

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

ГЕТМАНЧУК ГАННА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 697.952.4

ДИСЕРТАЦІЯ

**Оцінювання розосередженого рівня природного повітрообміну в будівлях з
врахуванням мінливості внутрішніх та зовнішніх умов**

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

_____ Ганна ГЕТМАНЧУК

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

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Гетманчук Г.О. Оцінювання розосередженого рівня природного повітрообміну в будівлях з врахуванням мінливості внутрішніх та зовнішніх умов.
– Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

У вступі дослідження підкреслено актуальність обраної теми, де аргументовано важливість розробки та удосконалення методів та підходів до визначення кратності природного повітрообміну як показника умов мікроклімату приміщень та його впливовості, як вентиляційної складової на енергетичні характеристики будівель. Сформульовано мету, наукове завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Подано інформацію щодо апробації дослідження, публікацій та актів впровадження результатів, а також розкрито особистий внесок автора.

У першому розділі дисертації проведено огляд та аналіз впливовості кратності повітрообміну, як вентиляційної складової на енергоефективність будівель різного призначення. Підвищення енергоефективності будівельного сектору як значного споживача енергії наразі є пріоритетним напрямом та однією з умов досягнення енергетичної незалежності України. Житловий фонд та інші громадські будівлі споживають основну частку енергоресурсів на потреби опалення. При цьому велика частина будівель, що експлуатуються є будівлями масової забудови з відсутністю капітального ремонту, що вказує на необхідність покращення їх енергетичних характеристик та умов комфорту. Підвищення енергоефективності будівель вимагає не лише утеплення огорожувальних конструкцій та модернізації інженерного обладнання, але й застосування вдосконалених моделей розрахунку енергоспоживання будівлями. Ці моделі мають

враховувати комплекс показників, включаючи природну складову кратності повітрообміну. Для оцінки потенціалу енергоефективності в розділі розглянуто будівлю як складну енергетичну систему.

Важливим є порівняння та гармонізація міжнародних та європейських підходів з українськими стандартами на нормативами, що стосуються питань вентиляції та повітрообміну. Щоденна динаміка кратності повітрообміну в будівлях визначається взаємодією ряду факторів, що включають як зміни у зовнішньому середовищі, так і внутрішній активності користувачів. Оцінка впливу регулювання систем вентиляції на якість повітря та енергетичні характеристики вимагає комплексного підходу, враховуючи динамічний характер змін.

В даному розділі наведено літературний огляд з питань підходів до визначення кратності повітрообміну, де окреслено основні фактори які впливають на забезпечення комфортних умов з точки зору якості повітря. В тому числі приділена увага показнику CO_2 в приміщеннях, як індикатору якості повітря.

Проведено огляд спеціалізованих програми, що дозволяють провести детальний аналіз та визначити оптимальні параметри кратності повітрообміну в різні часові проміжки. Це необхідно для забезпечення ефективності вентиляційних систем та створення комфортних умов всередині будівель у різних сценаріях використання та мінливих зовнішніх умовах.

У другому розділі наведена загальна схема досліджень та опис об'єктів аналізу та моделювання. Представлена емпірична методика розрахунку погодинної природної кратності повітрообміну в багатоповерхових будівлях в умовах мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища. Дана методика передбачає визначення повітрообміну через різницю тисків. Так як в роботі досліджується саме природня складова повітрообміну, методика враховує стак ефект та вітровий тиск, механічна вентиляція в будівлях що досліджувались відсутня.

Також наведений план експерименту та методика визначення природної кратності повітрообміну на базі експериментальних вимірювань рівня CO_2 в репрезентативних приміщеннях з кроком 1 хвилина. Визначення концентрації CO_2 було проведено на основі масового балансу вибраних приміщень з врахуванням

ключових параметрів: природного повітрообміну, фонові (зовнішньої) концентрацію CO₂, початкової концентрації CO₂ в приміщенні, присутності людей та геометричних розмірів приміщення. Під час дослідження були зафіксовані кліматичні дані, такі як напрямок та сила вітру, температура в приміщеннях квартири та зовнішня температура, які також враховувались при аналізі результатів.

В рамках дослідження було проаналізовано зміну концентрації CO₂ в приміщенні в залежності від ряду параметрів, а саме: виділень від людей, зміни концентрація CO₂ у припливному повітрі та об'єму припливного повітря. За результатами проведеного аналізу встановлено, що регулювання кратності повітрообміну за рівнем CO₂ є кращим підходом, ніж просте дотримання нормативних значень, оскільки цей підхід дозволяє більш точно та ефективно регулювати повітрообмін в будівлях, враховуючи реальні умови та потреби користувачів.

У третьому розділі дисертації представлено результати експериментальних досліджень концентрації CO₂ та визначена кратність природного повітрообміну в аудиторіях навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського. Встановлено, що без врахування провітрювань кратність повітрообміну становить 0,41 год⁻¹, з врахуванням провітрювань середня кратність повітрообміну становить 0,48 год⁻¹.

На основі декількох серій вимірювань проведених в зимовий період в приміщеннях житлової будівлі було встановлено, що характерним є явище інфільтрації. За даного механізму циркуляції повітря, кратність повітрообміну складала 0,74 год⁻¹ для житлової кімнати, від 0,73 год⁻¹ для коридору, та 3,4 год⁻¹ для кухні. При умовах ексфільтрації, кратність повітрообміну для житлової кімнати була на рівні 0,37 год⁻¹, 1,06 год⁻¹ для коридору, та 0,57 год⁻¹ для кухні. Експерименти підтвердили, що реальна кратність повітрообміну, коли свіже повітря надходить через вікна та двері, перевищує мінімальні нормативні значення. Однак, при оберненому потоці повітря, вона не відповідає нормативним значенням.

Також проводилась обробка серії експериментальних досліджень в репрезентативних приміщеннях квартири в літній період. Протягом літнього

періоду було виявлено, що кількість випадків інфільтрації та ексфільтрації майже однакова, але, як і для опалювального періоду, напрямки руху повітря в приміщеннях залежать від напрямку вітру. Для умов інфільтрації кратність повітрообміну становила $0,57 \text{ год}^{-1}$ для житлової кімнати, $2,34 \text{ год}^{-1}$ для коридору, $2,41 \text{ год}^{-1}$ для кухні. Для умов ексфільтрації кратність повітрообміну становила $0,24 \text{ год}^{-1}$ для житлової кімнати, $0,94 \text{ год}^{-1}$ для коридору, $0,52 \text{ год}^{-1}$ для кухні.

В рамках експериментального дослідження також проводились експериментальні заміри концентрації CO_2 в аудиторії учбового корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського №22 в режимі охолодження в літній період. Отримані результати показують, що величина природної кратності повітрообміну залежить від вітрового та стак ефектів. З посиленням різниці температур між внутрішнім та зовнішнім повітрям, спостерігається зростання величини кратності повітрообміну від $0,37$ до $0,9 \text{ год}^{-1}$.

У четвертому розділі дисертації проведено аналіз енергетичних показників досліджуваних приміщень на основі моделей, створених у програмному середовищі EnergyPlus, які дозволяють визначати енергоспоживання будівлі на потреби опалення з врахуванням мінливості фактичного природного повітрообміну в житлових будівлях. За результатами енергетичного моделювання, річна економія енергії з врахуванням фактичних значень природної кратності повітрообміну в різних зонах будівлі становить $5,4\%$ в порівнянні зі стандартом ДСТУ Б EN 15251:2011, а в порівнянні зі стандартом ДБН В.2.2-15:2019 – $7,7\%$.

Результати досліджень були передані для використання ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», ГО «Школа енергоефективності» та відділом енергоменеджменту та екології Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". Практичне значення одержаних результатів підтверджується актами впровадження результатів досліджень.

Ключові слова: повітрообмін, параметри мікроклімату, забруднення повітря, концентрація вуглекислого газу, масоперенос, енергопотреба, енергоефективність будівель, опалення, нагрів повітря, енергоспоживання, енергетичне моделювання, енергозбереження, динамічне моделювання будівель, математичне моделювання, температура.

ABSTRACT

Hetmanchuk H.O. Assessment of the decentralized level of natural air exchange in buildings, taking into account the variability of internal and external conditions. – 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, 2024.

The introduction of the study emphasizes the relevance of the chosen topic, where the importance of developing and improving methods and approaches to determining the frequency of natural air exchange as an indicator of indoor microclimate conditions and its influence as a ventilation component on the energy characteristics of buildings is argued. The goal, scientific task, object, subject and methods of research are formulated, the scientific novelty and practical significance of the obtained results are defined. Information on the approval of the research, publications and acts of implementation of the results is provided, as well as the author's personal contribution is disclosed.

In the first chapter of the dissertation, a review and analysis of the influence of the air exchange rate as a ventilation component on the energy efficiency of buildings of various purposes was carried out. Increasing the energy efficiency of the construction sector as a significant energy consumer is currently a priority direction and one of the conditions for achieving sustainable development of Ukraine. Housing stock and other public buildings consume the main share of energy resources for heating needs. At the same time, most of the buildings in use are mass-built buildings with no capital repairs, which indicates the need to improve their energy characteristics and comfort conditions. In addition to insulating the enclosing structures and updating the engineering equipment of buildings, an important step in increasing the energy efficiency of buildings is the need to use refined calculation models taking into account a set of indicators, including the natural component of the air exchange rate. To assess the potential of energy efficiency, the section considers the building as a complex energy system.

It is important to compare and harmonize international and European approaches with Ukrainian standards on regulations related to ventilation and air exchange. The daily dynamics of the air exchange rate in buildings is determined by the interaction of a number of factors, including both changes in the external environment and the internal activity of users. Assessment of the impact of regulation of ventilation systems on air quality and energy performance requires a comprehensive approach, taking into account the dynamic nature of changes.

This section provides a literature review on approaches to determining the air exchange rate, where the main factors that influence the provision of comfortable conditions from the point of view of air quality are outlined. Including attention paid to the CO₂ index in the premises as an indicator of air quality.

A review of specialized programs was carried out, allowing to conduct a detailed analysis and determine the optimal parameters of the frequency of air exchange in different time intervals. This is necessary to ensure the efficiency of ventilation systems and create comfortable conditions inside buildings in various usage scenarios and changing external conditions.

The second chapter provides a general scheme of research and a description of the objects of analysis and modeling. An empirical method of calculating the hourly natural multiplicity of air exchange in multi-story buildings in conditions of variability of the external and internal environment is presented. This technique involves determining the air exchange due to the pressure difference. Since the work examines the natural component of air exchange, the method takes into account the stack effect and wind pressure, there is no mechanical ventilation in the investigated buildings.

The experiment plan and the method of determining the natural multiplicity of air exchange on the basis of experimental measurements of the CO₂ level in representative rooms with a step of 1 min are also given. The concentration of carbon dioxide was determined on the example of the mass balance of representative rooms depending on a number of parameters, such as: natural air exchange; background CO₂ concentration (external CO₂ concentration); initial concentration of CO₂ in the room; availability of people; geometric dimensions of the room. During the research, climatic data were

recorded, namely: the temperature inside the apartment, the outside temperature, the direction and strength of the wind, which were also taken into account when analyzing the results.

As part of the study, the change in the concentration of CO₂ in the room was analyzed depending on a number of parameters, namely: secretions from people, changes in the concentration of CO₂ in the supply air and the volume of supply air. According to the results of the analysis, it was established that for a room with an area of 17.4 m² in which 3 adults are engaged in sedentary work, it is necessary to ensure the air exchange rate at the level of 2.01 ACH 1 so that the level of CO₂ in the air does not exceed the maximum permissible level of 1200 ppm.

The third chapter of the dissertation presents the results of experimental studies of CO₂ concentration and determined the frequency of natural air exchange in the classrooms of the educational building of KPI named after Igor Sikorsky. It was found that without taking into account ventilation, the air exchange rate is 0.41 ACH, with airing included, the average air exchange rate is 0.48 ACH.

On the basis of several series of measurements carried out in the winter period in the premises of a residential building, it was established that the suction of fresh air to the premises of the apartment through the windows (infiltration) is characteristic. With this air movement mechanism, the air exchange rate was 0.74 ACH for the living room, 0.66–0.81 ACH for the corridor, and 3.4 ACH for the kitchen. For exfiltration conditions, the air exchange rate for the living room was at the level of 0.37 ACH, 1.06 ACH for the corridor, and 0.57 ACH for the kitchen. This is due to another difference in densities and temperatures. Experimental studies have shown that the actual frequency of air exchange under the conditions of fresh air entering through windows and doors exceeds the minimum standards, and with reverse air movement, it does not meet the standards for the level of air exchange. Taking into account the direction of movement of the air entering the apartment, in fact, the energy spent on heating the supply air will be proportional to the air exchange rate of the air coming from outside.

A series of experimental studies was also carried out in the representative rooms of the apartment in the summer period. In the summer period, the phenomena of infiltration

and exfiltration were recorded in almost the same amount. As in previous studies, the dependence of infiltration and exfiltration phenomena on the direction of the wind can be clearly traced based on the results of the measurements. For infiltration conditions, the air exchange rate was 0.57 ACH for the living room, 2.34 ACH for the corridor, and 2.41 ACH for the kitchen. For exfiltration conditions, the air exchange rate was 0.24 ACH for the living room, 0.94 ACH for the corridor, and 0.52 ACH for the kitchen.

As part of the experimental study, experimental measurements of CO₂ concentration were also carried out in the classroom of the educational building of KPI named after Igor Sikorskyi No. 22 in cooling mode in the summer. The obtained results show that the value of the natural multiplicity of air exchange depends on wind and stack effects. As the temperature difference between the indoor and outdoor air increases, there is an increase in the air exchange rate from 0.37 to 0.9 ACH.

In the fourth chapter of the dissertation, an analysis of the energy indicators of the researched premises is carried out based on models created in the EnergyPlus software environment, which allow determining the building's energy consumption for heating needs, taking into account the variability of the actual natural air exchange in residential buildings. According to the results of energy modeling, the annual energy saving, taking into account the actual values of the natural multiplicity of air exchange in different areas of the building, is 5.4% compared to the standard DSTU B EN 15251:2011, and compared to the standard DBN B.2.2-15:2019 – 7.7%.

The results of the research were transferred for use by the State Scientific Research Institute of Building Structures, the NGO "School of Energy Efficiency" and the Department of Energy Management and Ecology of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute". The practical significance of the obtained results is confirmed by acts of implementation of research results.

Keywords: air exchange, microclimate parameters, air pollution, carbon dioxide concentration, mass transfer, energy consumption, energy efficiency of buildings, heating, air heating, energy consumption, energy modeling, energy saving, dynamic modeling of buildings, mathematical modeling, temperature.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель”, Енергетика: Економіка, технології, екологія, т. 4, № 50, с. 67–73, 2017. **(фахове видання)**
2. М. Тимофєєв, В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівель в динамічних сіткових моделях.”, Наука та будівництво, № 2 (20), с. 62–69, 2019. **(фахове видання)**
3. В. І. Дешко, І. Ю. Білоус та Г. О. Гетманчук, “Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну в багатоповерхових будівлях в умовах мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища”, Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, № 2, с. 68–78, 2019. **(фахове видання)**
4. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Дослідження повітрообміну в квартирі на основі експериментального визначення масопереносу CO₂”, Енергетика і автоматика, № 3, с. 28–40, 2023. **(фахове видання)**
5. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Параметричний аналіз природного повітрообміну в багатоквартирних житлових будівлях”, Енергетика: Економіка, технології, екологія, № 4, с. 57–68, 2023. **(фахове видання)**
6. V. Deshko, I. Bilous, V. Vynogradov-Saltykov, M. Shovkaliuk, H. Hetmanchuk, “Integrated approaches to determination of CO₂ concentration and air rate exchange in educational institution”, Rocznik ochrona srodowiska, vol. 22, № 1, pp. 82–104, 2020. **(іноземне видання, включене до бази даних Scopus)**
7. I. Bilous and H. Hetmanchuk, “Use of climatic databases for determining the energy need of heat buildings”, Scientific Results of 2017, Vinnitsa, Ukraine, Dec. 15, 2017. Vinnitsa, 2017, pp. 14–16.
8. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Бази кліматичних і погодних даних для визначення енергетичних характеристик будівель”, Міжнародна науково-

практична конференція молодих вчених "Буд-майстер-клас-2017", Київ, Україна, 1 груд. 2017. Київ: КНУБА, 2017, с. 256–257.

9. М. Тимофєєв, В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, "Розрахунок в динамічних сіткових моделях погодинної кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівель", Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція-2019»», Київ, Україна, 26 квіт. 2019. Київ: КНУБА, 2019, с. 26–27.

10. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, "Визначення кратності повітрообміну в залежності від зовнішніх та внутрішніх факторів", Міжнародна студентська науково-технічна конференція "Природничі та гуманітарні науки. актуальні питання.", Тернопіль, Україна, 27 квіт. 2018. Тернопіль: ТНТУ, 2018, с. 81–82.

11. І. Білоус та Г. Гетманчук, "Розрахунок кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівлі", Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» II тур, Маріуполь, Україна, 25 берез. 2019. Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2019, с. 7.

12. В. Дешко, І. Білоус, І. Суходуб та Г. Гетманчук, "Моделювання обтікання зовнішнім повітрям будівель середньої поверховості", Міжнародна науково-практична конференція пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова "Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнології та автоматики в АПК", Київ, Україна, 19 груд. 2019. Київ: НУБіП, 2019, с. 160–161.

13. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, "Динамічні моделі для визначення енергопотреби на охолодження будівель", Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, Київ, Україна, 27 квіт. 2018. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018, с. 184.

14. І. Білоус та Г. Гетманчук, "Розрахунок кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівлі", Всеукраїнська науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина», Київ, Україна, 25 квіт. 2019. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2019, с. 26–31.

15. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Експериментальне дослідження якості повітря в багатоквартирному житловому будинку сімейного типу”, XI міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», Чернігів, Україна, 27 трав. 2021. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021, с. 148–149.

