструкцій за сторонами світу визначено економію від застосування переривчастого режиму, яка становить близько 17%.

5. Проведено оцінку впливу режимів повітрообміну на рівень і динаміку енергетичних показників квартири при переривчастому опаленні з урахуванням графіків зміни режиму експлуатації і погодних умов, що дозволяє визначити оптимальний графік повітрообміну, який враховує тепловий комфорт, якість повітря та можливість економії енергії.

Середньозважена кратність ефективного графіку повітрообміну в квартирі за експлуатаційного режиму робочого дня становить 0,435 год$^{-1}$.

6. Уточнено надбавку до теплового навантаження за переривчастого режиму опалення шляхом дослідження впливу температури поверхні радіатора на швидкість розігріву приміщення, що може лягти в основу локального програмування контролерів.

7. Запропоновано та випробувано методику визначення складової загального рівня ефективності підсистеми тепловіддачі, яка відповідає за вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні на базі CFD-моделювання теплообміну при опаленні приміщення, що дозволить більш точно враховувати втрати теплоти пов’язані з нерівномірністю розподілення при розрахунках енергоспоживання за ДСТУ Б А.2.2-12:2015.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 2020 Global Status Report

2. Дешко В.І., Суходуб І.О., Яценко О.І. Програмне середовище EnergyPlus для моделювання енергоспоживання будівель. Матеріали XIV Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» м. Київ 18-21 квітня 2016 р. С. 199.

3. Суходуб І.О., Яценко О.І. Дослідження підходів до визначення теплового навантаження системи опалення. Матеріали XV міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» м. Київ 25-28 квітня 2017 р. С. 138.

4. Суходуб І.О., Яценко О.І. Моделювання споживання енергії на потреби опалення громадської будівлі. Матеріали IX науково-технічної конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту «Енергетика. Екологія. Людина» м. Київ 25-26 травня 2017 р. С. 122-129.

5. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2017) Comparison of building energy consumption by instrumental and calculation approaches, Journal of New Technologies in Environmental Science, vol. 2, pp. 74-80. ISSN: 2544-7017

6. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Yatsenko O.I. (2017) Comparison of building energy consumption by instrumental and calculation approaches. Book of abstracts II International Scientific-Technical Conference “Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering”, 23-25 November 2017, Kielce, Poland. Pp. 47-55.

7. Дослідження підходів до визначення теплового навантаження системи опалення / В.І. Дешко, І.О. Суходуб, О.І.Яценко // Енергетика: економіка, технології, екологія. - 2017. - №2. - С. 52-60.

8. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2018), Building thermal state and technical systems dynamic modeling. Journal of New Technologies in Environmental Science, vol. 2, pp. 36-46. ISSN: 2544-7017.

9. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2019), Intermittent heating system operation modes for residential spaces. *Journal of New Technologies in Environmental Science*, vol. 3, pp. 139-148. ISSN: 2544-7017.

10. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Yatsenko O.I. (2019) Intermittent heating system operation modes for residential spaces. Book of abstracts III International Scientific-Technical Conference "Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering", 7-9 February 2019, Kielce, Poland. P. 26.

11. Дешко В.І., Суходуб І.О., Яценко О.І. Переривчасті режими роботи системи опалення жилого приміщення. Енергетика. Екологія. Людина: Матеріали XI науково-технічної конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту (м. Київ, 24-25 квітня 2019 р.). Київ, 2019. С. 32-40.

12. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2020). Joint influence of intermittent heating mode and outdoor factors on apartment heat load. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 191, 18-27**.**

13. Експериментальне дослідження якості повітря та повітрообміну в закладах освіти та житлових будівлях / Дешко В.І., Білоус І.Ю., Винорадов-Салтиков В.О., Суходуб І.О., Яценко О.І. // *Журнал «Вісник КНУТД»*. Випуск № 4 (148). Київ 2021, С. 25-37.