16. І. Білоус та Г. Гетманчук, “Експериментальне дослідження повітрообміну з урахуванням масопереносу CO_2 в квартирі”, XX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених і студентів (присвячена 125-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та 90-річчю НН ІАТЕ (ТЕФ)) "Сучасні проблеми наукового забезпечення", Київ, Україна, 25 квіт. 2023. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023, с. 222–223.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	15
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОВІТРООБМІНУ В БУДІВЛЯХ.....	22
1.1. Рівень ефективності будівельного сектору.....	23
1.2. Повітрообмін як енергетична характеристика будівель	28
1.3. Нормативно-правові документи	32
1.3.1. Експериментальне визначення повітрообміну.....	41
1.3.2. Математичне моделювання та огляд програмного забезпечення.....	49
Висновки до розділу 1 та постановка завдань дослідження.....	52
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВІТРООБМІНУ В БУДІВЛЯХ.....	54
2.1. Загальна схема досліджень та опис об'єктів аналізу та моделювання.....	54
2.2. Розробка емпіричної методики визначення кратності повітрообміну	58
2.3. Динамічне моделювання для дослідження енергоспоживання.....	63
2.4. Визначення природної кратності повітрообміну на базі експериментальних даних	65
2.4.1. Вимірювальні прилади.....	66
2.4.2. Методика розрахунку природної кратності повітрообміну на основі експериментальних вимірювань рівня CO ₂ в приміщеннях	69
2.5. Параметричний аналіз впливових складових на рівень повітрообміну	73
Висновки до розділу 2	78
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ФАКТИЧНОГО ПРИРОДНОГО РІВНЯ ПОВІТРООБМІНУ БУДІВЕЛЬ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	80
3.1. Аналіз результатів імітаційного дослідження кратності повітрообміну.....	80

3.2. Дослідження зміни концентрації CO ₂ та визначення повітрообміну в навчальному корпусі ЗВО	83
3.3. Дослідження концентрації CO ₂ в аудиторії учбового корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського в режимі охолодження внутрішнього повітря	86
3.4. Експериментальне визначення кратності фактичного повітрообміну у житловій будівлі	88
Висновки до розділу 3	97
РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ БУДІВЛІ	100
4.1. Налаштування енергетичної моделі	100
4.2. Моделювання енергоспоживання будівлі з врахуванням природного повітрообміну за різними стандартами.....	107
4.3. Моделювання енергоспоживання будівлі з врахуванням мінливості природного повітрообміну.	110
Висновки до розділу 4	116
ВИСНОВКИ.....	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	119
Додаток А.....	128
Додаток Б.....	131
Додаток В	132
Додаток Г	133

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ЄС – Європейський Союз;
- CO₂ – діоксид вуглецю;
- SF₆ – гексафторид сірки;
- ДБН – Державні будівельні норми;
- ДСТУ – Державний стандарт України;
- EN – Європейські норми;
- IAQ – якість повітря в приміщенні;
- ASHRAE – американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціювання повітря;
- ACH – кратність повітрообміну, [год⁻¹];
- ВНЗ – вищий навчальний заклад;
- ppm – одиниця вимірювання концентрації та інших відносних величин, аналогічна за змістом відсотку або проміле, та являє собою одну мільйонну частку;
- т. н. е. – тон нафтового еквіваленту;
- EP – програмний продукт EnergyPlus;
- IWEC – міжнародний погодний файл для розрахунку енергії;
- КПІ – Київський політехнічний інститут;

ВСТУП

Актуальність теми. Будівельний сектор є одним з найбільших споживачів енергії у світі. При цьому за оцінкою Architecture 2030 [1] приблизно 65% всіх існуючих будівель у світі експлуатуватимуться до 2040 року. У той же час, до 2060 року загальна площа будівель збільшиться удвічі. Тому спостерігається глобальна тенденція до зменшення використання природних ресурсів та обмеження шкідливих викидів будівельним сектором, що ставить завдання вивчення нових аспектів енергоефективності будівель та розвитку сталого будівництва.

Однією з цілей України, в рамках впровадження концепції сталого розвитку, є скорочення викидів вуглецю на 65% від рівня 1990 року, а до 2060 року повний перехід на вуглецево-нейтральну економіку. Реалізація цієї цілі, в тому числі, полягає у підвищенні рівня енергетичної ефективності за рахунок модернізації будівель. Покращенню теплозахисних властивостей оболонки будівлі, впровадження енергоефективних режимів роботи приділено значну увагу. Варто відмітити, що після впровадження комплексу заходів перерахованих вище повітрообмін має найбільший вплив на енергоспоживання будівлі, а отже і на ефективність використання енергії.

Дослідження в галузі енергоефективності будівель у наукових роботах переважно фокусуються на вивченні питань термомодернізації, при цьому вивченню складової повітрообміну в будівлях приділено мало уваги і цей напрямок в Україні потребує розвитку. В тому в роботі проведено дослідження природної кратності повітрообміну в числі з використанням різноманітних методів, таких як використання спеціалізованого програмного забезпечення, експериментальні та розрахункові підходи, для детального аналізу повітрообміну в будівлях, а також вплив кратності повітрообміну на енергетичні показники будівель.

Цими питаннями займалися V. Deshko, I. Bilous, I. Sukhodub, O. Yatsenko, O. Voznyak, P. Kapalo, K. Myroniuk, Y. Furdas, V. Zhelykh, Y. Yurkevych, A. Persily, T. Prasauskas, V. Leivo, L. Du, M. Turunen та інші.

Отже, основна наукова мета дисертації полягає у створенні та вдосконаленні методик для визначення природної кратності повітрообміну в будівлях з метою дослідження її впливу на енергетичні характеристики будівель.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Виконані дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефективність» Законом України «Про енергозбереження», «Про 18 пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», «Про енергетичну ефективність будівель», направленості тематики науково-дослідної роботи (НДР) кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського». Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання держбюджетних НДР: “Підвищення ефективності енерговикористання в теплотехнічних процесах і установках” (№ держреєстрації 0113U008153).

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження рівняння природного повітрообміну в будівлях, розробки та удосконалення методів визначення природного повітрообміну, у тому числі врахування сукупності часової мінливості погодних та експлуатаційних факторів для уточнення розрахунків енергетичних показників будівель.

Для досягнення мети дослідження були виконані наступні завдання:

- проведення експериментально-розрахункового дослідження динаміки зміни рівня CO₂ в приміщеннях будівель різного призначення під впливом природного повітрообміну;
- оцінення впливу повітрообміну на енергоспоживання будівлі на базі динамічної моделі створеної в програмному середовищі DesignBuilder/EnergyPlus;
- аналіз сучасних методів визначення енергетичних показників будівель і підходів до визначення повітрообміну в них;
- розробка динамічних моделей будівель для дослідження теплового стану та енергетичних показників будівлі з врахуванням погодинної зміни природного повітрообміну.

Об'єкт дослідження – процеси оцінювання рівня повітрообміну в будівлях в умовах погодинної зміни характеристик середовища.

Предмет дослідження – методи і способи оцінювання кратності повітрообміну в будівлях масової забудови з використанням математичного моделювання.

Методи дослідження. Науково-методичну основу проведених досліджень склали наступні методи: аналізу та синтезу, експериментальні методи визначення рівня концентрації CO₂ та кратності повітрообміну, математичного моделювання, енергетичного моделювання.

Наукова новизна результатів дослідження полягає у наступному:

- розвинуто підхід до аналізу природного повітрообміну в житлових будівлях, який реалізується на основі експериментального визначення зміни рівня концентрації CO₂ в приміщеннях будівлі та дозволяє визначити механізми руху повітря між зонами будівлі;

- удосконалено підхід до створення енергетичних моделей будівель, шляхом одночасного врахування динаміки експлуатаційних особливостей приміщення та рівня природного повітрообміну;

- набули подальшого розвитку методи визначення енергетичних показників будівлі при врахуванні різних методик та експериментальних механізмів повітрообміну в багатоквартирних житлових будівлях.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропоновані підходи дозволяють отримати кількісні оцінки з аналізу витрат енергії на опалення та вентиляцію та дозволяють розробляти ефективні стратегії для зменшення споживання енергії в будівлях з урахуванням динаміки експлуатаційних особливостей будівель та забезпечення вимог щодо якості повітря в приміщеннях. Врахування природного фактичного повітрообміну протягом опалювального сезону для побутового сектору будівель України дозволяє уникнути перетопів, більш якісно визначати рівень споживання енергії, а отже, більш точно визначати клас енергетичної ефективності будівель. Відмінність на рівні держави буде становити 3,7 млн. Гкал.

Результати зазначених наукових досліджень використовуються відділом енергоменеджменту та екології КПІ імені Ігоря Сікорського при розробці методів аналізу прогнозування енергопотреби та/або теплового стану будівель з використанням запропонованого підходу до визначення енергетичних показників будівлі при врахуванні механізмів повітрообміну в багатоквартирних житлових будівлях. Результати експериментально-розрахункових досліджень динаміки зміни рівня вуглекислого газу в житлових приміщеннях під впливом природного повітрообміну з врахуванням руху повітря між приміщеннями та затрат енергії на його нагрів передано до використання в ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» з метою розширення та більш точного представлення ряду показників у стандарті ДБН В.2.2-15:2019 "Житлові будинки. Основні положення". 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: проведено аналіз різних кліматичних баз даних, які використовуються для визначення енергопотреби будівель на опалення та отримані результати перерахунку кліматичних даних про сонячні теплонадходження з міжнародного файлу погоди IWEC для вертикальних поверхонь [2]; проведено математичне моделювання погодинного графіка енергопотреби будівлі для базового рівня при нормативному значенні кратності повітрообміну, а також при розрахунковому значенні природної складової кратності повітрообміну, що змінюється відповідно до природних умов [3]; виконано порівняння кратності повітрообміну для різних значень опору проникнення повітря, використовуючи кліматичні дані типового року з IWEC файлу [4]; проведено експериментальне дослідження концентрації CO₂ у типовій квартирі та визначення повітрообміну на основі масових балансів, при врахуванні мінливості зовнішніх умов [5]; проаналізовано вплив розподілу значень кратності повітрообміну по приміщеннях на теплове навантаження та споживання енергії,

проведено аналіз використання нормативних значень кратності з діючих стандартів та графіків повітрообміну, які були створені на основі експериментальних вимірювань [5, 6], створено імітаційну модель для визначення природного повітрообміну приміщень на основі узагальненої методики ASHRAE для репрезентативних приміщень навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського №22 [7].

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень, викладених у дисертаційній роботі, було представлено на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Наукові підсумки 2017 року» (Вінниця, 2017); міжнародна науково-практична конференція «Буд-майст-клас-2017» (Київ, 2017); міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція – 2019»» (Київ, 2017); міжнародна студентська науково-технічна конференція "Природничі та гуманітарні науки. актуальні питання." (Тернопіль, 2019); на Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» II тур (Маріуполь, 2019); міжнародна науково-практична конференція пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова "Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнології та автоматики в АПК" (Київ, 2019); міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів і студентів (Київ, 2018); всеукраїнська науково-технічна конференція інституту енергозбереження та енергоменеджменту «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2019), міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2021); міжнародна науково-практична конференція молодих вчених і студентів (присвячена 125-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та 90-річчю НН ІАТЕ (ТЕФ)) "Сучасні проблеми наукового забезпечення" (Київ, 2023); міжнародна науково-практична конференція присвячена 125-річчю НУБіП України та 90-річчю ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження "Цифрові технології в енергетиці і автоматичі" (Київ, 2023); міжнародна науково-практична конференція "Енергоефективний університет" (Київ, 2023).

Результати досліджень також були представлені на Всеукраїнському конкурсі "Молодь енергетики України: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків" (Київ, 2017), де представлена на конкурсі робота була відзначена дипломом I ступеня; на Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» II тур (Маріуполь, 2019), де представлена на конкурсі робота була відзначена дипломом I ступеня; на Міжнародному конкурсі студентських наукових робіт "Black Sea Science" за напрямком енергетика та енергоефективність, яка в II турі конкурсу відзначена Дипломом II ступеня (Одеса, 2020).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано у 16 наукових працях: 6 статей у наукових фахових виданнях (одна з яких внесена до міжнародної бази Scopus, п'ять статей у фахових виданнях України), 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 81 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 132 сторінки, 45 рисунків, 11 таблиць.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОВІТРООБМІНУ В БУДІВЛЯХ

Питання енергоефективності вперше гостро постало під час енергетичної кризи 1970-х років, яка характеризувалась введенням ембарго на нафту та підвищенням цін на енергоносії. Кризові явища акцентували увагу на залежності енергосистем від невідновлюваних джерел енергії. Тому міжнародний фокус змістився на ефективне використання енергії і у 80-х та 90-х роках міжнародні організації, в тому числі Міжнародне енергетичне агентство, розпочали активно пропагувати енергоефективність як основну стратегію для вирішення проблем енергетичної безпеки та охорони навколишнього середовища. Проблематика і пріоритетність енергоефективності стали ключовим фактором у низці міжнародних ініціатив. В тому числі у 1997 році був підписаний Кіотський протокол, де країни підписанти зобов'язалися впроваджувати політику та заходи для підвищення енергоефективності в рамках своїх загальних стратегій пом'якшення наслідків зміни клімату. У 2012 році була вперше прийнята директива з енергоефективності, яка встановлювала обов'язкові цілі для держав-членів щодо підвищення енергоефективності та встановлення принципів пріоритетності заходів з енергоефективності. У 2015 Організація Об'єднаних Націй включила "Доступну та чисту енергію" до однієї з 17 цілей сталого розвитку, яка підкреслює важливість підвищення енергоефективності як складової широкої стратегії для забезпечення доступу до сталої енергії. Також у 2015 році була підписана Паризька угода. Паралельно з цим більшість країн розробляли власні політики та ініціативи з енергоефективності. Їх ціллю стала розробка та впровадження стандартів енергоефективності, розвиток енергоефективних технологій і стимулювання ощадного використання енергії.

У Європейському Союзі (ЄС) основним законодавчим актом у сфері енергоефективності є Директива 2012/27/EU, яку Європейський парламент та Євросоюз прийняли 25 жовтня 2012 року. Ця Директива встановлює низку обов'язкових мір, які мають на меті збільшити енергоефективність в ЄС на 20% до

2020 року. У 2016 році Європейська Комісія запропонувала оновити Директиву 2012/27/EU в рамках нового енергетичного пакету “Чиста енергія для всіх європейців”. Цей пакет включав пропозицію переглянути Директиву про енергоефективність, враховуючи нові цілі щодо енергоефективності та зміну ключових положень з метою продовження терміну виконання до 2030 року. Оновлена Директива про енергоефективність була прийнята у 2018 році і вступила в силу у 2019 році. Згідно з оновленою метою, планується досягнути збільшення енергоефективності в ЄС на 32,5% до 2030 року. [8].

Ще одним важливим законодавчим актом Європейського Союзу, спрямованим на підвищення енергоефективності, стала Директива 2010/31/EU щодо енергоефективності будівель (Energy Performance of Buildings Directive), яка була прийнята у 2010 році. У цьому законодавчому акті висвітлено питання енергетичних паспортів для будівель та встановлення спеціальних вимог для країн ЄС з питань енергоефективності нових будівель, об'єктів після реконструкції та у разі заміни чи модернізації будівельних елементів. У 2018 році до Директиви були внесені правки на зміни.

Україна також підписала Угоду про Асоціацію з ЄС, та зобов'язалась виконати комплексні завдання у галузі підвищення ефективності використання енергії. Згідно з вищезазначеними директивами ЄС, країна розпочала впровадження сучасної системи енергоефективності. Законодавчо директиву 2012/27/EU було впроваджено у вигляді Закону України "Про енергетичну ефективність будівель" [8] у 2017 році.

1.1.Рівень ефективності будівельного сектору

Питання енергоефективності в Україні постало особливо гостро з моменту повномасштабного вторгнення і руйнування енергогенеруючих потужностей. Тому зараз енергозбереження як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі виходить на перший план. Зокрема, підвищення енергоефективності будівельного сектору як значного споживача енергії. За розрахунками аналітичного ресурсу

GMK Center, в українській структурі викидів CO₂ (діоксиду вуглецю) за галузями, електроенергія, газ та кондиціонування повітря в сукупності складають 52%. При цьому будівельний сектор є одним з найбільших споживачів цих ресурсів.

Відповідно до загальної характеристики житлового фонду на 1 січня 2020 року в Україні наявно понад 8 млн. житлових будинків із загальною площею житлових приміщень – 892, 15 млн м² [8].

Ефективність використання палива та енергії в житловому фонді України є незадовільною. За даними Енергетичного балансу України у 2020 році житловий сектор був другим за споживанням енергії, як показано на рисунку 1.1. Згідно з статистичними даними частка житлового сектора в розмірі 13,601 млн. тон нафтового еквіваленту, становить 28,5% від загального кінцевого енергоспоживання в країні за зазначений період.

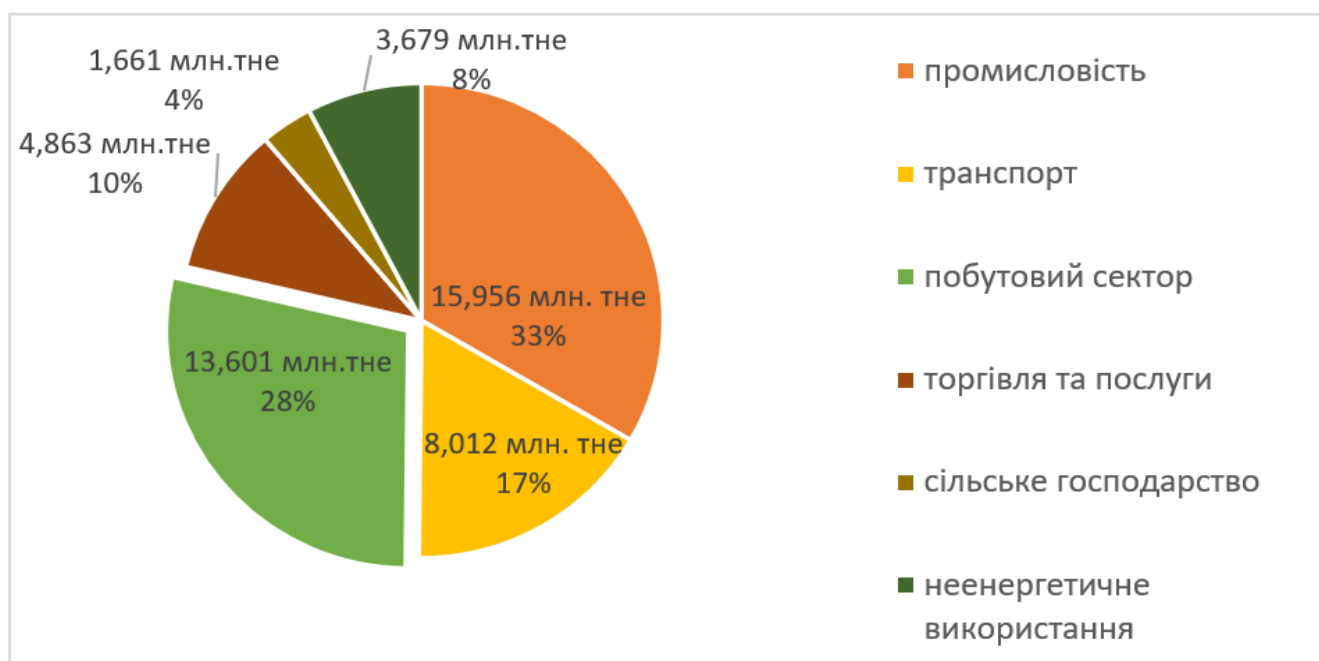


Рисунок 1.1 – Енергетичний баланс України за 2020 рік

За статистичними даними Держстандарту у структурі споживання енергії домогосподарствами за цілями призначення у 2020 році на потреби опалення житлових приміщень припадає 53% від усіх джерел енергії. На домашні господарства припадає 28,5%, а на сектор послуг ще 10,2% від загального кінцевого енергоспоживання за 2020 рік. За даними Мінрегіону житловий сектор житлової

нерухомості володіє значним економічним потенціалом, який може досягати 9 мільйонів тон нафтового еквіваленту щорічно при зменшенні енергоспоживання житловими будівлями.

Згідно із даними Державної служби статистики України, які містяться у Статистичному збірнику "Соціально-демографічні характеристики домогосподарств України у 2019 році", станом на 2019 рік майже половина домогосподарств (44,5%) не проводила капітального ремонту житла (у міських поселеннях цей показник складає 53,3%). До того ж, у 3,1% домогосподарств останній капітальний ремонт відбувся до 1990 року. Важливо зауважити, що згідно зі статистичними даними за 2017 рік в цілому по Україні 87,2% домогосподарств проживають у житлі, побудованому до 1991 року (у міських поселеннях – 86,6%). Це свідчить про те, що відсутність капітального ремонту житла у майже половини домогосподарств України може вказувати на недостатність та неповноту заходів, необхідних для покращення його характеристик, включаючи енергетичні. Недостатня теплотехнічна ефективність житлових будинків, яка виникає через відсутність їхнього капітального ремонту, призводить до значних втрат теплової енергії (до 50%). За результатами енергетичних обстежень, тепловтрати в житлових будинках масового зведення минулих років через стіни становлять 42%, через вікна – 16%, через дах – 7%, через підвал – 5%, а в процесі повітрообміну – 30% [9].

Фактична ефективність використання теплової енергії в будівлях України виявляється у 3–5 разів нижчою, ніж у західних країнах [10].

Експерти встановили, що в Україні споживання енергії на опалення та гаряче водопостачання на одиницю площі значно вище, ніж у країнах Європи з аналогічним кліматом. Наприклад, середнє споживання енергії на опалення в країнах ЄС становить 130 кВт·год/ м², тоді як в Україні цей показник досягає 264 кВт·год/ м². [10].

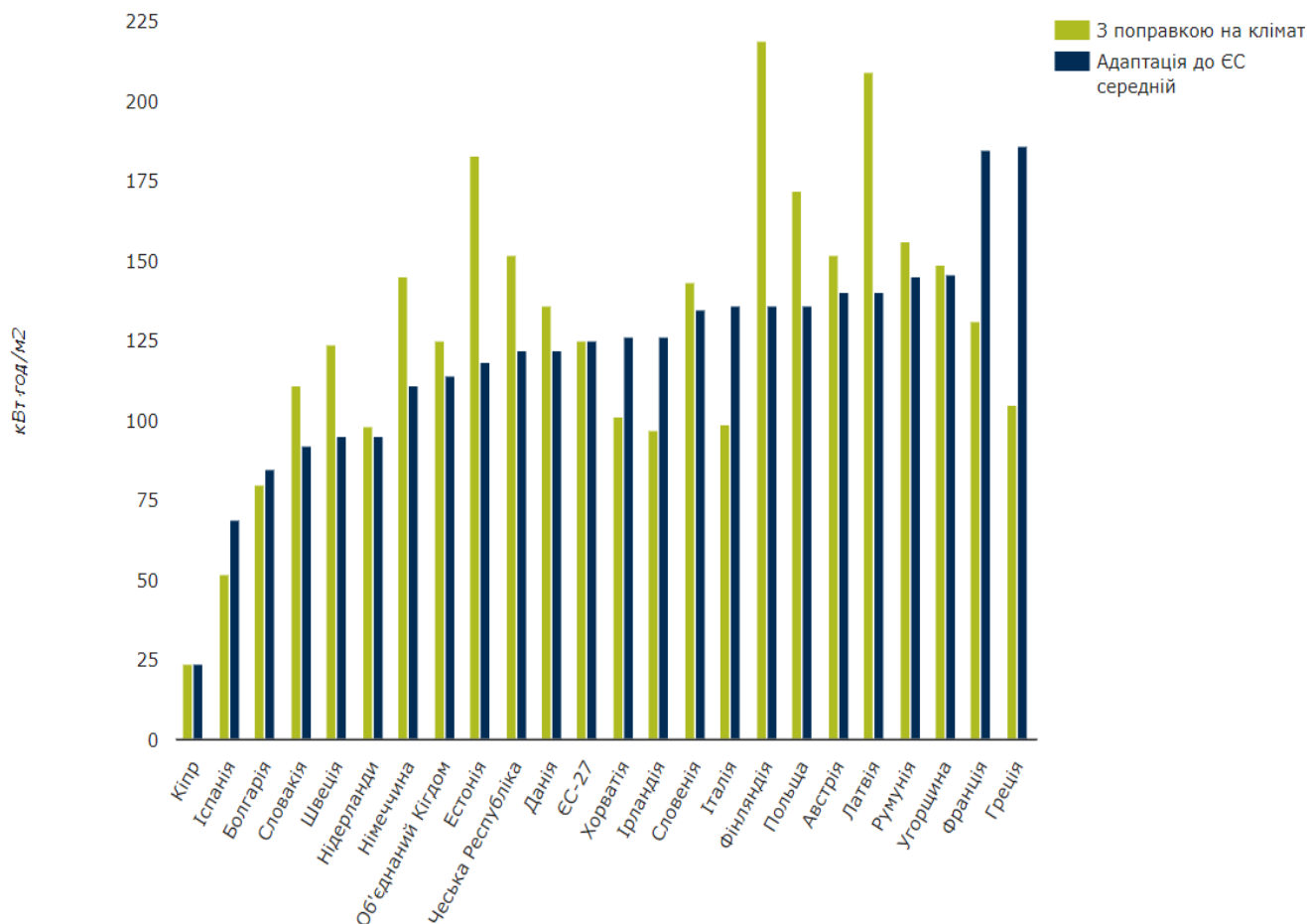


Рисунок 1.2 – Енергоспоживання домогосподарств на опалення країнами ЄС [11]

У Європейському Союзі визнано, що підвищення енергоефективності є однією з ключових умов для досягнення сталого розвитку. Для поліпшення енергетичної ефективності будівельних об'єктів в країнах ЄС постійно зростають вимоги до обсягів кінцевого енергоспоживання. Починаючи з 2019 року, заборонено будівництво житлових будинків, споживання яких перевищує $60 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ для аналогічних кліматичних умов, подібних до України [9].

З 2020 року в Європі відбувається широкомасштабний перехід до спорудження будівель за стандартами NZEB (Nearly zero-energy buildings) тобто будівель з майже нульовим рівнем енергоспоживання. Енергоспоживання таких будівель має сягати не більше $15 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$.

У 2020 році Кабінет Міністрів України розробив та затвердив Концепцію реалізації державної політики в сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель.

За розрахунками Держенергоефективності встановлено, що проведення всебічної термомодернізації житлових будинків України сприятиме зменшенню обсягів енергоспоживання на половину в порівнянні з поточним рівнем [9].

Державний контроль за рівнем використання енергетичних ресурсів у будівельній галузі відбувається шляхом оцінки енергетичних характеристик будівель. Таким чином, оцінка рівня енергоспоживання під час проектування, будівництва та експлуатації стала основною визначальною ознакою їх енергоефективності. Розрахункові показники щорічного енергоспоживання використовуються для енергетичної сертифікації та складання паспортів будівель, відбору інвестиційних проектів з покращення енергоефективності, планування майбутніх витрат на енергоносії та демонстрації відповідності конкретним вимогам до енергетичних характеристик та для демонстрації відповідності певним вимогам до енергетичних показників [8].

Європейський Союз працює над значним зменшенням споживання енергії, сприяючи глобальній меті стати кліматично нейтральним до 2050 року.

Україна визначила стратегію сталого розвитку до 2030 року, яка передбачає зниження використання енергоресурсів у будівлях на 15% через впровадження термомодернізації. Фахівці у сфері сталого будівництва також підтримують модернізацію застарілих об'єктів, оскільки реконструкція виявляється більш вигідним процесом, ніж спорудження нових "зелених" будівель на їхньому місці. Цей процес включає теплоізоляцію стін та даху, заміну вікон, встановлення сонячних панелей, вентиляційних систем з рекуперацією тепла та інші заходи [12].

Відповідно до Закону України "Про енергетичну ефективність", у новозбудованих чи після капітального ремонту об'єктах клас енергоефективності повинен становити не менше "С" (загалом існує сім класів, де "А" – найвищий, а "G" – найнижчий). В основному найнижчий клас енергоефективності G серед усіх

сертифікованих будівель мають житлові будівлі (47,2%), навчальні заклади (59,7%) та заклади охорони здоров'я (46,2%) [13].

З січня 2024 року в Україні розпочала свою діяльність Державний фонд декарбонізації та енергоефективної трансформації. Це нове затверджене законом джерело фінансування надасть додаткові засоби для впровадження програм енергоефективності та зменшення викидів вуглецю в країні.

1.2.Повітрообмін як енергетична характеристика будівель

Згідно з міжнародними нормами та стандартами, які активно інтегруються в українські, будівлі вважаються комплексними енергетичними системами. Ці системи складаються з огорожувальних конструкцій, джерел енергопостачання, інженерних систем, а також враховують вплив зовнішнього клімату. Всі ці елементи взаємодіють, щоб забезпечити комфортні умови для людей, які проживають або працюють у будівлі, при цьому ефективно використовувати енергетичні ресурси [14].

При дослідженні енергоефективності будівель, що знаходяться в помірних та холодних кліматичних зонах, головна увага приділяється споживанню теплової енергії будівлями. Це обумовлено тим, що саме теплоспоживання є ключовим елементом витрат на енергоресурси. Крім того, саме сектор будівель має найбільший потенціал для енергозбереження. [14].

Теплові та енергетичні параметри будівель визначаються численними зовнішніми та внутрішніми факторами.

Ефективний аналіз заходів щодо підвищення енергоефективності має враховувати динамічну поведінку будівлі - взаємозв'язок між внутрішнім температурним режимом та факторами, що на нього впливають. В Україні все стає актуальним використання динамічних моделі для визначення енергетичних характеристик будівель з використанням погодинних кліматичних даних [2-4, 14, 15].

Витрати енергії в будівлі піддаються впливу шести основних факторів: зовнішні кліматичні умови, конструкція оболонки будівлі, обладнання та джерела

енергії, системи, експлуатація та технічне обслуговування, діяльність та поведінка мешканців, а також забезпечення комфортних умов середовища всередині будівлі.

Норми для розрахунку теплової потужності опалювальної системи багатоповерхових житлових будинків визначаються за чинними державними будівельними нормами – ДБН В.2.2-15:2019 "Житлові будинки. Основні положення" [16].

У багатьох європейських країнах питання енергоефективності будівель вирішуються ще на стадії їхнього проектування. Будівлі розробляються з урахуванням найновіших технологій та стандартів, що дозволяють мінімізувати споживання енергії та зменшити вплив на навколишнє середовище. Однак, в Україні більшість існуючих будівель були побудовані декілька десятиліть тому і не відповідають сучасним стандартам енергоефективності. Тому, аналіз показників енергоефективності проводиться на стадії експлуатації вже існуючих будівель, що має свої особливості, оскільки потребує врахування багатьох факторів.

Результати енергетичного аналізу будівель різного типу в Україні та за кордоном вказують, що після реалізації заходів з утеплення частка витрат з вентиляційним повітрям є найбільшою [2–4, 17], за умов дотримання вимог щодо повітрообміну. Вентиляційна складова теплових навантажень у житлових і громадських будівлях складає 30–50% [18]. У США дослідники приходять до висновку, що складова витрати на інфільтрацію сягає 33% [18].

Основними напрямками для підвищення енергоефективності будівель є застосування ефективної теплоізоляції під час будівництва та реконструкції, а також використання вікон з високими теплозахисними властивостями та низькою повітропроникністю. Ці заходи призводять до збільшення герметичності житлових та громадських будівель, що ускладнює проникнення свіжого повітря в приміщення. Для вирішення цієї проблеми, часто проводять провітрювання або встановлюють механічну вентиляцію, що знижує ефективність реалізованих енергозберігаючих заходів. Таким чином, виникає протиріччя між енергозбереженням та комфортом, який вимагає оптимального повітрообміну. Для вирішення цього конфлікту інтересів необхідно розглянути використання сучасних

систем вентиляції, які забезпечують ефективний повітрообмін без значного впливу на енергоефективність будівлі.

Багатоквартирні будинки створюють унікальні проблеми з якістю повітря в приміщенні (IAQ), оскільки забруднюючі речовини можуть переміщатися від одного приміщення до іншого, а мешканці мають обмежені можливості вносити зміни в саму конструкцію будівлі.

Наприклад, у США створено Стандартні робочі специфікації (SWS) – безкоштовний онлайн-інструмент і галузевий посібник, який визначає мінімально прийнятні результати для модернізації домашнього енергопостачання. Протоколи SWS та Агентства з охорони навколишнього середовища США (EPA) щодо здорового внутрішнього середовища для модернізації енергетики житлового сектору були розроблені разом і призначені для добровільного прийняття житловими програмами, що фінансуються з федерального бюджету, підрядниками приватного сектора та іншими організаціями і структурами, що працюють у сфері енергомодернізації житлових будинків. SWS відображає загальнобудинковий підхід до впровадження заходів з енергоефективності, які можуть включати вентиляцію, ізоляцію та повітроізоляцію [19].

У більшості існуючих будівель в Україні механічна вентиляція або не передбачена проектом, або не працює належним чином. Відпрацьоване повітря видаляється безпосередньо з місць, де воно найбільше забруднюється (кухні та санвузли), через природну витяжну каналну систему вентиляції. Свіже повітря потрапляє до приміщень шляхом інфільтрації через різні нещільності та отвори в огорожувальних конструкціях будівлі (переважно через віконні конструкції) або внаслідок провітрювань і нагрівається за допомогою системи опалення. Таким чином, відбувається обмін повітрям в усіх приміщеннях будівлі. Однак, після заміни старих вікон на нові, герметичні металопластикові, порушується повітряний режим в приміщеннях квартир. Це відбувається через те, що при відсутності механічної системи вентиляції, інфільтрація зовнішнього повітря стає єдиним джерелом надходження свіжого повітря. Це може призвести до необхідності

встановлення додаткових систем вентиляції для забезпечення оптимального повітрообміну.

Інфільтрація – це форма природної вентиляції, де обмін повітря в приміщенні відбувається через не спеціально організовані канали. Вона виникає внаслідок різниці між атмосферним тиском та тиском усередині приміщення, а також від впливу вітру, що проникає через нещільності у конструкціях, таких як вікна, двері, перекриття, а також при відкритті вентиляційних отворів, фрамуг та дверей. ASHRAE (Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціювання повітря) визначає інфільтрацію повітря як неконтрольований витік зовнішнього повітря всередину будівлі, спричинений наявністю перепаду тиску між різними елементами огороження будівлі [20].

Природна вентиляція є одним з найбільш складних показників для визначення, оскільки залежить від великого числа факторів. Усі фактори, як внутрішні, так і зовнішні впливають на ефективність природної вентиляції та потребують детального аналізу для оптимізації енергоефективності будівлі (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Внутрішні та зовнішні параметри повітря в кімнаті

Визначення кратності повітрообміну (ACH), з врахуванням впливових факторів для умов експлуатації є складним завданням. Зазвичай спеціалісти орієнтуються на показники зазначені у стандартах. Хоча на сьогоднішній день більшість стандартів не визначають конкретний метод для встановлення мінімального рівня повітрообміну, а натомість пропонують різні стратегії для його розрахунку. В результаті, фахівці, базуючись на національних стандартах, роблять власні висновки щодо методу визначення нормативного повітрообміну в приміщеннях. Фахівцями використовуються як емпіричні так і експериментальні методи визначення кратності повітрообміну. Найбільш поширені розрахункові емпіричні методи базуються на стандартах ASHRAE та BLAST (аналіз навантажень будівлі та системної термодинаміки) та визначають повітрообмін через різницю тисків [21, 22]. Експериментальні вимірювання є актуальними через можливість отримання фактичних даних у реальному часі [5-7, 14]. Емпіричні методи використовувались при розробці програмного забезпечення для обчислення енергетичних характеристик будівель.

Також вивчення складової інфільтрації є важливим не лише з точки зору її впливу на енергоспоживання, а й важлива складова якості внутрішнього повітря.

Тому вивчення кратності повітрообміну в будівлях є актуальним, як при експлуатації так і при термомодернізації будівель, адже оперування актуальними даними щодо параметрів повітрообміну в будівлях, дозволить розробляти ефективні стратегії для зменшення споживання енергії в будівлях з урахуванням динаміки експлуатаційних особливостей будівель та забезпечення вимог щодо якості повітря в приміщеннях.