14. V. Deshko, I. Bilous, I. Sukhodub, O. Yatsenko (2021), Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes, *Journal of Building Engineering* 42 (2021) 103020. ISSN: 2352-7102**.**

15. Аналіз впливу розподілення повітрообміну між кімнатами на енергоспоживання квартири / В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, І.О. Суходуб, О.І. Яценко // Енергетика: економіка, технології, екологія. — 2021. — №1(63). — С. 39-50.

16. Дослідження коефіцієнтів ефективності підсистеми тепловіддачі на основі CFD-моделі кімнати / Дешко В.І., Суходуб І.О., Яценко О.І. // Технології та інжиніринг». Випуск № 5 (10). Київ 2022.

17. Яценко О.І. Застосування CFD-моделювання для аналізу показників ефективності роботи системи опалення. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» м. Київ 2-3 червня 2022 р., С. 81-85.

18. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Yatsenko O.I. (2021) Analysis of constant and intermittent heating modes using BEM and CFD simulation. Book of abstracts V International Scientific-Technical Conference “Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering”, 3-5 June 2021. Kielce, Poland. Pp. 39-41.

19. V. Deshko, I. Bilous, D. Biriukov, O. Yatsenko (2021), Transient energy models of housing facilities operation, Rocznik Ochrona Srodowiska (Annual Set The Environment Protection).

20. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22 червня 2017 р. № 2118-VIII // Верховна Рада України. Відомості Верховної Ради України. − 2017. − № 33. − Ст. 359.

21. Global Energy Statistical Yearbook 2019. URL: https://yearbook.enerdata.net (дата звернення 28.05.2020).

22. Огляд аналітичних робіт міжнародних енергетичних організацій щодо стану та сценаріїв розвитку світової енергетичної сфери з прогнозом інвестування в енергоефективність. МІНЕНЕРГОВУГІЛЛЯ УКРАЇНИ. Київ – 6/2018. URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/06/2.-rozvyt_svit_energet_sfery.pdf

23. Соціально-демографічні характеристики домогосподарств України у 2019 році. Державна служба статистики України. Київ – 2019. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/07/zb_sdhdu2019.pdf (дата звернення 09.06.2020)

24. КОНЦЕПЦІЯ Державної цільової економічної програми з енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії на 2021-2025 роки. URL: http://saee.gov.ua/sites/default/files/Concept_EE_2020_03_23.pdf (дата звернення 09.06.2020)

25. Денисюк С.П., Коцар О.В., Шовкалюк М.М. Оцінка енергетичних характеристик житлової будівлі та сертифікація енергоефективності. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 1. 2021.

26. Шевченко О.М. Розробка інвестиційних проектів підвищення енергоефективності студмістечка КПІ та інтеграція у освітній процес / Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. - 2020. - № 4(148) - С.77-86.

27. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математические моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий: монографія. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.

28. Yoshinoa H., Hongb T., Nord N. (2017) IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings — Analysis and evaluation methods. Energy and Buildings, 152, 124–136.

29. Hong, T., Taylor-Lange, S. C., D'Oca, S., Yan, D., & Corgnati, S. P. (2016). Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. Energy and Buildings, 116, 694–702.

30. ДСТУ Б А.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. – [Чинний від 01-01-2016] – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. – 202 с.

31. EN ISO 13790 Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling. 2008

32. Яценко О. І. Динамічне моделювання енергоспоживання та енергетичних показників будівлі : 8.05060105 / Яценко Олена Ігорівна – Київ, 2017. – 122 с.

33. Valerii I. DESHKO, Taras Y. OBORONOV, Antonina M. Terezyuk determination of primary energy consumption for residential premises heating. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES), 2019. Vol.3. №3. P. 105-111.

34. Crawley D.B., Lawrie, L.K.., Winkelmann F.C., Buhl W.F. [and others] (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Buildings, 33(4), 319-331.

35. Crawley D.B., Lawrie L.K. [and others] (2001). EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program. BS2001. IBPSA, 51-58.

36. International Weather for Energy Calculations: https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6/UKR%20%20.

37. Bilous I.Yu., Deshko V., Buyak N. Dynamic modeling of energy need for heating and thermal comfort dependence on building envelope characteristics. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES), 2019. Vol. 3. №1. P. 10-19.