1.3. Нормативно-правові документи

Європейський комітет стандартизації (CEN) розробив європейські стандарти (EN) щодо вентиляції будівель у 2007 році. Рекомендації щодо мінімальних витрат зовнішнього повітря на людину в громадських та житлових будівлях можна знайти в європейських стандартах EN 16798-1:2019 [23] та EN 16798-3:2019 [24].

Крім того, у США прийнято стандарти ASHRAE 62.2-2022 (Вентиляція та прийнятна якість повітря в житлових будинках) [25] та ASHRAE 62.1-2022 (Вентиляція та прийнятна якість повітря в приміщеннях) [26]. Стандарт ASHRAE 62.1-2022 [26] визначає мінімальну швидкість вентиляції та інші заходи, призначені для забезпечення якості повітря в приміщенні, прийнятної для людей, що знаходяться в приміщенні, метою мінімізації негативного впливу на здоров'я. Стандарт надає процедури та методи для виконання мінімальних вимог щодо вентиляції та якості внутрішнього повітря для інженерів, спеціалістів з проектування, власників та юрисдикційних органів. Стандарт ASHRAE 62.2-2022 [25] описує мінімальні вимоги для досягнення прийнятного IAQ за допомогою вентиляції житлових приміщень, локальної механічної витяжки та контролю джерел, для житлових приміщень із тимчасовими мешканцями. ASHRAE акредитовано Американським національним інститутом стандартів (ANSI) і дотримується вимог ANSI щодо належної процедури та розробки стандартів. Усі стандарти, наведені вище, надають значення за замовчуванням, які можна використовувати, якщо національне законодавство недоступне.

Вищезазначені нові стандарти щодо інтенсивності вентиляції враховують як присутність людей, так і внутрішні джерела, пов'язані з будівлею. Будівля характеризується як низьким рівнем забруднення, якщо будівельні матеріали, які використовуються для внутрішніх поверхонь, відповідають національним або міжнародним критеріям для будівельних матеріалів. Необхідні показники вентиляції пропонуються на основі критеріїв здоров'я та комфорту.

Рекомендовані вхідні значення наведено для кожної з різних категорій. Нижче наведено короткий опис категорій:

Категорія I: Високий рівень очікувань і рекомендований для приміщень, які займають дуже чутливі та тендітні люди з особливими вимогами, такі як інваліди, хворі, дуже маленькі діти та люди похилого віку;

Категорія II: нормальний рівень очікувань і повинен використовуватися для нових будівель і реновацій;

Категорія III: прийнятний, помірний рівень очікувань і може використовуватися для існуючих будівель;

Категорія IV: Значення поза критеріями для вищевказаних категорій. Ця категорія має прийматися лише для обмеженого періоду року.

Нормативні документи, що стосуються вентиляції житлових та громадських 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. Національні стандарти країн ЄС не визначають конкретного підходу до вентиляції житлових та громадських будівель. В більшості країн може застосовуватися як природня система вентиляції, так і механічна чи гібридна. Повітряний потік визначається в л/с на м², л/с на особу або через кратність повітрообміну в год⁻¹ [9].

Крім міжнародних стандартів, існують вимоги до вентиляції в національних будівельних нормах багатьох країн ЄС. В Україні стандарт EN 15251:2011 та EN 16798-3:2019 (на заміну EN 13779:2011) введені як національні [10, 23].

У стандарті EN 15251:2011 зазначено, що для визначення якості внутрішнього повітря не існує загального стандартного показника. Якість внутрішнього повітря в такому випадку визначається як обов'язковий рівень вентиляції чи концентрації CO₂. Загальноприйнято, що якість внутрішнього повітря знаходиться під впливом забруднення від людей та їхньої діяльності, від будівель та їх оснащення і від самої системи опалення, вентиляції та кондиціонування. Два останніх джерела зазвичай називають будівельними компонентами, однак не існує загальної згоди щодо того, як додавати різні джерела забруднення [27]. В діючому стандарті наведено декілька методів визначення необхідної норми вентиляції.

Відповідно до методу, що базується на людському і будівельному компонентах в таблиці 1.1 наведено рекомендованої норми вентиляції для нежитлових будівель.

Таблиця 1.1 – Приклади рекомендованої норми вентиляції для нежитлових будівель зі стандартною кількістю людей, що перебувають у будинку, для трьох категорій забруднення від самої будівлі за EN 15251:2011 [27]

Тип будівлі чи приміщення	Аудиторія			Клас		
Категорія	I	II	III	I	II	III
Загальна площа, м ² /особу	0,75	0,75	0,75	2	2	2
Норма вентиляції для мешканців, розрахована на особу, л/с	15	10,5	6	5	3,5	2
Норма вентиляції для викидів від будинку (для дуже низького рівня забруднення будівлі), л/с, м ²	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,2
Загальна норма вентиляції приміщення, л/с	15,5	10,8	0,8	5,5	3,8	2,2
Норма вентиляції для викидів від будинку (для низького рівня забруднення будівлі), л/с, м ²	1	0,7	0,4	1	0,7	0,4
Загальна норма вентиляції приміщення, л/с	16	11,2	6,4	6	4,2	2,4
Норма вентиляції для викидів від будинку (для високого рівня забруднення будівлі), л/с, м ²	2	1,4	0,8	2	1,4	0,8
Загальна норма вентиляції приміщення, л/с	17	11,9	6,8	7	4,9	2,8

Будівля з низьким і дуже низьким рівнем забруднення – це будівля, у якій більшість матеріалів, що використовуються для обробки внутрішньої поверхні, задовольняє національні або міжнародні норми низького або дуже низького забруднення матеріалів.

Відповідно до методу, що базується на нормі вентиляції, наведеній на особу чи на м² загальної площі в таблицях 1.2 та 1.3 наведено рекомендованої норми вентиляції для нежитлових і житлових будівель відповідно.

Таблиця 1.2 – Приклади рекомендованої норми вентиляції для нежитлових будівель трьох категорій забруднення тільки від будівлі за EN 15251:2011 [27]

Категорія	Повітряний потік на особу $\frac{\text{л/с}}{\text{особа}}$	Повітряний потік викидів забруднень будівлі $\frac{\text{л/с}}{\text{м}^2}$		
		Дуже низький рівень забруднення будівлі	Низький рівень забруднення будівлі	Високий рівень забруднення будівлі
I	10	0,5	1	2
II	7	0,35	0,7	1,4
III	4	0,2	0,4	0,8

Таблиця 1.3 – Приклади рекомендованої норми вентиляції для житлових будинків EN 15251:2011 [27]

Категорія	Норма повітро-обміну ^a	Кратність год ⁻¹	Вітальні і витяжний повітряний потік, л/с, спальні, переважно зовнішній повітряний потік				
	$\frac{\text{л/с}}{\text{м}^2}$		$\frac{\text{л/с}}{\text{особа}^b}$	$\frac{\text{л/с}}{\text{м}^2}$	Кухня ^a	Ванні кімнати ^b	Туалетні приміщення
I	0,49	0,7	10	1,4	28	20	14
II	0,42	0,6	7	1,0	20	15	10
III	0,35	0,5	4	0,6	14	10	7

^a Норма повітрообміну виражена в л/с, м² і кратність повітрообміну відповідають один одному при висоті стелі 2,5 м.

^b Кількість мешканців може бути розрахована за кількістю спалень. За необхідності мають використовуватись припущення на національному рівні; для енергетичного розрахунку та розрахунку якості внутрішнього повітря вони можуть змінюватись.

Згідно із стандартом ASHRAE 62.2-2022 можна використовувати загальні табличні значення кратності повітрообміну для всієї квартири (таблиця 1.4) які обираються в залежності від площі житла та кількості спалень.

Таблиця 1.4 – Вимоги до вентиляційного повітря для житлових будинків відповідно до стандарту ASHRAE 62.2-2022, л/с [26]

Загальна площа, м ²	Кількість спалень				
	1	2	3	4	5
<47	14	18	21	25	28
47-93	21	24	28	31	35
94-139	28	31	35	38	42
140-186	35	38	42	45	49
187-232	42	45	49	52	56
233-279	49	52	56	59	63
280-325	56	59	63	66	70
326-372	63	66	70	73	77
373-418	70	73	77	80	84
419-465	77	80	84	87	91

Відповідно наведених табличних значень стандарту ASHRAE 62.2-2022, для однокімнатної квартири загальною площею 32,8 м² загальна норма вентиляції житла становитиме 14 л/с на квадратний метр. При внутрішній висоті стелі в усіх приміщеннях в 2,5 м, еквівалентна кратність повітрообміну становитиме 0,61 год⁻¹.

При енергетичній сертифікації будівель, енергоаудиторами приймається, що кратність повітрообміну в житлових будівлях з природною вентиляцією становить 0,6 год⁻¹ відповідно до (державного стандарту України) ДСТУ 9091:2022 «Енергетична ефективність будівель». Та в розрахунках енергетичного сертифікату будівель ця величина приймається як інфільтраційна. Стандарт ДСТУ 9190:2022 [28]

посилається на ДБН В.2.5-67:2013 [29], який в свою чергу посилається на ДСТУ Б EN 15251:2011.

Українські державні будівельні норми для житлових будинків ДБН В.2.2-15:2019 [16] застосовують для умов проектування, реконструкції та капітального ремонту, вони містять вимоги щодо вентиляції для розрахунку тепловтрат у вигляді мінімальних значень кратності повітрообміну та витрати повітря для приміщень різного призначення [30].

Числові значення вимог до повітрообміну в приміщеннях житлових будинків за національними та міжнародними стандартами наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Вимоги до повітрообміну в приміщеннях житлових будинків за національними та міжнародними стандартами

Приміщення	ДБН В.2.2-15:2019	ДСТУ 9190:2022, ДБН В.2.5-67:2013 з посиланням на ДСТУ Б EN 15251:2011	ASHRAE 62.2-2022
Загальна кімната, спальня, дитяча, кабінет	0,50	0,60	0,61
Кухня, кухня-їдальня	1,50		
Коридор	0,50		

У діючому національному стандарті ДБН В.2.2-3:2018 наведено вимоги щодо повітрообміну приміщень різного призначення у закладах освіти. Відповідно до стандарту [31] у класних приміщеннях, навчальних кабінетах та лабораторіях закладів загальної середньої освіти та класних приміщень перших-четвертих класів вимоги до повітрообміну – 16 м³/год на 1 людину. Для аудиторій, навчальних кабінетів і профтехучилищах та ВНЗ (вищих навчальних закладах), навчальних майстернях з зонами для теоретичних знань, читальних залах, залах для курсового

проектування, студіях живопису, та ряду інших навчальних приміщень вимоги до повітрообміну – $20 \text{ м}^3/\text{год}$ на 1 людину.

У таблиці 1.6 наведено норми припливного повітря та швидкості повітрообміну для класних аудиторій з деяких міжнародних і національних стандартів і національні норми деяких європейських країн. Ці значення були отримані з урахуванням типової ситуації в навчальному класі з 25 учнями, площею 50 м^2 і внутрішньою висотою 3 м, що відповідає об'єму 150 м^3 [32].

Таблиця 1.6 – Вимоги до повітрообміну в навчальних приміщеннях закладів освіти [32].

Країна (стандарт або норми)	Повітрообмін	
	$\text{м}^3/\text{год}$	год^{-1}
[ASHRAE 62.1 (2022)]	558	3,7
[EN 15251 (2007)] (a)	756	5,0
Україна [ДБН В.2.2-3:2018]	400 (500) (b)	2,7 (3,3) (b)
Португалія [RECS (2013)]	600	4,0
Велика Британія [Building Bulletin 101 (2006)]	450(d)	3,0
Німеччина [DIN1946-2 (2005)]	500	3,3
Фінляндія [National Building Code – Part D2 (2010)]	540	3,6
Франція [Règlement Sanitaire Departemental Type (2004)]	375–450	2,5–3,0
(a) значення для класу II (нормальний рівень очікування) (b) вимоги для навчальних приміщень закладів вищої освіти (d) середнє добове значення; верхня рекомендована межа – $720 \text{ м}^3/\text{год}$. Для класів з природною вентиляцією, мінімальна вимога об'єму припливного повітря – $270 \text{ м}^3/\text{год}$.		

Аналізуючи дані наведені в таблиці 1.5 можна зробити висновок, що в Україні найнижчі вимоги до повітрообміну в навчальних приміщеннях в порівнянні з рядом інших країн.

Відсутність чіткого підходу в більшості стандартів для встановлення нормативного повітрообміну змушує проектувальників вибирати власну стратегію для його розрахунку, базуючись на рекомендаціях цих стандартів. При виконанні енергетичних розрахунків, зазвичай використовуються вимоги до повітрообміну, які визначені в національних стандартах.

Перелік діючих в Україні стандартів та норм в яких зазначені вимоги та норми до повітрообміну житлових та громадських будівель станом на 2024 рік:

- ДСТУ Б EN 15251:2011 Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель щодо якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики;

- ДСТУ Б EN 15243:2015 Вентиляція будівель. Розрахунок температури приміщень та методи визначення навантажень та енергопотреб для будівель з системами кондиціювання повітря;

- ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання;

- EN 15242 Вентиляція будівель. Методи розрахунку витрат повітря для вентиляції будівель з урахуванням інфільтрації;

- EN 15241 Вентиляція будівель. Методи розрахунку енерговтрат від вентиляції та інфільтрації повітря громадських будівель;

- ДСТУ EN 16798-3:2019 Енергоефективність будівель. Вентиляція будівель. Частина 3. Вентиляція в нежитлових будівлях. Експлуатаційні вимоги до систем вентиляції та кондиціювання повітря в приміщенні;

- ДБН В.2.2-3:2018 Будинки і споруди. Заклади освіти;

- ДСТУ Б CEN/TR 14788:2015 Вентиляція будівель. Проектування та визначення характеристик систем вентиляції житлових будинків;

– ДБН В.2.2-15:2019 Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення.

У країнах ЄС, а також в Україні, під час проведення енергетичних аудитів будівель, часто використовуються стандартні значення для кратності повітрообміну в цілому для будівлі. Однак, національні стандарти також передбачають можливість визначення кратності повітрообміну в окремих приміщеннях будівлі на основі спеціальних випробувань.

Існує ряд міжнародних стандартів якими можна керуватися при проведенні випробувань з метою визначення повітрообміну в будівлях, деякі з них імплементовані як нацстандарти:

- ДСТУ EN ISO 9972:2022 Теплотехнічні характеристики будівель. Визначення повітропроникності будівель. Метод випробувального тиску (на заміну ДСТУ Б В.2.2-19:2007);

- ДСТУ EN ISO 20485:2019 Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Метод індикаторного газу;

- ISO 12569:2017 Теплові характеристики будівель і матеріалів. Визначення питомої швидкості повітряного потоку в будівлях. Метод розведення індикаторного газу;

- ASTM E741-23 Standard Test Method For Determining Air Change In A Single Zone By Means Of A Tracer Gas Dilution. Вибір методів та моделей для визначення повітрообміну.

1.3.1. Експериментальне визначення повітрообміну

Хоча енергетичний вплив ненавмисної інфільтрації на використання енергії будівлею може бути значним, поточні методи моделювання енергії та методи проектування, як правило, не в змозі точно врахувати інфільтрацію оболонки та вплив покращеної герметичності. 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 всередині-ззовні, зовнішній тиск, а також напрям і швидкість вітру [33, 34].

Кратність повітрообміну можна визначити за допомогою експериментальних методів з використанням індикаторного газу. Ці методи застосовуються до приміщень, які вважаються окремими зонами, тобто приміщень із низьким внутрішнім опором повітряному потоку (тобто мало внутрішніх перегородок), рівномірною температурою та концентрацією та низькими або нульовими ефектами імпульсу (тобто інфільтрація через малі отвори, відсутність механічних систем вентиляції), де можна припустити ідеальне змішування.

Індикаторний газ – це ідеалізована речовина, яка використовується для позначення об'ємів повітря, щоб можна було зробити висновок про їх масовий рух. Ідеальний газ-індикатор має бути безпечним (нетоксичним, не алергенним, незаймистим), неактивним (він не повинен вступати в хімічну чи фізичну реакцію з навколишнім середовищем) і легко вимірюваним (бажано, щоб його можна було вимірювати за допомогою недорогих приладів, які повинні мати можливість вимірювати низькі концентрації). Крім того, індикаторний газ повинен ідеально змішуватися з повітрям (подібної щільності) і його можна відрізнити від компонентів повітря.

Для вимірювання швидкості повітрообміну можна використовувати кілька методів індикаторного газу:

1. Спад концентрації: доза індикаторного газу впорскується та змішується з повітрям у кімнаті. Закачування припиняється і концентрація індикаторного газу стає рівномірною, починається зниження концентрації індикаторного газу, яке реєструється протягом заданого періоду.

2. Постійне впорскування: Індикаторний газ безперервно виділяється в приміщення з постійною швидкістю потоку протягом усього періоду вимірювання.

3. Постійна концентрація: впорскування індикаторного газу контролюється, щоб підтримувати постійну концентрацію у вентильованому приміщенні.

Корейськими дослідниками проводились натурні вимірювання швидкості інфільтрації у багатоповерхових житлових будинках методом постійної

концентрації. Швидкість інфільтрації вимірювалася за сезоном, і середня швидкість інфільтрації становила близько $0,2 \text{ год}^{-1}$ протягом літа та осені та $0,6 \text{ год}^{-1}$ протягом зими [35]. Важливо зазначити, що вирішальним для цього методу є те, що відбір проб можна розпочати лише тоді, коли концентрація індикаторного газу є близькою до рівноважної. Якщо вибірка розпочнеться надто рано, наслідком буде переоцінка кратності повітрообміну.

Метод постійного впорскування підходить лише для короточасних вимірювань з кратністю повітрообміну в досліджуваному об'ємі не вище $0,3 \text{ год}^{-1}$ [36].

Серед трьох методів спад концентрації є найбільш прийнятним, оскільки його реалізація найлегша. Відповідно до визначення ISO 12569:2017 метод спаду концентрації – метод, за допомогою якого питому витрату повітря отримують із спадної кривої концентрації, що спостерігається після закінчення впорскування індикаторного газу. У роботі [37] розповідається про розробку двох алгоритмів аналізу, призначених для полегшення дослідження вентиляції в житлових будинках за допомогою методу спаду концентрації.

Крім того, необхідна кількість індикаторного газу для цього методу вимірювання нижча, ніж для інших методів. Процедура зменшення концентрації полягає у впорскуванні невеликої кількості індикаторного газу в простір, при цьому слідкуючи за тим, щоб початкові концентрації газу були рівномірними по всій будівлі. Потім відстежується спад концентрації індикаторного газу. Концентрація газу зменшується, коли свіже повітря з нижчою або нульовою концентрацією газу змішується з повітрям у приміщенні. Потік вхідного повітря, таким чином, можна розрахувати за допомогою масового балансу в системі.

Гази, які зазвичай використовуються як індикатори в процедурі спаду концентрації, включають гексафторид сірки (SF_6) [38, 39] і вуглекислий газ (CO_2) [40–43]. Перфторвуглецеві сполуки також є поширеними індикаторами, які використовуються для вимірювання кратності повітрообміну, але в рамках методу розшифрувати PFT (Perfluorocarbon Tracergas – перфторвуглець в якості індикаторного газу) [44]. Однак використання SF_6 або PFT як індикатора збільшує складність і витрати на процедуру, оскільки для виконання вимірювань та аналізу

потрібні досвідчені оператори та спеціальне обладнання (наприклад, газовий хроматограф), також в них складно врахувати динамічну зміну зовнішніх та внутрішніх умов. Вимірювання методом PFT можуть тривати кілька днів або тижнів і не заважати мешканцям.

Ямамото та ін. [45] провели вимірювання швидкості повітрообміну в 509 помешканнях за допомогою методу перфторвуглецевого індикатора (PFT) у Техасі, Нью-Джерсі та Каліфорнії в США між 1999 і 2001 роками. Загальна виміряна швидкість повітрообміну становила $0,71 \text{ год}^{-1}$ ($0,47 \text{ год}^{-1}$ в Техасі, $0,88 \text{ год}^{-1}$ в Нью-Джерсі і $0,87 \text{ год}^{-1}$ в Каліфорнії). Середнє значення швидкості обміну повітря в Техасі, Нью-Джерсі та Каліфорнії становило $0,37 \text{ год}^{-1}$, $0,88 \text{ год}^{-1}$ і $1,13 \text{ год}^{-1}$ відповідно в сезон охолодження. Однак інші вчені [39] провели аналіз помилок методу PFT і виявили, що за ідеальних обставин загальна невизначеність становить 10–15%. Навіть у контрольованих експериментах, проведених професіоналами, невизначеність сягає 20%.

Гексафторид сірки є одним з найбільш часто використовуваних газів-індикаторів у всьому світі з початку 1970-х років, що підтверджується кількістю відповідних публікацій [38, 46, 47]. З усіх кандидатів характеристики SF_6 найближчі до ідеалу індикаторного газу. Завдяки своїй високій стабільності SF_6 дуже повільно розкладається в атмосфері і належить, як і перфторовані вуглеводні, до кліматичних парникових газів. Тому, щоб уникнути непотрібної небезпеки для навколишнього середовища, його слід використовувати обережно та помірковано в максимально низьких концентраціях.

CO_2 є нетоксичним індикаторним газом, який зазвичай використовується як важливий параметр у приміщенні, з фонову концентрацією приблизно 420 частин на мільйон. Використання CO_2 не є обмеженням, оскільки він не вибухонебезпечний і нетоксичний при низьких концентраціях. Концентрація CO_2 на відкритому повітрі може змінюватися, але цю фонову концентрацію можна виміряти та компенсувати в розрахунку швидкості зміни повітря. Крім того, CO_2 відповідає ряду характеристик хорошого індикаторного газу.

Використання CO_2 як показника вентиляції зовнішнього повітря має відображати той факт, що вимоги до вентиляції зовнішнього повітря залежать від типу приміщення, кількості людей і характеристик мешканців (наприклад, віку, маси тіла та рівня активності) [48].

Глобальні середні концентрації CO_2 визначаються складною взаємодією джерел, поглиначів і рушійних сил. У геологічному часовому масштабі вони сильно змінювалися, але протягом сотень тисяч років, аж до початку двадцятого століття, вони були нижчими за 300 ppm, вперше перевищивши 300 ppm у 1912 році. З того часу середня зовнішня концентрація CO_2 зросла, досягнувши 420 ppm у 2021 році. На тенденцію збільшення концентрації CO_2 на відкритому повітрі накладаються щоденні та сезонні коливання, а також більші коливання в міських районах) [48].

У дослідженні [49] було визначено швидкість вентиляції на основі регулярних вимірювань повітря в приміщенні. Використаний метод складався з триетапного процесу, який базується на аналітичному розв'язанні рівняння балансу маси для концентрацій ключових забруднюючих речовин, таких як CO_2 . Було виявлено, що результати моделі для концентрацій у приміщенні узгоджуються з експериментально виміряними значеннями.

В роботі [50] було виявлено досить хорошу відповідність між показниками обміну повітря, розрахованими на основі CO_2 концентрації та швидкості зміни повітря, виміряні методом спаду або постійної концентрації з використанням фреону як індикаторного газу. Різниця між результатами, отриманими цими методами, була меншою ніж 10%. Техніка пасивного індикаторного газу показала результати, які значно відрізнялися від інших методик. Різниця коливалася від 20% до 120%.

Ряд досліджень використовували методи пасивного індикаторного газу (виділення від людей) для оцінки інтенсивності вентиляції в будівлях. У дослідженні [51] було виявлено, що ця методика занижує середню вентиляцію на 30%. У своєму дослідженні [52] Ченг і Лі досліджували швидкість зміни повітря за

допомогою індикаторного газу з використанням сухого спирту, як джерела введення CO₂.

У країнах з холодним або помірним кліматом мешканці проводять у своїх домівках понад 50% часу. У деяких групах населення (наприклад, немовлята та люди похилого віку) ця частка навіть перевищує 90%. Вуглекислий газ є одним з головних забруднювачів повітря в житлових та громадських приміщеннях [4-7]. Він виділяється при диханні людей, використанні побутової техніки, спаленні палива та інших джерел.

Ряд країн опублікували ліміти CO₂ в приміщеннях, в деяких випадках для всіх житлових будівель, а в інших випадках розрізняють житлові та нежитлові будівлі. Ці обмеження, як правило, становлять 1000 частин на мільйон об'єму, але досягають приблизно 1500 частин на мільйон об'єму. Вони, як правило, призначені для управління IAQ та симптомів СХБ (синдром хворого будинку), при цьому CO₂ використовується як індикатор вентиляції. Особливої уваги заслуговує обмеження в 1000 ppm в Японії, яке було видане в 1970 році. Там щороку перевіряють тисячі будівель, щоб визначити, чи відповідають вони Закону про санітарне обслуговування будівель [48].

Для робочих місць Управління з охорони праці та гігієни США (OSHA) та Національний інститут безпеки та гігієни праці (NIOSH) встановили середньозважене за часом граничне значення 5000 ppm для впливу в повітрі протягом будь-якої 8-годинної робочої зміни протягом 40-годинної робочого тижня та 30 000 частин на мільйон як обмеження короточасного впливу, тобто 15-хвилинне середньозважене за часом значення, яке не можна перевищувати в будь-який час протягом робочого дня. Стандарт ASHRAE 62.1 не містить граничного значення CO₂ в приміщенні з видання стандарту 1989 року. Нерозуміння попередніх видань стандарту продовжує спонукати багатьох неправильно приписувати ліміт 1000 частин на мільйон ASHRAE [48].

У таблиці 1.7 наведена залежність самопочуття від концентрації газу в повітрі приміщення.

Таблиця 1.7 – Вплив вуглекислого газу на людину [6]

Рівень CO ₂		Фізіологічні прояви
ppm	г/м ³	
380–400	0,68–0,72	Атмосферне повітря – ідеальне для здоров'я і гарного самопочуття
400–600	0,72–1,08	Нормальний рівень для приміщення. Рекомендовано не перевищувати для дитячих садків, шкільних приміщень та інших навчальних закладів
600–800	1,08–1,44	З'являються скарги на якість повітря. У людей з астматичними проблемами частішають напади
800–1000	1,44–1,80	Кожен другий відчуває млявість, духоту та головний біль. Може призвести до негативних змін крові, можуть з'явитися проблеми з кровоносною та дихальною системою
1000–1400	1,80–2,52	Млявість, проблеми з уважністю і обробкою інформації, проблеми з носоглоткою, тяжке дихання
1400–2000	2,52–3,60	Сильна втома, нездатність зосередитися, безініціативність, проблеми зі сном, сухість слизових оболонок
2000 <	3,60 <	Кількість помилок в роботі сильно зростає, 70 % співробітників не можуть зосередитися на роботі

За результатами досліджень [53] слідує, мешканці кімнати з підвищеним рівнем концентрації вуглекислого газу докладають більше зусиль для дихання, їхні серця б'ються швидше, а рівень оксигенації клітин знижується. В результаті з'являються ознаки ранньої втоми і відсутність концентрації на робочому місці, що в кінцевому підсумку призводить до низької професійної ефективності і низької продуктивності праці.

Дослідження, проведене в аудиторіях деяких університетів, підтверджує тісний зв'язок між якістю внутрішнього середовища та успішністю навчання студентів [54]. Крім того, неналежна якість повітря в приміщенні може значно знизити ефективність роботи в офісних будівлях. У дослідженні [55]

підтверджують це припущення та визначають зниження продуктивності офісної роботи на 6–9%, особливо через зниження здатності до концентрації.

Нещодавні дослідження на мишах показують запальні зміни в крові при 2000 – 4000 ppm і витік рідини з кровоносних судин у тканину мозку при 2000 ppm [56]. Подальше підтвердження цих результатів було знайдено в експериментах з нейтрофілами людини (тип лейкоцитів) у тих же концентраціях [57]. Ці висновки підтверджують феномен токсичності чистого CO₂ для мозку та механічно узгоджуються з повідомленнями про когнітивні зміни, які спостерігалися в експериментах на людях при концентраціях, що зазвичай спостерігаються в приміщенні [48].

Дослідниками [58] було встановлено, що високі концентрації CO₂ вночі на рівні 2500 ppm можуть впливати на якість сну, а також на загальну продуктивність наступного дня. За опитуваннями, якість сну та відчуття свіжості повітря в спальні значно покращилися, коли рівень CO₂ був нижчим, також зменшилась сонливість наступного дня та покращилась здатність зосереджуватися.

Дослідження [43] підтверджує, що в Гуанчжоу, Китай, в більшості будинків сплять із закритими вікнами, коли використовують кондиціонер. Щоб визначити розподіл рівня інфільтрації повітря в спальнях, було зібрано 202 зразки протягом сезону охолодження. Вимірювання проводили протягом ночі з використанням CO₂, що утворюється сплячими мешканцями, як джерело індикаторного газу для розрахунку швидкості інфільтрації повітря. Швидкості інфільтрації повітря з логарифмічним нормальним розподілом ($R^2 = 0,85$) становили від 0,05 до 1,32 год⁻¹ із середнім арифметичним 0,41 год⁻¹.

В іншій праці [59] було доведено, що під час перебування однієї людини в кімнаті з новим металопластиковим вікном відбулося підвищення концентрації вуглекислого газу на 33 % вище, ніж у випадку, коли в кімнаті встановлено старе дерев'яне подвійне вікно. Коли людина виходила з приміщення, концентрація вуглекислого газу починала знижуватися. В кімнаті де були встановлені нові пластикові вікна, зниження концентрації вуглекислого газу було приблизно на 27% менше в порожній кімнаті, ніж у порожній кімнаті зі старим дерев'яним вікном.

За результатами дослідження [60] встановлено, що використання періодичного режиму повітрообміну в досліджуваній квартирі в робочі дні призводить до зниження енерговитрат порівняно з постійним повітрообміном на рівні верхніх значень графіка провітрювання. З точки зору енергоефективності, використання постійної швидкості повітрообміну згідно зі стандартом ASHRAE 62.2-2022 є найбільш ефективним підходом. З точки зору якості повітря в приміщенні та концентрації CO_2 і летких органічних сполук більш ефективним є плановий повітрообмін із підвищеною швидкістю повітрообміну (від EN 16798) протягом робочих годин. Таким чином, використання необхідних і експериментальних значень швидкості повітрообміну для створення погодинних графіків дозволяє більш точно визначити енергоспоживання будівлі та вибрати оптимальний графік роботи інженерних систем будівлі для забезпечення теплового комфорту та якості повітря в приміщеннях у години перебування.

Діоксид вуглецю також розглядається в програмах сертифікації зеленого будівництва. Два нещодавніх огляди основних сертифікацій зеленого будівництва, розроблених у всьому світі, і показників, які вони використовують для оцінки якості внутрішнього середовища, показали, що CO_2 є одним із найкращих показників IAQ у цих сертифікаціях [61]. Однак контрольні значення, які використовуються для оцінки концентрації CO_2 , не є однорідними, коливаючись від 530 до 1500 ppm [48, 62].

1.3.2. Математичне моделювання та огляд програмного забезпечення

Незважаючи на свою важливість, аналіз повітряних потоків значно відставав від моделювання інших характеристик будівлі через обмеженість даних, обчислювальні труднощі та несумісні методи аналізу різних потоків. Особливо це стосується комбінованого моделювання будівлі та системи ОВК (опалення, вентиляція та кондиціювання повітря). Таким чином, багато користувачів програмного забезпечення моделювання енергії просто припускають постійні рівні

інфільтрації, які не відображають відомі залежності від зовнішніх погодних умов і роботи системи вентиляції.

Альтернативний метод визначення рівня повітрообміну полягає у використанні емпіричних методів визначення швидкості повітрообміну на основі стандартів ASHRAE та BLAST. Вони враховують три механізми впливу: ефект стека, вітровий ефект та механічну вентиляцію. Ефект вітру є найбільш складним та залежить від таких факторів, як висота будівлі, її спрямованість, швидкість та напрямок вітру та іншого. Для більш ефективного повітряного потоку та забезпечення необхідної якості повітря в приміщеннях використовують чисельне моделювання для моделювання розподілу повітря за допомогою програмного забезпечення: eQuest, EP (EnergyPlus) [63], TRNSYS, CONTAM, DOE2, DesignBuilder [64].

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 [63] разом з користувацьким інтерфейсом DesignBuilder [64].

Для числової оцінки впливу статичних та динамічних факторів використовувалися програмні рішення для енергетичного моделювання будівель. Одним з найбільш вживаних методів для аналізу енергетичних характеристик будівель є застосування програмного забезпечення EnergyPlus [63] разом з користувацьким інтерфейсом DesignBuilder [64]. Цей інструмент дозволяє проводити детальний аналіз енергоспоживання, враховуючи різноманітні параметри будівлі та її експлуатації.

В дослідженні [65] запропоновано метод оцінки інфільтрації в комерційних будівлях за допомогою EP, який враховує величину швидкості вітру, різницю температур (більшість емпіричних методів враховує лише температурний ефект), але не враховує напрямок вітру [30].

Дослідники в [66] навели приклад використання структури спільного моделювання EnergyPlus [63] і CONTAM для моделювання системи вентиляції на основі CO₂ для оцінки енергетичних і вентиляційних характеристик.

Energy Plus використовується для енергетичного моделювання, тоді як CONTAM використовується для моделювання повітряного потоку. Energy Plus – це програма моделювання всієї будівлі, розроблена Міністерством енергетики США. Вона моделює процеси опалення, охолодження, освітлення та вентиляції в будівлях і включає багато можливостей моделювання, таких як часові кроки менше однієї години, модульні системи, багатозонний повітряний потік, тепловий комфорт і природна вентиляція.

CONTAM – це багатозонне програмне забезпечення для аналізу повітряного потоку та переносу забруднень, розроблене Національним інститутом стандартів і технологій США (NIST).

На сайті розробників [67] зазначено, що CONTAM дозволяє визначати:

- повітряні потоки: інфільтрація, ексфільтрація та міжкімнатні повітряні потоки в системах будівель, що приводяться в дію механічними засобами, тиском вітру, що діє на зовнішню частину будівлі, та ефектами плавучості, спричиненими різницею температур повітря в приміщенні та на вулиці.

- концентрації забруднювачів: розсіювання забруднюючих речовин у повітрі, що переносяться цими повітряними потоками; трансформується різними процесами, включаючи хімічне та радіохімічне перетворення, адсорбцію та десорбцію на будівельних матеріалах, фільтрацію та осадження на будівельних поверхнях тощо; і генеруються різноманітними джерельними механізмами та/або

- особистий вплив: прогноз впливу забруднюючих речовин у повітрі на мешканців.

CONTAM може бути корисним у різноманітних програмах. Його здатність обчислювати швидкість повітряного потоку в будівлі та відносний тиск між зонами будівлі корисна для оцінки адекватності швидкості вентиляції в будівлі, для визначення зміни швидкості вентиляції з часом, для визначення розподілу вентиляційного повітря всередині будівлі та для оцінки впливу зусиль по

герметичності оболонки на рівень інфільтрації та пов'язані з цим енергетичні наслідки. CONTAM може динамічно поєднуватися з програмами аналізу енергії, включаючи EP і TRNSYS. Програма використовується для оцінки технологій контролю якості повітря в приміщеннях та для оцінки показників якості повітря всередині існуючих будівель.

У цьому дослідженні, з використанням програмного забезпечення EnergyPlus [63], було отримано дані про теплове навантаження та енергоспоживання в досліджуваній квартирі в різних часових інтервалах при різних режимах повітрообміну. Ці режими були встановлені на основі результатів експерименту та нормативних значень. Дослідження дозволило оцінити ефективність використання природної вентиляції в квартирі та проаналізувати представлені підходи до встановлення повітрообміну в енергетичних розрахунках.

Висновки до розділу 1 та постановка завдань дослідження

Сектор житлових та громадських будівель в Україні має значний потенціал для підвищення енергоефективності. На даний момент, цей сектор є одним з найбільших споживачів енергії в країні, а його ефективність використання енергії значно нижча, ніж у багатьох країнах Європи. Втрати теплової енергії в житлових будинках є найбільшою складовою енерговитрат, що свідчить про великий потенціал для енергозбереження.