38. Дешко В.І., Суходуб І.О., Сердечний П.Ю. Використання енергетичного моделювання будівель при розробці проектів з підвищення енергоефективності. ВІСНИК КНУТД No 4 (136), 2019. с. 86-96. https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.9

39. Білоус І.Ю.,Дешко В.І.,Буяк Н.А., Голубенко О.О., Гурєєв М.В. Оцінка впливу заміни вікон на енергопотребу та умови комфорту в будівлі на основі динамічного моделювання. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2018. №3. С. 52-62.

40. Deshko V., Sukhodub I., Bilous I. Mathematical models for determination of specific energy need for heating used in Ukraine. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES). 2018. Vol. 1. P. 13-25.

41. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Буяк Н.А. Термомодернізація школи та зміна рівня теплового комфорту. Енергетика та автоматика. №3. 2021. С. 62-74.

42. Buratti, C., Palladino, D., & Moretti, E. (2017). Prediction Of Indoor Conditions And Thermal Comfort Using CFD Simulations: A Case Study Based On Experimental Data. Energy Procedia, 126, 115–122.

43. Gonçalves, J. C., Costa, J. J., & Lopes, A. M. G. (2019). Analysis of the air infiltration through THE doorWAY of a refrigerated room USING different approaches. Applied Thermal Engineering, 113927.

44. Goudarzi, N., Sheikhshahrokhdehkordi, M., Khalesi, J., & Hosseiniirani, S. (2021). Airflow and thermal comfort evaluation of a room with different outlet opening sizes and elevations ventilated by a two-sided wind catcher. Journal of Building Engineering, 37, 102112.

45. Teodosiu, C., Kuznik, F., & Teodosiu, R. (2014). CFD modeling of buoyancy driven cavities with internal heat source—Application to heated rooms. Energy and Buildings, 68, 403–411.

46. Anthony, A. Sibo; Verma, Tikendra Nath (2021). Numerical analysis of natural convection in a heated room and its implication on thermal comfort. Journal of Thermal Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 37-53.

47. Laubi, R N; Abbood, N K. (2020). CFD analysis of the classroom thermal conditions built from the sandwich panel. Journal of Physics: Conference Series, 1773(1):012019.

48. Ganesh, G. A., Sinha, S. L., & Verma, T. N. (2019). Numerical simulation for optimization of the indoor environment of an occupied office building using double-panel and ventilation radiator. Journal of Building Engineering, 101139.

49. Nannei E., Tanda G., An analysis of energy consumption and thermal comfort in buildings in daily intermittent heating, Dipartimento di Ingegneria Energetica Università degli Studi di Genova, pp. 1248-1259

50. Дешко В. І. Моделювання режимів опалення приміщень / В. І. Дешко, І. Ю. Білоус // Енергетика: економіка, технології, екологія. - 2016. - № 3. - С. 97-104.

51. Дацюк Т.А. Моделирование теплового режима жилых помещений при прерывистом отоплении / Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлев, В.А. Пухкал // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. – 2014. - №5. – Библиогр.: 6 назв.

52. Баласанян Г. А. Моделирование режима прерывистого отопления комбинированной системы теплоснабжения с тепловым насосом / Г. А. Баласанян, А. А. Климчук, М. Б. Миняйло // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 17 (1126). – С. 97-102.

53. Анисимова, Е. Ю. Энергоэффективность теплового режима здания при использовании оптимального режима прерывистого отопления [Текст] / Е. Ю. Анисимова // Вестник ЮУрГУ. Серия "Строительство и архитектура" : науч. журн. - 2012. - № 38, Вып. 15. - С. 55-59.

54. Панферов, В.И. Об оптимальном управлении тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова, А.Н. Нагорная // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика» : науч. журн. - 2007. - Вып. 8. - № 20 (92). - С. 3-9.

55. Valančius, Kęstutis; Stankevičius, Vytautas. Influence of active heat capacity on indoor climate and energy demand of a building // Proceedingas of the 8th Nordic symposium on building physics in the Nordic countries. (NSB 2008) [elektroninis išteklius]. Copenhagen, June 16-18, 2008 / Technical University of Denmark, Aalborg University, The Danish Society of Engineers, Society for Building Physics. Vol. 1. Copenhagen : Technical University of Denmark, 2008. ISBN 978-87-7877-265-7. p. 65-70.

56. Куценко А.С. Анализ энергоэффективности прерывистого режима отопления здания / А.С. Куценко, С.В. Коваленко, В.И. Товажнянский // Журнал "Ползуновский вестник". − 2014. − №4-1. – С.247-253.

57. Yu. Vychtikov, M. Saparev, A. Chulkov Analyzing energy consumption while heating one-layer building envelopes in conditions of intermittent heating, MATEC Web of Conferences 106, 06013 (2017)

58. Голишев О. М. Дослідження процесу остигання будівлі в умовах припинення теплопостачання / О. М. Голишев, А. О. Голишев, Д. В. Михалків, Е. В. Серебреніков // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. - 2016. - № 844. - С. 58-63.

59. Lee Sang-Hoon (2012), Intermittent Heating and Cooling Load Calculation Method - Comparing with ISO 13790. Architectural Research 14 (1), 11-18

60. June Young Park, Mohamed M. Ouf, Burak Gunay, Yuzhen Peng, William O'Brien, Mikkel Baun Kjærgaard, Zoltan Nagy. A critical review of field implementations of occupant-centric building controls. Building and Environment 165 (2019), 15 p.

61. Bilous, I., Deshko, V., Sukhodub, I. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models, 2018 Journal of Building Engineering, vol. 20, pp. 327-336

62. Abdullah A., Cross B., Aksamija A. (2014), Whole Building Energy Analysis: A Comparative Study of Different Simulation Tools and Applications in Architectural Design. 2014 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. pp. 11-1 - 11-12.

63. Attia, S., Hensen, J.L.M., Bertran, L. & De Herde, A. (2012), Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs. Journal of Building Performance Simulation, vol. 5, no 3, pp. 155.

64. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Буяк Н.А., Петрученко О.В. Аналіз впливу енергоефективних режимів опалення на енергоспоживання будівель на основі математичного моделювання. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2020. №4. С. 32-42.

65. Younes, C., Shdid, C., Bitsuamlak, G. (2012) Air infiltration through building envelopes: A review. Journal of Building Physics, 35(3), 267–302.

66. Jokisalo, J., Kalamees, T., Kurnitski, J., Eskola, L., Jokiranta, K., Vinha, J. (2008) A comparison of measured and simulated air pressure conditions of a detached house in a cold climate. Journal of Building Physics, 32(1), 67–89.

67. Frączek, K., Chmiel, M.J., Bulski, K. (2018) Bacterial aerosol at selected rooms of school bulidings of Malopolska province. Rocznik Ochrona Srodowiska, 20, 1583-1596.

68. Canha, N., Lage, J., Candeias, S., Alves, C., & Almeida, S. M. (2017). Indoor air quality during sleep under different ventilation patterns. Atmospheric Pollution Research, 8(6), 1132–1142.

69. Canha, N., Lage, J., Coutinho, J. T., Alves, C., & Almeida, S. M. (2019). Comparison of indoor air quality during sleep in smokers and non-smokers' bedrooms: A preliminary study. Environmental Pollution.

70. Ren, Z., & Chen, D. (2015). Simulation of Air Infiltration of Australian Housing and its Impact on Energy Consumption. Energy Procedia, 78, 2717–2723.

71. Lu, D. B., & Warsinger, D. M. (2020). Energy savings of retrofitting residential buildings with variable air volume systems across different climates. Journal of Building Engineering, 30, 101223.

72. Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. Journal of Building Engineering, 100917.

73. Simanic, B., Nordquist, B., Bagge, H., & Johansson, D. (2019). Indoor air temperatures, CO2 concentrations and ventilation rates: Long-term measurements in newly built low-energy schools in Sweden. Journal of Building Engineering, 25, 100827.