В країнах ЄС та США важливу увагу приділяють не лише термомодернізації огорожувальних конструкцій, а й дослідженням вентиляційної складової та різним підходам до її визначення. В Україні питання, пов'язані з дослідженням кратності повітрообміну в будівлях потребують розвитку. Кратність повітрообміну відіграє важливу роль не лише з точки зору впливу на енергоефективність будівлі, а й з точки зору забезпечення якості повітря в приміщеннях, та умов мікроклімату. Одним з ключових етапів є імплементація найпоширеніших європейських методик і стандартів до умов України.

Забезпечення нормативної кратності повітрообміну є одним із головних характеристик енергоефективної будівлі. Зазвичай вимоги до повітрообміну в житлових приміщеннях задаються для всього житла, рідше для окремих типів приміщень. Використання постійних значень кратності повітрообміну є зручним та доцільним при розробці енергетичних сертифікатів та проектування. Однак, якість повітря в приміщенні залежить не тільки від кратності повітрообміну, але й від інших важливих факторів. Наприклад, рівень вуглекислого газу в приміщенні може значно впливати на якість повітря. Тому, при оцінці енергоефективності будівлі, важливо врахувати всі ці фактори.

Експериментальне дослідження цієї складової є цінними через можливість отримання фактичних даних у реальному часі, а моделювання є потужним інструментом для дослідження розподілу повітря в будівлях. Використання різних методів дозволить отримати уточнені показники кратності повітрообміну та більш якісно оцінити величину енергоспоживання житловими та громадськими будівлями. Отримані результати можуть бути використані для підвищення енергоефективності будівлі.

Тому, потребують розвитку та аналізу питання щодо визначення природної кратності повітрообміну з врахуванням мінливості зовнішніх та внутрішніх умов та дослідження впливу цієї складової при моделюванні енергоспоживання будівель.

Були сформовані наступні завдання дослідження:

- проведення експериментально-розрахункового дослідження динаміки зміни рівня CO₂ в приміщеннях будівель різного призначення під впливом природного повітрообміну;
- оцінення впливу повітрообміну на енергоспоживання будівлі на базі динамічної моделі створеної в програмному середовищі DesignBuilder/EnergyPlus;
- аналіз сучасних методів визначення енергетичних показників будівель і підходів до визначення повітрообміну в них;
- розробка динамічних моделей будівель для дослідження теплового стану та енергетичних показників будівлі з врахуванням погодинної зміни природного повітрообміну.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВІТРООБМІНУ В БУДІВЛЯХ

При визначенні енергетичних показників будівель, діючі методики розрахунку часто не враховують повністю вплив деяких факторів. Наприклад, динаміка зміни зовнішньої температури та вплив сонячних теплонадходжень можуть бути враховані лише помісячно за національним стандартом [68]. Однак, підходи до врахування динаміки рівня повітрообміну не передбачені в нацстандартах.

В цьому контексті, важливо розглянути нові методики досліджень, які базуються на емпіричних та експериментальних методах дослідження природної кратності повітрообміну в будівлях. Ці методики дозволяють отримати більш точні дані про повітрообмін, що в свою чергу може вплинути на загальні енергетичні показники будівлі. Крім того, важливо розглянути використання програм для динамічного моделювання енергетичних показників.

Такий комплексний підхід до визначення енергетичних показників будівель дозволяє отримати більш точну і повну картину енергетичного стану будівлі, що в свою чергу може допомогти при визначенні потреби в модернізації та впровадженні заходів з енергозбереження.

2.1. Загальна схема досліджень та опис об'єктів аналізу та моделювання

Методологія системного підходу до детального аналізу динамічних енергетичних характеристик будівлі включає в себе розгляд будівлі не як єдиного об'єкту, а як сукупності окремих зон. Це дозволяє проводити більш точний аналіз енергетичних характеристик кожної зони окремо, що в свою чергу дає можливість отримати загальну картину енергетичних характеристик для об'єкту в цілому [14, 69].

У цій роботі було проведено дослідження кратності повітрообміну в будівлях, що є частиною масової забудови. Ці будівлі мають схожі термічні характеристики огорожуючих конструкцій та територіальне розміщення. Дослідження проводилось на основі емпіричної методики та експериментальних

вимірювань в житлових та начальних приміщеннях. Результати цих вимірювань та розрахунків потім були використані для створення динамічних моделей, які допомогли визначити енергетичні характеристики будівель.

На рисунку 2.1 приведена схема проведення досліджень природної кратності повітрообміну.



Рисунок 2.1 – Схема проведення досліджень

У дослідженні природної кратності повітрообміну першим етапом було проведення імітаційного експерименту. Для цього дослідження було обрано

протяжну 8-поверхову будівлю навчального корпусу КПІ (Київського політехнічного інституту) ім. Ігоря Сікорського №22, розташованому в місті Києві (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Навчальний корпус КПІ ім. Ігоря Сікорського №22 в м. Києві

Обраний для дослідження навчальний корпус відповідає характеристикам типової масової забудови 1970-х років. Таким чином, він є типовим представником існуючих будівель ВНЗ в Україні, що робить отримані результати більш універсальними та застосовними до широкого спектру подібних будівель.

Вентиляція в корпусі є природною, а система опалення - однотрубна з вертикальною верхньою розводкою. Проектна внутрішня температура повітря становить 18°C. Більшість навчальних аудиторій та лабораторій мають одне зовнішнє огороження, орієнтоване на південь або північ.

Основним об'єктом аналізу в даному дослідженні є типова аудиторія. Її розміри становлять 5,5×6,1 м, а висота приміщення – 3,2 м. Аудиторія має одну зовнішню стіну з вікном, яке має подвійне застління в дерев'яних спарених плетіннях. Коефіцієнт пропускання сонячних теплонадходжень світлопрозорих конструкцій в зону кімнати становить 0,56.

У рамках цього дослідження було вибрано групу репрезентативних приміщень, які розташовані на північній та південній сторонах будівлі, зокрема на 1, 4 та 7 поверхах. Цей вибір було зроблено з метою отримання більш точних та

репрезентативних даних про природну кратність повітрообміну в різних частинах будівлі та на різних висотах.

Кліматичні погодинні дані для міста Київ використані в розрахунках були взяті з Міжнародного погодного файлу IWEC (The International Weather for Energy Calculation) [70]. Сонячні теплові надходження до приміщення були розраховані за допомогою даних з IWEC файлу, використовуючи метод “Full interior and exterior with reflection”, який враховує відбивання від поверхонь та ґрунту.

Наступним кроком було проведення експериментального дослідження кратності фактичного повітрообміну в декількох аудиторіях вищезазначеного навчального корпусу на 1, 3, 4 та 7 поверхах в зимовий період.

Другим етапом дослідження стало експериментальне вивчення кратності фактичного повітрообміну. Це дослідження було проведено в зимовий період в декількох аудиторіях навчального корпусу КПП ім. Ігоря Сікорського №22, розташованих на 1, 3, 4 та 7 поверхах. Окрім того, було проведено дослідження концентрації вуглекислого газу в режимі охолодження (зміни температури внутрішнього повітря). Для цього було обрано аудиторію на 4 поверсі, оснащену функціонуючим кондиціонером. Це дозволило вивчити вплив системи кондиціювання повітря на рівень повітрообміну в приміщенні.

У рамках дослідження в навчальному корпусі дослідження проводилось окремо для кожного приміщення. Наступним етапом було проведено серію експериментальних вимірювань в житловій квартирі, де особливу увагу приділяли масопереносу між різними зонами. Це дозволило отримати більш точну картину повітрообміну в квартирі.

Об'єктом дослідження була репрезентативна однокімнатна квартира в гуртожитку сімейного типу (рисунку 2.3), загальна площа якої становить 32,8 м². Ця квартира розташована на 9 поверсі 9-ти поверхової будівлі. Площа житлової кімнати в цій квартирі становить 17,4 м², кухні – 6,4 м², а коридору – 4,9 м².



Рисунок 2.3 – Гуртожиток №22 КПІ ім. Ігоря Сікорського

Огороджуючі конструкції цієї будівлі відповідають вимогам масової забудови 80-х років XX століття і мають низький термічний опір. Вікна і балкон репрезентативної квартири орієнтовані на південь. Квартира має одну зовнішню стіну. Вікна в квартирі з подвійним заскленням у дерев'яних спарених плетіннях, а балконні двері – подвійні з частковим заскленням. В гуртожитку функціонує канална природна вентиляція, що є важливим фактором при визначенні кратності повітрообміну в приміщенні.

2.2.Розробка емпіричної методики визначення кратності повітрообміну

Зазвичай, в математичних моделях для визначення енергоспоживання будівель, вентиляційний компонент (або повітрообмін) визначається через кратність повітрообміну. Експериментальне визначення повітрообміну може бути складним завданням. Навіть при використанні однакових віконних конструкцій, кількість повітря, яке природно потрапляє в приміщення через повітропроникність, може варіюватися. Повітрообмін в приміщенні залежить від численних факторів, як зовнішніх, так і внутрішніх. Це може включати такі речі, як температура та вологість зовнішнього повітря, а також кількість людей в приміщенні та їх активність.

У співавторстві з Дешко В.І. та Білоус І.Ю. був розроблений «Емпіричний метод розрахунку погодинної природної кратності повітрообміну в

багатоповерхових будівлях в умовах мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища», на який отримано авторське право №r202300127 на науковий твір.

У роботі використано узагальнення методик визначення кратності повітрообміну, основаних на визначенні різниці тисків, наведених в дослідженнях [22, 71, 72] та підходи ASHRAE [26, 73]. Різниця тисків в будівлі створюється трьома різними механізмами: ефект стека (stack effect), тиск вітру, примусовий тиск вентилятора механічної вентиляції (рисунок 2.4), як їх сума:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_s + \Delta P_w + \Delta P_v = \Delta P_{v_{inf}}, \quad (2.1)$$

де ΔP_{tot} – загальна різниця тисків, Па;

ΔP_s – різниця тисків від ефекту стека, Па;

ΔP_w – різниця тиску від вітру, Па;

ΔP_v – різниця тисків від примусової вентиляції, Па;

ΔP_{inf} – інфільтраційна різниця тисків, Па.

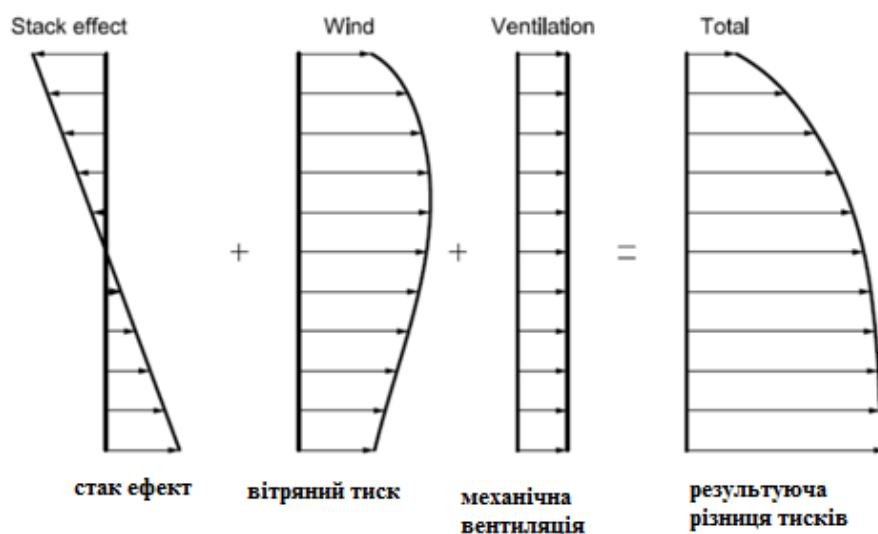


Рисунок 2.4 – Приклад підсумування профілів різниці тиску [22]

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

$$\Delta P_s = P_e(z) - P_i(z) = z(\rho_e - \rho_i)g, \quad (2.2)$$

де z – висота від опорної точки, м;

ρ_e, ρ_i – густина повітря зовнішнього та внутрішнього повітря, кг/м^3 ;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

На рисунку 2.5 висота характеризує нейтральний рівень тиску (NPL), при якому внутрішній та зовнішній тиски однакові, зазвичай цей рівень міститься на середньому поверсі будівлі.

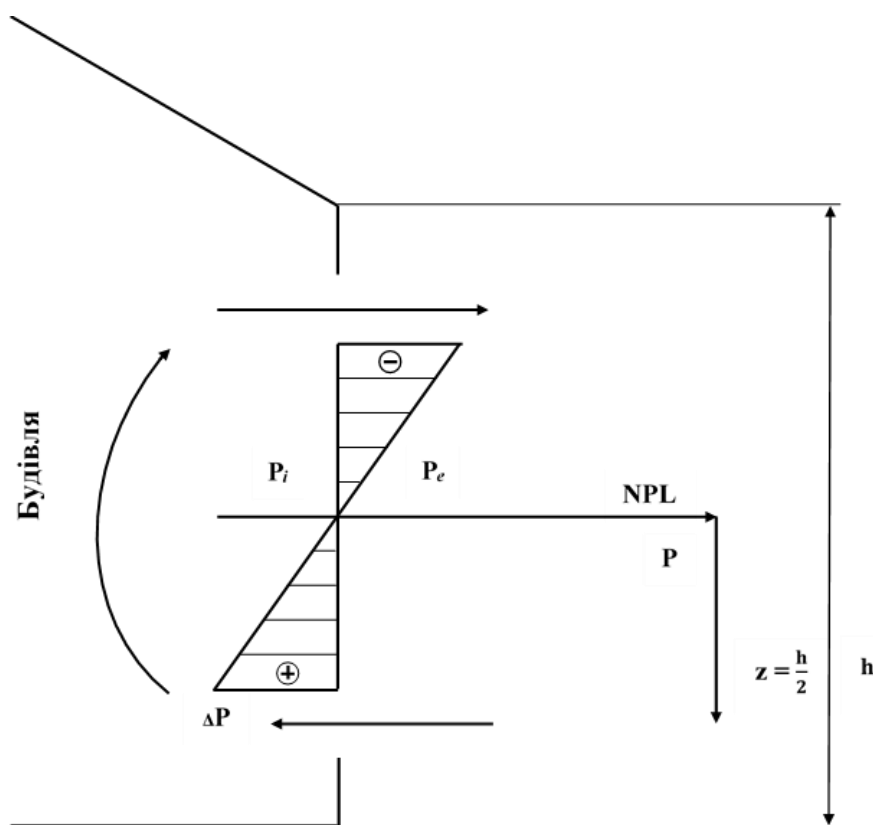


Рисунок 2.5 – Величина різниці тисків від рівня нейтрального тиску

Від рівня нейтральних тисків у бік першого поверху різниця тисків додатна, у бік останнього поверху – від'ємна. Припустивши, що повітря – це ідеальний газ, формула (2.2) набуває вигляду:

$$\Delta P_s = 3456 \cdot z \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right), \quad (2.3)$$

де T_e, T_i – температура зовнішнього та внутрішнього повітря, відповідно, К.

Вітряний тиск створюється, коли потік повітря потрапляє на перешкоду. Величина вітряного тиску залежить від швидкості вітру та форми перешкоди (навітряний, підвітряний бік тощо).

У більшості програмних продуктів для моделювання тиску вітру використовується така рівність [22, 71, 72]:

$$\Delta P_w = \frac{\rho U_{met}^2}{2} C_h C_p(\theta), \quad (2.4)$$

де ΔP_w – вітряний перепад тиску, Па;

ρ – густина навколишнього середовища, кг/м³;

U_{met} – швидкість вітру за даними найближчої метеостанції, м/с;

C_h – коефіцієнт тиску вітру, що враховує поверховість.

$$C_h = \frac{U_H^2}{U_{met}^2} = A_0^2 \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^{2a}, \quad (2.5)$$

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

A_0 – коефіцієнт, що враховує укриття від вітру для певної місцевості (the wind shelter coefficient);

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

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

a – експоненціальний коефіцієнт, що враховує укриття від вітру для даної місцевості.

Сама особливість напрямку вітру врахована коефіцієнтом C_p . Коефіцієнт вітряного тиску для певного кута визначається за формулою [22]:

$$C_p(\theta) = \frac{1}{2} \left\{ [C_p(0^\circ) + C_p(180^\circ)] \cdot (\cos^2(\theta))^{\frac{1}{4}} + [C_p(0^\circ) - C_p(180^\circ)] \cdot (\cos^2(\theta)) \right. \\ \left. + [C_p(90^\circ) + C_p(270^\circ)] \cdot (\sin^2(\theta))^2 + [C_p(90^\circ) - C_p(270^\circ)] \cdot (\sin^2(\theta)) \right\}, \quad (2.6)$$

де $C_p(\theta)$ – коефіцієнт тиску вітру,

θ – величина кута вітру відносно нормалі, градуси.

На рисунку 2.6 зображено визначення величини кута відносно нормалі, в таблиці 2.1 наведені значення вітряних коефіцієнтів для різних орієнтацій залежно від напрямку вітру.

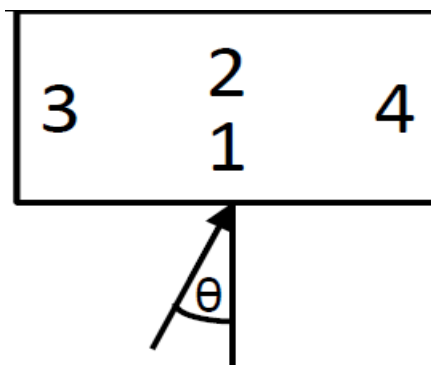


Рисунок 2.6 – Визначення кута θ відносно нормалі
(1, 2, 3, 4 – позначення поверхонь) [22]

Таблиця 2.1 – Розраховані значення коефіцієнту тиску вітру – $C_p(\theta)$ для всіх огорожень [22]

Розташування	Кут набігання вітру на поверхню відносно нормалі (θ)							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Поверхня 1	0,25	0,06	-0,35	-0,6	-0,5	-0,6	-0,35	0,06
Поверхня 2	-0,5	-0,6	-0,35	0,06	0,25	0,06	-0,35	-0,6
Поверхня 3	-0,6	0,2	0,4	0,2	-0,6	-0,6	-0,3	-0,6
Поверхня 4	-0,6	-0,6	-0,3	-0,6	-0,6	0,2	0,4	0,2

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

$$G_{inf} \quad \text{або} \quad G \frac{\Delta P p_{inf}}{R_{\text{пов.прон}} v_{inf}}, \quad (2.7)$$

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

C, p – даний коефіцієнт та показник степені залежить від призначення будівлі [71, 72];

$R_{\text{пов.прон}}$ – опір повітропроникності вікна, $(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па}^{2/3})/\text{кг}$ [74];

F_v – площа вікна, м^2 .