74. M Cehlin, T Karimipanah, U Larsson, A Ameen. (2019). Comparing thermal comfort and air quality performance of two active chilled beam systems in an open-plan office. Journal of Building Engineering, 100827.

75. Leivo, V., Prasauskas, T., Du, L., Turunen, M., Kiviste, M., Aaltonen, A., … Haverinen-Shaughnessy, U. (2018). Indoor thermal environment, air exchange rates, and carbon dioxide concentrations before and after energy retro fits in Finnish and Lithuanian multi-family buildings. Science of The Total Environment, 621, 398–406.

76. P.F. Pereira, N.M. Ramos, R.M. Almeida, M.L. Simoes, E. Barreira, Occupant influence on residential ventilation patterns in mild climate conditions, Energy Procedia 132 (2017) 837–842 (11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway).

77. Földváry, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., Petráš, D. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. Building and Environment. 2017. Vol. 122. Pp. 363–372.

78. G. McGill, L.O. Oyedele, K. McAllister. (2015). Case study investigation of indoor air quality in mechanically ventilated and naturally ventilated uk social housing, Int. J.Sustain. Built Environ. 4 58–77.

79. Hun, D.; Jackson, M.; Shrestha, S. (2013). Optimization of Ventilation Energy Demands and Indoor Air Quality in the ZEBRAlliance Homes. Oak Ridge National Laboratory report ORNL/TM-2013/275, September, 2013.

80. A. Hesaraki, J.A. Myhren, S. Holmberg, Influence of different ventilation levels on indoor air quality and energy savings: a case study of a single-family house, Sustain. Cities Soc. 19 (2015) 165–172

81. S. Langer, G. Bekö, E. Bloom, A. Widheden, L. Ekberg, Indoor air quality in passive and conventional new houses in Sweden, Build. Environ. 93 (2015) 92–100 (Special Issue: Indoor pollutants, chemistry and health. Selected papers presented at Indoor Air 2014 conference in Hong Kong)

82. Persily, A. (2015). Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62. Building and Environment, 91, 61–69.

83. ASHRAE. ASHRAE Standard 62.2-2003 Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.; 2003.

84. ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, ASHRAE, Atlanta, Georgia.

85. D. Zukowska, G. Rojas, E. Burman, G. Guyot, M. del C. Bocanegra-Yanez, J. Laverge, G. Cao, J. Kolarik, Ventilation in low energy residences–a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries, Int. J. Vent. (2020) 1–20.

86. EN 16798-1, Energy Performance of Buildings — Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics — Module M1-6, European Standard, 2018.

87. ДБН В.2.2-15:2019 Житлові будинки. Основні положення. [Чинний з 01.12.2019]. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 44 с.

88. Johnson, T, Myers, J, Kelly, T, Wisbith, A, Ollisonc, W. A pilot study using scripted ventilation conditions to identify key factors affecting indoor pollutant concentration and air exchange rate in a residence. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology. 2004. Vol. 14(1). Pp. 1–22.

89. Yongming, J., Duanmu, L., Li, X. Building air leakage analysis for individual apartments in North China. Building and Environment. 2017. Vol. 122. Pp. 105-115.

90. Almeida R., Ramos N., Pereira P. A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings. Energy and Buildings. 2017. Vol. 139. Pp. 174–185.

91. You, Y., Niu, C., Zhou, J., Liu. Y., Bai, Z., Zhang, J., He, F., Zhang, N. Measurement of air exchange rates in different indoor environments using continuous CO2 sensors. Journal of Environmental Sciences. 2012. Vol. 24(4). Pp. 657–664.

92. Salthammer, T. Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. Building and Environment. 2019. Vol. 150. Pp. 219–232.

93. Shi, S., Chen, C., Zhao, B. Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. Building and Environment. 2015. Vol. 92. Pp. 528–537.

94. Stabile, L., Dell'Isola, M., Russi, A., Massimo, A., Buonanno, G. The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. Science of the Total Environment. 2017. Vol. 595. Pp. 894–902.

95. Deshko V., Bilous I., Vynogradov-Saltykov V., Shovkaliuk M., Hetmanchuk H. Integrated Approaches to Determination of CO2 Concentration and Air Rate Exchange in Educational Institution. Rocznik Ochrona Środowiska, 2020, Vol. 22 (1). Pp. 82–104.

96. Korsav, S.S., Montazami A., Mumovic D. Indoor air quality (IAQ) in naturally-ventilated primary schools in the UK: Occupant-related factors. Building and Environment. 2020, Vol. 180, 106992

97. Ding L., E L., Li Q., Yao C., Wang C., Yu L., Gao R., Ma W., Zheng W., Yu Q.Mechanism analysis and airflow rate estimation of natural ventilation in livestock buildings. Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2020. Vol. 36, Issue 15, Pages 189-201.

98. Sekhar, C., Akimoto, M., Fan, X., Bivolarova, M., Liao, C., Lan, L., & Wargocki, P. (2020). Bedroom ventilation: Review of existing evidence and current standards. Building and Environment, 107229.

99. A.K. Mishra, A.M. van Ruitenbeek, M.G.L.C. Loomans, H.S.M. Kort, Window/door opening-mediated bedroom ventilation and its impact on sleep quality of healthy, young adults, Indoor Air 28 (2018) 339–351.

100. J. Xiong, L. Lan, Z. Lian, R. De dear, Associations of bedroom temperature and ventilation with sleep quality, Sci. Technol. Built Environ. (2020) 1–11.

101. Pereira P.F., Ramos N.M.M. The impact of mechanical ventilation operation strategies on indoor CO2 concentration and air exchange rates in residential buildings. Indoor and Built Environment. 2020.

102. G. Bekö, T. Lund, F. Nors, J. Toftum, G. Clausen, Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children, Building and Environment. 45(10) (2010) 2289-2295.

103. Hou, J., Zhang, Y., Sun, Y., Wang, P., Zhang, Q., Kong, X., & Sundell, J. (2017). Air Change Rates in Residential Buildings in Tianjin, China. Procedia Engineering, 205, 2254–2258.

104. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering. 2020. 96(4). Pp. 27–41.

105. Ng, L., Persily, A., Emmerich, S. (2015) Improving infiltration modeling in commercial building energy models. Energy and Buildings, 88, 316–323.

106. ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. – [Чинний від 2014-01-01] – К.: Мінрегіон України, 2014. – 55 с.

107. Б.І. Басок, С.М. Гончарук, В.П. Приємченко, М.П. Новіцька, О.М. Недбайло, М.В. Ткаченко Експериментальні дослідження теплового режиму приміщення при використанні опалювальних керамічних панелей. Кераміка: наука і життя. 2021. №3(52). С. 14 – 22. DOI: 10.26909/csl.3.2021.2.

108. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. – [Чинний від 2014-01-01] – К.: Мінрегіон України, 2014. – 141 с.

109. EN 12831-1, Energy performance of buildings - Method for calculation of the design heat load - Part 1: Space heating load, 2017

110. ДСТУ Б EN 15316-2-1:2011 Системи теплозабезпечення будівель. Методика розрахунку енергопотреби та енергоефективності системи. Частина 2-1. Тепловіддача системою опалення. – [Чинний з 2013-01-01] – К.: Мінрегіон України, 2013. – 64 с.

111. Наказ №169 від 11.07.2018 року "Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель"

112. EN 15251, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, 2007.

ДОДАТОК А

Довідки й акти впровадження результатів дисертаційної роботи

Громадська організація
Асоціація енергетичних аудиторів України
03179, м. Київ, пр-т. Перемоги 148/1, оф. 257А
ЕДРПОУ: 39560349, UA253348510000000002600550566 в АТ "ПУМБ"
Тел.: +380 67 4081483, +380 44 4656518, +380 99 4760802 , E-mail: info@aea.org.ua, aea.org.ua

Вих. 11/8 від 10 листопада 2021

ДОВІДКА

впровадження результатів дисертаційної роботи аспірантки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ЯЦЕНКО ОЛЕНИ ІГОРІВНИ

Результати дисертаційної роботи Яценко О.І. були використані при розробці матеріалів для навчань, які проходять у Київському Центрі Енергоефективності, з питань пов'язаних з підвищенням енергоефективності будівель. Автором розроблено динамічну енергетичну модель будівлі Київського Центру Енергоефективності, за допомогою якої було досліджено енергетичну ефективність застосування переривчастого режиму опалення.