Кратність повітрообміну в приміщенні як характеристика вузла вентиляції у математичних моделях визначається за таким співвідношенням [74]:

$$n = \frac{G_{inf}}{\rho V}, \quad (2.8)$$

Де V – об'єм приміщення, м^3 ;

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

Наведена методика дає змогу враховувати потоки інфільтрації та ексфільтрації повітря з/в зону кімнати (рисунок 2.7), що суттєво впливає на енергетичні характеристики.

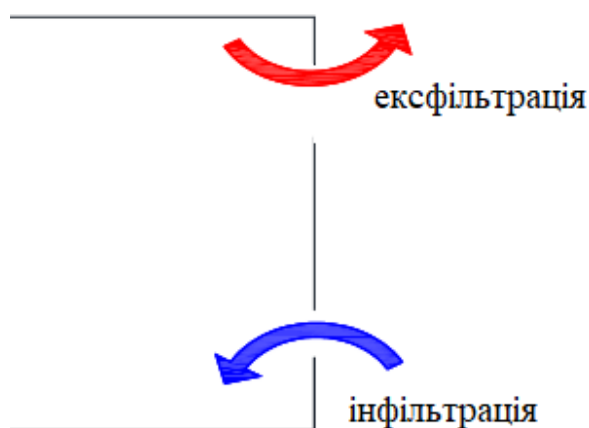


Рисунок 2.7 – Механізм повітрообміну в багатоповерховому будинку [4]

2.3. Динамічне моделювання для дослідження енергоспоживання

Разом з оцінкою реального енергетичного стану будівлі, динамічне моделювання надає можливість дослідити, як змінюються енергетичні показники при модифікації теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, обладнання, а також при оптимізації режимів роботи інженерних систем. З використанням енергетичного моделювання було проведено аналіз різних варіантів інженерних рішень, використовуючи відповідні вихідні дані:

- погодинні кліматичні умови (дані щодо зовнішньої температури, швидкості та напрямку вітру, сонячної радіації);
- погодинні графіки перебування людей;

- погодинні графіки внутрішньої температури повітря;
- погодинні графіки кратності повітрообміну;
- погодинні графіки роботи електричного обладнання та освітлення.

Так як в програмному середовищі EnergyPlus [63] можна моделювати реальні умови роботи традиційних інженерних систем (опалення, охолодження, вентиляції) та використовувати фактичні умови управління системами ОВК, при моделюванні застосовувалися дані, що враховують фактичні особливості функціонування, включаючи інженерні системи, експлуатаційний та температурний режим, динаміку внутрішніх теплонадходжень та рівень повітрообміну. Структура роботи програми наведена на рисунку 2.8.

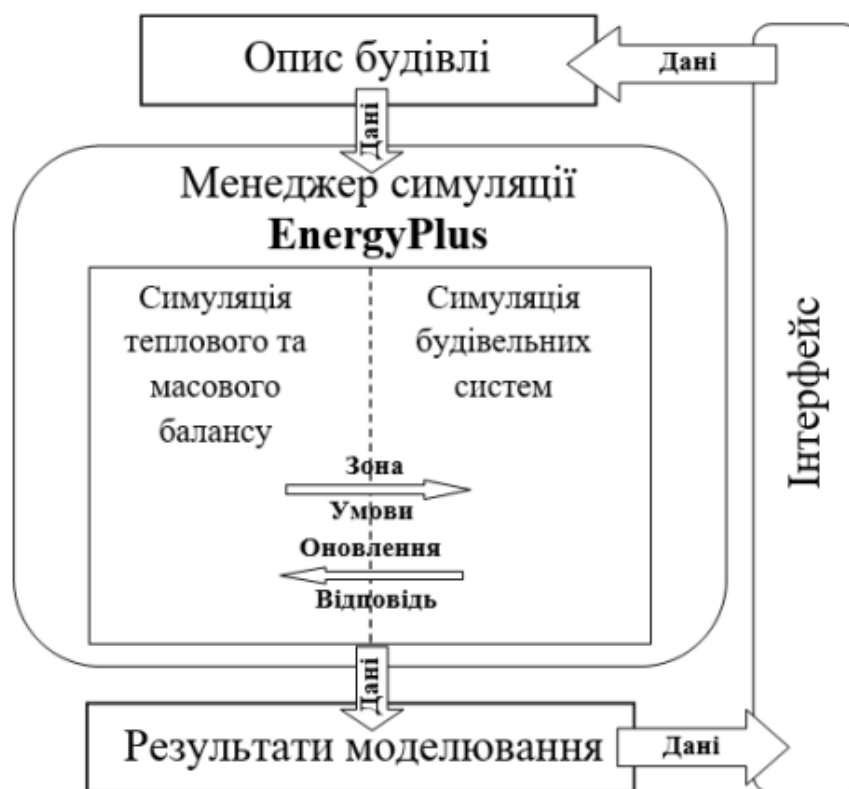


Рисунок 2.8 – Структура роботи програми [9]

Менеджер симуляції EnergyPlus [63] 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 (рисунок 2.8). В якості інтерфейсу для введення і виведення інформації використовувався DesignBuilder [64].

Результати моделювання різних об'єктів представлені для різних часових інтервалів (рік, місяць, доба, година). Для забезпечення високої точності результатів моделювання, деякі частини вихідних даних моделей були детально опрацьовані на основі результатів експериментальних вимірювань.

Фактичний рівень повітрообміну в будівлях досліджений не достатньо, тому при енергетичних розрахунках використовуються показники кратності, рекомендовані в нормативних документах. З метою врахування впливу зміни повітрообміну з часом на енергетичні показники, було проведено експериментальне дослідження кратності за допомогою методу вимірювання концентрації вуглекислого газу.

Отримані погодинні дані щодо кратності повітрообміну були використані як вихідні дані для енергетичного моделювання житлового приміщення. Використання реальних значень повітрообміну дозволило проаналізувати нормативні значення, рекомендовані стандартами, та оцінити вплив динаміки та розподілення повітрообміну між кімнатами на енергетичні показники.

2.4. Визначення природної кратності повітрообміну на базі експериментальних даних

В рамках дослідження проводились експериментальні заміри концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири та навчальної аудиторії з кроком 1 хвилина. План проведення експерименту наведено на рисунку 2.9. Також фіксувались кліматичні данні, а саме: температура в приміщеннях квартири, зовнішня температура, напрямок та сила вітру.



Рисунок 2.9 – План проведення експерименту [4]

2.4.1. Вимірювальні прилади

Для експериментальних вимірювань було використано три типи газоаналізаторів: комплексний прилад реєстратор CO₂ "TR-75Ui" (рисунок 2.10(а)), аналізатор якості повітря "D91" (рисунок 2.10(б)) та детектор-дatalogгер вуглекислого газу з термогігрометром Xintest "HT-501" (рисунок 2.10 (в)).

Комплексний прилад "TR-75Ui" має діапазон вимірювань CO₂: 0–9999 ppm ($\pm 40\text{ppm} \pm 3\%$); температури: 0–55°C; відносної вологості: 10–95%.

Аналізатор якості повітря "D91" обладнаний різними датчиками для одночасної оцінки концентрації вуглекислого газу: 400–4000 ppm ($\pm 70\text{ppm} \pm 3\%$); летких органічних сполук (TVOC: бензол, стирол, феноли, толуол, ксилол і т. д.):

0–2,0 мг/ м³; формальдегіду (НСОН): 0–2,5 мг/ м³; мікрочастинок (пил, дим): 0–6 мг/ м³; температури: 0–55°C; вологості: 0–100 %.



Рисунок 2.10 – Прилади для вимірювання концентрації CO₂ в приміщеннях квартири [4]

- а) комплексний прилад реєстратор CO₂ "TR-75Ui";
- б) аналізатор якості повітря "D91";
- в) детектор-сигналізатор "HT-501"

Детектор-сигналізатор "HT-501" – портативний газоаналізатор CO₂ з вбудованим термогігрометром призначений для контролю параметрів мікроклімату в приміщенні. Вбудований реєстратор–дatalogгер дозволяє передавати дані на ноутбук: зберігати числовий ряд і будувати графіки. Діапазон вимірювання вуглекислого газу приладом "HT-501" становить: 0–9999 ppm ($\pm 40\text{ppm} \pm 3\%$); температури: (-10)–(+70°C) ($\pm 0,3$ °C (від 10 до 50 °C), $\pm 1,2$ °C (інший діапазон)); вологості: 0,1–99,9 % ($\pm 3\%$).

У рамках проведеного дослідження було виконано перевірку рівномірності розподілу концентрації вуглекислого газу в різних місцях кожного з досліджуваних приміщень. Для цього, в кожному приміщенні було встановлено п'ять приладів для вимірювання рівня вуглекислого газу. Ці прилади були розташовані на висоті 1-

1,5 м від рівня підлоги та в різних частинах приміщення, що дозволило отримати більш детальну картину розподілу CO_2 .

Аналіз показників, отриманих від усіх п'яти приладів, показав, що відмінність між ними знаходиться в межах похибки. Це свідчить про те, що розподіл вуглекислого газу в приміщенні є рівномірним. Таким чином, для моніторингу рівня вуглекислого газу достатньо використовувати лише один прилад в кожному приміщенні на однаковій висоті. Це значно спрощує процес моніторингу та знижує витрати на обладнання.

Під час серій експериментальних досліджень було проведено одночасне вимірювання концентрації вуглекислого газу та температури (як внутрішньої, так і зовнішньої) в приміщеннях житлової кімнати, коридору квартири, кухні та у вентиляційному каналі, що виходить на кухню з кроком 1 хв. Також фіксувались значення зміни фонових (зовнішнього) рівня CO_2 та на коридорі будинку. Під час досліджень прилади розміщували на висоті – 1 м.

Такий підхід дозволяє враховувати переміщення повітряних мас між приміщеннями. Отримані дані використовувались для розрахунку кратності повітрообміну та аналізу якості повітря в приміщеннях.

Тарування приладів

В дослідницький об'ємом $0,3 \text{ м}^3$ (кубічної форми) з невеликою щілиною було поміщено вимірювальні прилади. Було проведено штучне підвищення рівня вуглекислого газу шляхом спалювання сухого спирту в розглянутому об'ємі, а далі протягом години фіксувався спад рівня CO_2 в дослідницькому об'ємі (рисунок 2.11). Враховуючи меншу інерційність приладу "НТ-501" відповідно до паспортних даних і результатів експерименту, його було обраний як еталонний.

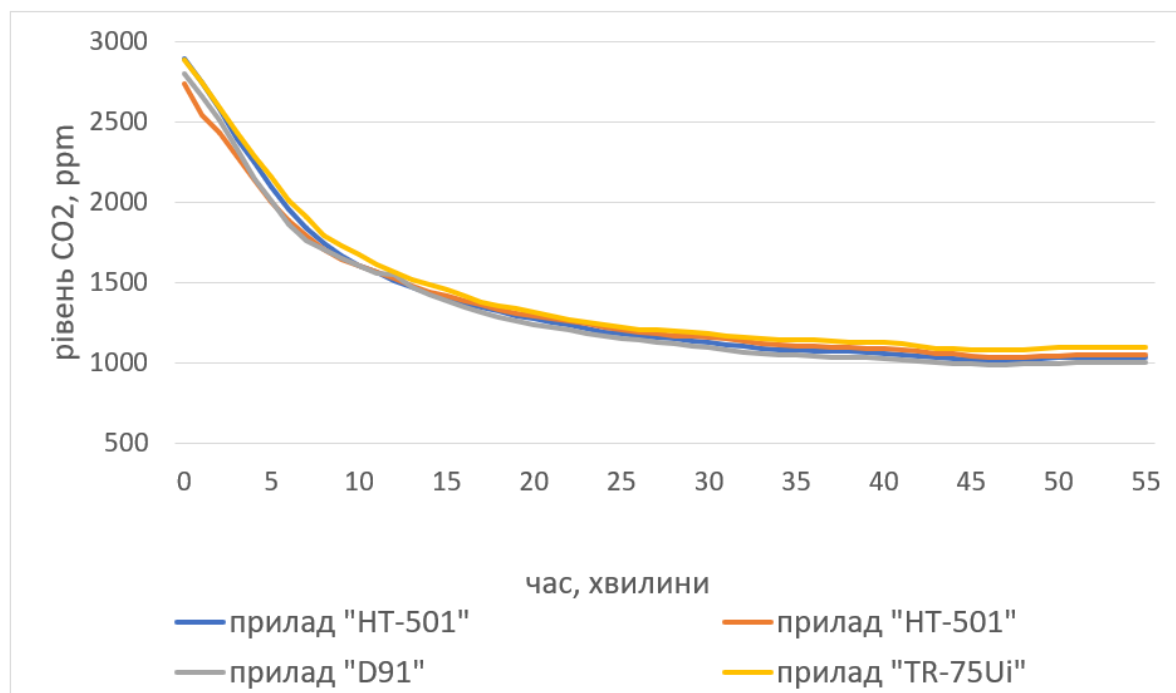
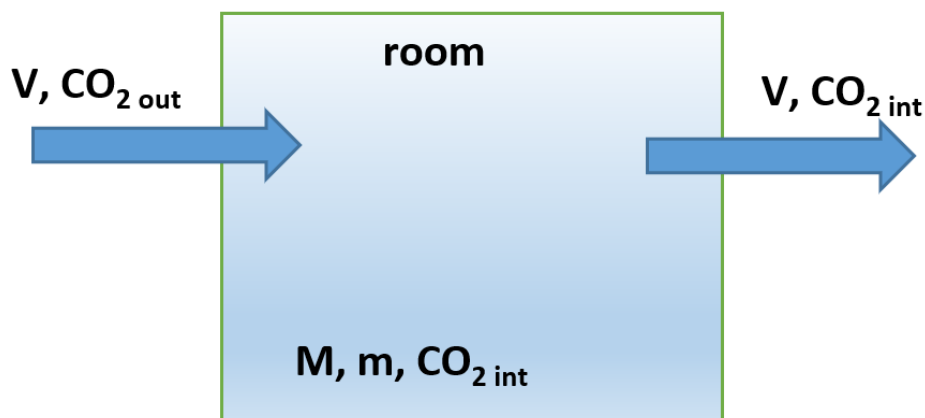


Рисунок 2.11 – Тарування приладів [4]

Максимальне відхилення під час тарування приладів становить 56 ppm, мінімальне – 36 ppm, середнє – 47 ppm. Дана розбіжність між приладами може вносити похибку, яка не перевищує 3%.

2.4.2. Методика розрахунку природної кратності повітрообміну на основі експериментальних вимірювань рівня CO₂ в приміщеннях

Визначення концентрації вуглекислого газу було проведено на основі масового балансу, схематичне зображення якого наведено на рисунку 2.12. Цей процес було проведено в репрезентативних приміщеннях в залежності від ряду параметрів, таких як: природний повітрообмін; фонові концентрація CO₂ (зовнішня концентрація CO₂); початкова концентрація CO₂ в приміщенні; наявність людей; геометричні розміри приміщення [6, 7].



V_k – об’єм кімнати, м^3 ; V – повітрообмін, $\text{м}^3/\text{год}$; m – виділення CO_2 в приміщенні, $\text{г}/\text{год}$; M – маса CO_2 в приміщенні, г ; M_0 – початкова маса CO_2 в приміщенні, г ; CO_{2e} , CO_{2i} , CO_{2i0} – в припливному повітрі, у кімнаті в заданий момент часу та початкова, відповідно $\text{г}/\text{м}^3$

Рисунок 2.12 – Схематичнеображення повітрообміну в кімнаті [7]

Загальне виведення рівнянь наведено нижче [7]:

$$\text{CO}_{2i} = \frac{M}{V_k}. \quad (2.9)$$

Зміна кількості CO_2 у часі:

$$\frac{dM}{d\tau} = m + V \cdot \text{CO}_{2e} - \frac{V}{V_k} M, \quad (2.10)$$

$$M_j = M_{j-1} + \overline{m}_j \Delta \tau_j + \overline{V}_j \cdot \overline{\text{CO}_{2e,j}} \Delta \tau_j - \frac{\overline{V}_j}{V_k} \cdot \frac{M_{j-1} + M_j}{2} \Delta \tau_j. \quad (2.11)$$

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

Через n інтервалів часу $\Delta \tau_j$ формула (2.11) набуває вигляду:

$$j = 1 \dots n, \quad M_n = M_0 + \sum_{j=1}^n m_j \Delta \tau_j + \sum_{j=1}^n V_j \cdot \text{CO}_{2e,j} \Delta \tau_j - \sum_{j=1}^n \frac{V}{V_k} \cdot M_j. \quad (2.12)$$

Рівняння (2.12) може бути використаним при визначенні маси CO_2 в внутрішньому повітрі через значення C_e , V та m для кожного інтервалу часу $\Delta \tau_j$.