Розвинуті у роботі сучасні підходи до аналізу енергетичних показників будівель та до підвищення ефективності управління режимами роботи інженерних систем використовуються також в діяльності Асоціації енергоаудиторів під час підготовки та реалізації проектів з енергоефективності в будівлях різного призначення. Запропоновані підходи до створення енергетичних моделей розширюють можливості для швидкого прийняття обґрунтованих технічних рішень та підвищення енергоефективності будівель.

Даний документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова правління **Литвин Вадим**

МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ, БУДІВНИЦТВА ТА ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ"
(ДП НДІБК)

юридична адреса: вул. І.Клименка, 5/2, м. Київ-37, 03680, поштова адреса: вул. Преображенська,5/2, м. Київ-37, 03037; тел. (044) 249-72-34, факс (044) 248-89-09
www.niisk.com; e-mail:ndibk@ndibk.gov.ua; niisk-office@ndibk.gov.ua; код ЄДРПОУ 02495431

5.11.2021 № 100-2070

Впровадження результатів дисертаційної роботи

ДОВІДКА

впровадження результатів дисертаційної роботи аспірантки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ЯЦЕНКО ОЛЕНИ ІГОРІВНИ

В дисертаційній роботі Яценко О.І. проведено аналіз сучасних підходів до визначення енергетичних показників динамічних режимів будівель та роботи інженерних систем, зокрема систем опалення та вентиляції.

Проведені дослідження та запропоновані методики аналізу тепловтрат в системі опалення при визначенні складової загального рівня ефективності підсистеми тепловіддачі, яка відповідає за вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні. Методика дозволяє шляхом гідродинамічного моделювання точніше враховувати втрати пов'язані з нерівномірністю розподілення внутрішньої температури при розрахунках енергоспоживання, що дозволяє розширити та більш точно представляти ряд показників наведених у стандарті ДСТУ Б А.2.2-12:2015.

Створені енергетичні моделі житлового приміщення та громадської будівлі враховують взаємодію інженерних систем та оболонки при врахуванні впливу динамічних факторів всередині та ззовні.

Результати зазначених наукових досліджень використовуються ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» при розробці сучасних стандартів щодо методів оцінки енергоспоживання будівель та енергоефективності інженерних систем.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор ДП НДІБК,
докт.техн.наук, проф. Г.Г. Фаренюк

З А Т В Е Р Д Ж У Ю
В.о. директора навчально-
наукового інституту
атомної та теплової енергетики
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
д.т.н., проф.

_____ Євген ПИСЬМЕННИЙ
«12» 01 2023 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи науково-педагогічного працівника кафедри теплової та альтернативної енергетики Яценко О. І.
у навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського

Комісія у складі завідувачки кафедри теплової та альтернативної енергетики д.т.н., проф. Черноусенко О. Ю. та голови методичної комісії ННІ АТЕ к.т.н., доц. Шевеля Є. В. склали цей акт про те що результати дисертаційної роботи Яценко О. І. використані у навчальному процесі кафедри теплової та альтернативної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», освітньої програми «Енергетичний менеджмент та інжиніринг теплоенергетичних систем».

Зокрема:

– динамічні моделі житлового приміщення та громадської будівлі для розроблення комп'ютерних практикумів з дисципліни «Прикладні задачі енергозбереження»;

– методика завдання погодинних графіків експлуатації та роботи інженерних систем будівель під час розробки практичних та лабораторних занять з дисципліни «Прикладні задачі енергозбереження»;

– підхід до верифікації результатів при розробці курсової "Методи аналізу енергоефективності будівель".

Голова методичної комісії ННІ АТЕ,
к.т.н., доц. Євген ШЕВЕЛЬ

Завідувачка кафедри теплової та
альтернативної енергетики,
д.т.н, проф. Ольга ЧЕРНОУСЕНКО