Інтегрування рівняння (2.10) при сталих значеннях C_e , V та m дає вираз для маси CO_2 в внутрішньому повітрі в будь-який момент часу τ :

$$M = \frac{V_k}{V} \left\{ m + V \cdot \text{CO}_{2e} + \left[\frac{V}{V_k} \cdot M_0 - (m + V \cdot \text{CO}_{2e}) \right] \cdot e^{-\frac{V}{V_k} \tau} \right\}. \quad (2.13)$$

З формули (2.13) слідує, що внутрішня концентрація CO_2 при сталих значеннях C_e , V та t визначається:

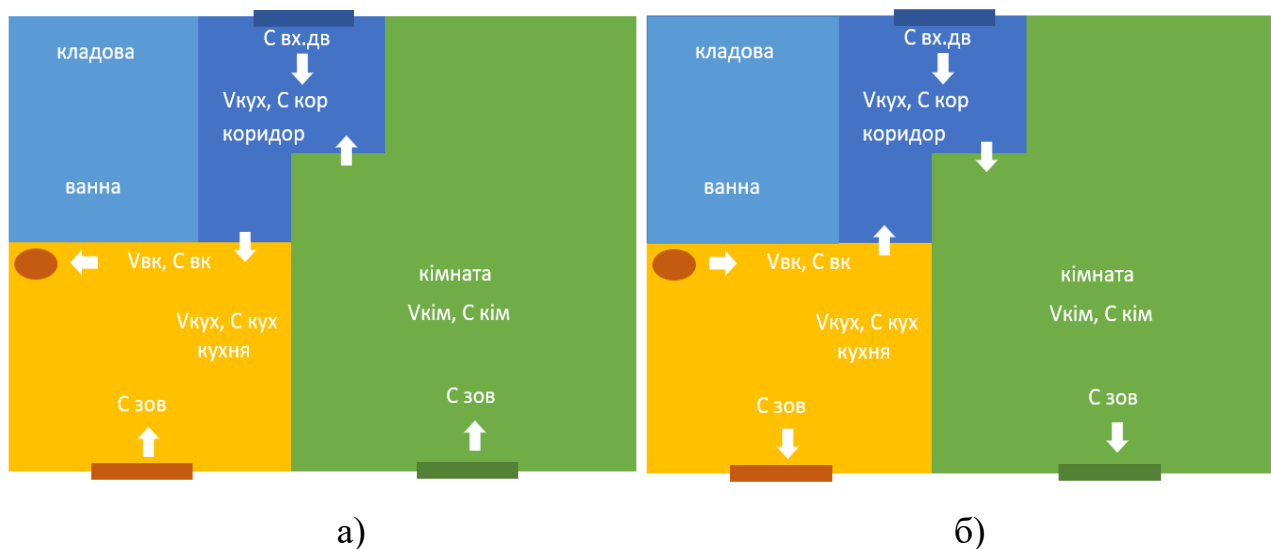
$$CO_{2i} = \frac{m}{V} + CO_{2e} + \left[CO_{2i0} - \left(\frac{m}{V} + CO_{2e} \right) \right] \cdot e^{-\frac{V}{V_k} \tau}. \quad (2.14)$$

Для граничних випадків формула (2.14) набуває вигляду:

$$\text{якщо } t \rightarrow 0, CO_{2i} = CO_{2e} \left(1 - e^{-\frac{V}{V_k} \tau} \right) + CO_{2i0} \cdot e^{-\frac{V}{V_k} \tau}, \quad (2.15)$$

$$\text{якщо } t \rightarrow 0 \text{ і } CO_{2i} \gg CO_{2e}, CO_{2i} = CO_{2i0} \cdot e^{-\frac{V}{V_k} \tau}. \quad (2.16)$$

В результаті проведених досліджень були визначені два напрями повітрообміну в квартирі. В першому випадку повітря надходило через вікна і входні двері квартири і викидалось через вентиляційний канал (рисунок 2.13(а)). В другому випадку припливне повітря надходило з вентиляції і через входні двері, а виходило через вікна на кухні і в кімнаті (рисунок 2.13 (б)).



$V_{\text{кім}}, V_{\text{кор}}, V_{\text{кух}}, V_{\text{вк}}$ – об'єм приміщень кімнати, коридору, кухні і вентканалу відповідно, м^3 ; $C_{\text{кім}}, C_{\text{кор}}, C_{\text{кух}}, C_{\text{вк}}, C_{\text{зов}}, C_{\text{вх.дв}}$ – концентрація CO_2 в приміщеннях кімнати, коридору, кухні, вентканалу, фонові та на коридорі будинку відповідно;

Рисунок 2.13 – Механізми повітрообміну в квартирі [4]

а) припливне повітря надходить через вікна і входні двері

б) припливне повітря надходить через вентиляційний канал і входні двері

Нижче, як приклад, наведена система рівнянь для розрахунку внутрішньої концентрації CO_2 при сталих значеннях фонові концентрації вуглекислого газу зовні квартири, на вулиці та в коридорі будинку (місцях загального користування) для випадку, за якого припливне повітря надходило шляхом інфільтрації (система рівнянь 2.17) та ексфільтрації (система рівнянь 2.18):

$$\begin{cases} CO_{2 \text{ кім}} = CO_{2 \text{ кім } 0} + \frac{V_{\text{пр.кім}}}{V_{\text{кім}}} \int (CO_{2 \text{ зов}} - CO_{2 \text{ кім } i})_{\tau} d\tau \\ CO_{2 \text{ кор}} = CO_{2 \text{ кор } 0} + \frac{V_{\text{пр.кім}}}{V_{\text{кор}}} \int (CO_{2 \text{ кім } i} - CO_{2 \text{ кор } i})_{\tau} d\tau + \frac{V_{\text{пр.буд}}}{V_{\text{кор}}} \int (CO_{2 \text{ буд}} - CO_{2 \text{ кор } i})_{\tau} d\tau \\ CO_{2 \text{ кух}} = CO_{2 \text{ кух } 0} + \frac{V_{\text{пр.кор}}}{V_{\text{кух}}} \int (CO_{2 \text{ кор } i} - CO_{2 \text{ кух } i})_{\tau} d\tau + \frac{V_{\text{пр.кух}}}{V_{\text{кух}}} \int (CO_{2 \text{ зов}} - CO_{2 \text{ кух } i})_{\tau} d\tau \\ V_{\text{пр.кор}} = V_{\text{пр.кім}} + V_{\text{пр.буд}} \end{cases}, (2.17)$$

$$\begin{cases} CO_{2 \text{ кім}} = CO_{2 \text{ кім } 0} + \frac{V_{\text{пр.кор}}}{V_{\text{кім}}} \int (CO_{2 \text{ пр.кор}} - CO_{2 \text{ кім } i})_{\tau} d\tau \\ CO_{2 \text{ кор}} = CO_{2 \text{ кор } 0} + \frac{V_{\text{пр.кух}}}{V_{\text{кор}}} \int (CO_{2 \text{ кух } i} - CO_{2 \text{ кор } i})_{\tau} d\tau + \frac{V_{\text{пр.буд}}}{V_{\text{кор}}} \int (CO_{2 \text{ буд}} - CO_{2 \text{ кор } i})_{\tau} d\tau \\ CO_{2 \text{ кух}} = CO_{2 \text{ кух } 0} + \frac{V_{\text{пр.в.к}}}{V_{\text{кух}}} \int (CO_{2 \text{ в.к } i} - CO_{2 \text{ кух } i})_{\tau} d\tau + \frac{V_{\text{пр.кух}}}{V_{\text{кух}}} \int (CO_{2 \text{ зов}} - CO_{2 \text{ кух } i})_{\tau} d\tau \\ V_{\text{пр.кор}} = V_{\text{пр.кух}} + V_{\text{пр.буд}} \end{cases}, (2.18)$$

де вхідні параметри: $CO_{2 \text{ кім } 0}, CO_{2 \text{ кор } 0}, CO_{2 \text{ кух } 0}$ – концентрація CO_2 початкова в приміщеннях кімнати, коридору, кухні та у вентканалі відповідно, $г/м^3$; $CO_{2 \text{ кім } i}, CO_{2 \text{ кор } i}, CO_{2 \text{ кух } i}, CO_{2 \text{ в.к } i}$ – концентрація CO_2 в поточний момент часу в приміщеннях кімнати, коридору та кухні відповідно, $г/м^3$;

$V_{\text{кім}}, V_{\text{кор}}, V_{\text{кух}}$ – об'єм приміщень кімнати, коридору і кухні відповідно, $м^3$; $CO_{2 \text{ кім}}, CO_{2 \text{ кор}}, CO_{2 \text{ кух}}, CO_{2 \text{ вк}}, CO_{2 \text{ зов}}, CO_{2 \text{ буд}}$ – концентрація CO_2 в приміщеннях кімнати, коридору, кухні, вентканалу, фонові та на коридорі будинку відповідно, $г/м^3$.

Визначалися: $V_{\text{пр.кім}}, V_{\text{пр.кор}}, V_{\text{пр.кух}}, V_{\text{пр.буд}}, V_{\text{пр.в.к}}$ – об'єм припливного свіжого повітря до кімнати, коридору, кухні, з вентканалу та коридору будинку відповідно, $м^3/год$;

Система рівнянь була розв'язана з використанням програмного продукту Mathcad з врахуванням динаміки вхідних параметрів у часі.

Кратність повітрообміну визначається як співвідношення повітряного потоку ззовні в кімнату та об'єму відповідного замкнутого простору за формулою:

$$n = \frac{V_{\text{пр.і}}}{V_i}, \quad (2.19)$$

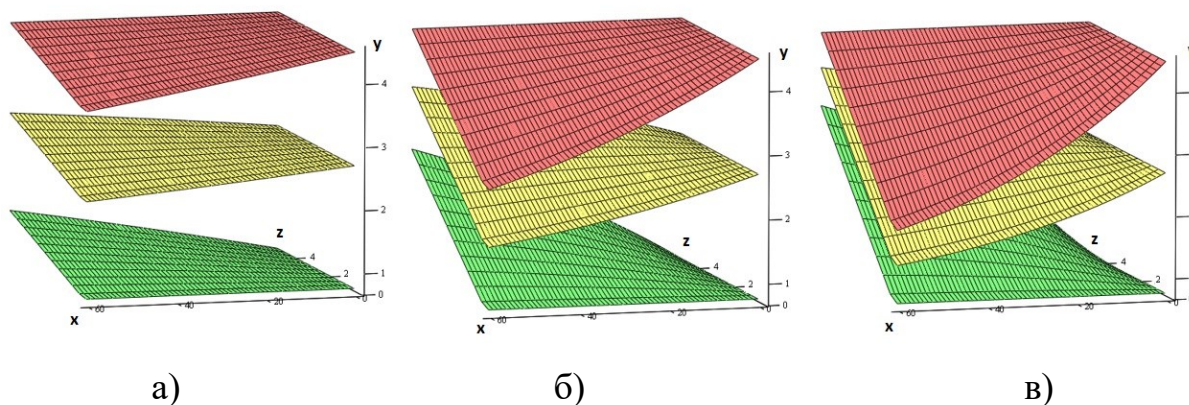
де $V_{\text{пр.і}}$ – об'єм припливного свіжого повітря до приміщення, м³/год;

V_i – об'єм приміщення.

2.5.Параметричний аналіз впливових складових на рівень повітрообміну

В рамках дослідження було проаналізовано зміну концентрації CO₂ в приміщенні в залежності від зміни концентрації CO₂ у припливному повітрі, об'єму припливного повітря та виділень від людей.

Репрезентативним приміщенням для аналізу впливових факторів було обрано приміщення житлової кімнати. На рисунку 2.14 представлені результати розрахунків концентрації вуглекислого газу в залежності від концентрації CO₂ в припливному повітрі, в яких параметр – початкова концентрація в кімнаті, змінювався від 420 ppm до 2500 ppm (4,50 г/м³). Для демонстрації розрахунків було обрано три випадки, коли стартова концентрація CO₂ в припливному повітрі була на рівні фоновій – 420 ppm (0,76 г/м³), 1300 ppm (2,34 г/м³), 2500 ppm (4,50 г/м³). Об'єм припливного повітря на рисунку 2.14(а) – 10 м³/год, кратність повітрообміну в кімнаті в даному випадку становить 0,23 год⁻¹, на рисунку 2.14(б) – об'єм припливного повітря 30 м³/год (кратність повітрообміну 0,69 год⁻¹), на рисунку 2.14(в) – об'єм припливного повітря 50 м³/год (кратність повітрообміну 1,15 год⁻¹). Складова надходжень від людей відсутня.



вісь x – час, хвилини; вісь y – концентрація CO₂ в повітрі кімнати, г/м³;

вісь z – концентрація CO₂ в припливному повітрі, г/м³;

- початкова концентрація CO₂ в повітрі кімнати 420 ppm;
- початкова концентрація CO₂ в повітрі кімнати 1300 ppm;
- початкова концентрація CO₂ в повітрі кімнати 2500 ppm

Рисунок 2.14 – Зміна концентрації вуглекислого газу в залежності від концентрації CO₂ в припливному повітрі для умов а) об'єм припливного повітря 10 м³/год; б) об'єм припливного повітря 30 м³/год; в) об'єм припливного повітря 50 м³/год [6]

З аналізу даних, отриманих в результаті розрахунків, які ілюстровані на рисунку 2.14, випливає, що швидкість зміни концентрації діоксиду вуглецю в приміщенні зростає пропорційно збільшенню об'єму припливного повітря. Це означає, що чим більше повітря надходить до приміщення, тим швидше змінюється концентрація CO₂. Також на діапазон зміни концентрації CO₂ впливає різниця між початковою концентрацією CO₂ в приміщенні та концентрацією CO₂ в припливному повітрі.

На рисунку 2.15 наведено зміну концентрації CO₂ в приміщенні житлової кімнати в залежності від об'єму припливного повітря що надходить до приміщення за умов динамічної зміни концентрації CO₂ в припливному повітрі. Для випадків I – концентрація CO₂ в припливному повітрі змінювався від 2500 ppm (4,50 г/м³) до 1700 ppm (3,06 г/м³), для випадків II – навпаки зростала від 1700 ppm до 2500 ppm.

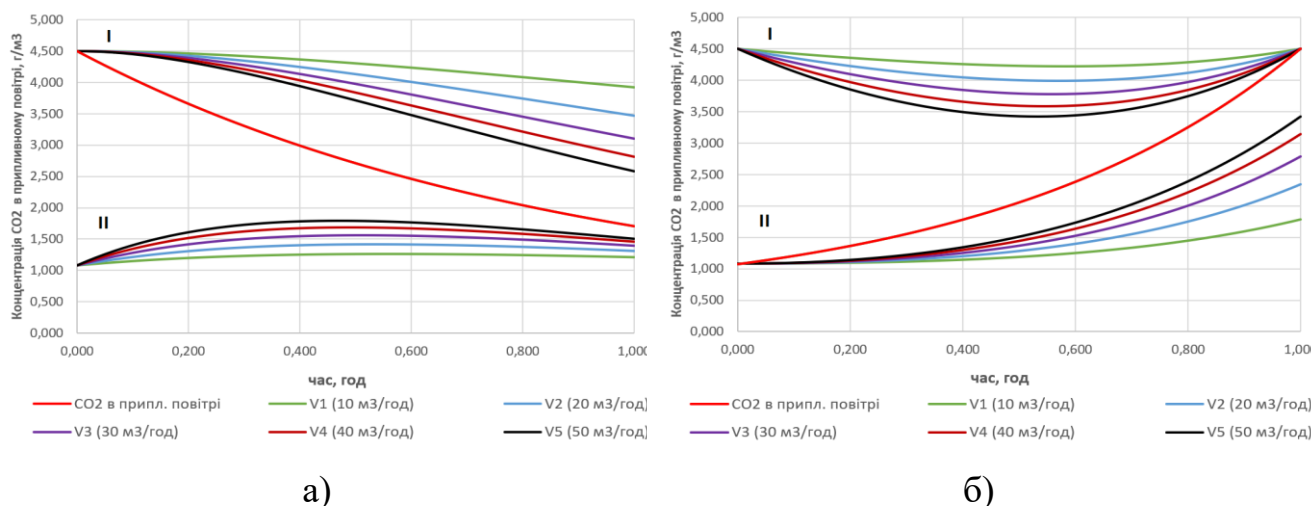


Рисунок 2.15 – Зміна концентрації вуглекислого газу в часі за умов динамічної зміни концентрації CO₂ в припливному повітрі при зменшенні концентрації CO₂ в припливному повітрі (а) та збільшенні концентрації CO₂ в припливному повітрі (б) [6]

Для умов, коли стартова концентрація CO₂ в припливному повітрі становить 4,50 г/м³ і значно більша за стартову концентрацію CO₂ в приміщенні 1,08 г/м³ (рисунок 2.15(а) (випадки II)), рівень CO₂ в приміщенні спочатку зростає, але через деякий час досягнув свого піку і також почав зменшуватись. Для умов наведених на рисунок 2.15(а) (випадки I) рівень CO₂ в кімнаті зменшуватиметься, адже в приміщення надходитиме повітря з меншою концентрацією. Зворотні випадки, коли концентрація CO₂ в припливному повітрі динамічно зростає, і відповідно зростає рівень CO₂ в приміщенні зображені на рисунку 2.15(б).

Найбільш впливовим фактором на якість повітря є наявність присутніх в приміщенні і їх характеристики. Люди є найбільшим джерелом надходжень CO₂ в кімнату. Щоб проаналізувати взаємозв'язок між концентрацією CO₂ та швидкістю повітрообміну, необхідно розрахувати швидкість утворення CO₂ від дихання людини. Довідник з основ ASHRAE [73] та стандарт ASTM D6245–18 [75] описують оцінку рівня викидів CO₂ наступним чином. Відповідно до довідника ASHRAE емпірична формула для розрахунку коефіцієнта утворення CO₂ (л/с) може бути виражена таким чином:

$$V_{\text{CO}_2} = RQ \cdot \frac{0,0055887W^{0,425}H^{0,725}M}{0,23RQ + 0,77}, \quad (2.20)$$

де RQ – являє собою дихальний коефіцієнт, об'ємне співвідношення утвореного CO_2 до спожитого кисню (O_2), безрозмірний (дихальний коефіцієнт дорівнює 0,83 для легких або сидячих видів діяльності ($M < 1,5 \text{ met}$, $1 \text{ met} = 58,1 \text{ Вт/м}^2$));

W – маса тіла, (кг);

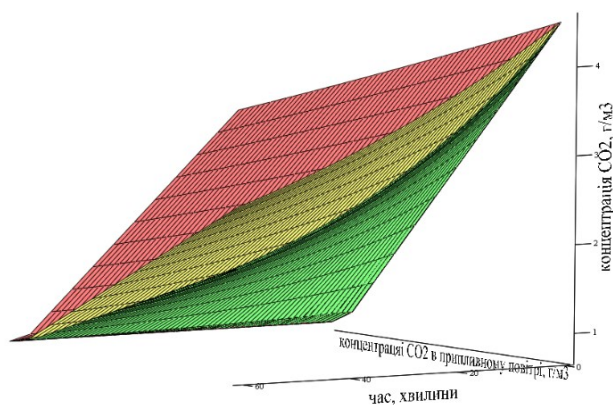
H – висота тіла (м);

M – швидкість метаболізму (met), залежно від рівня фізичного навантаження.

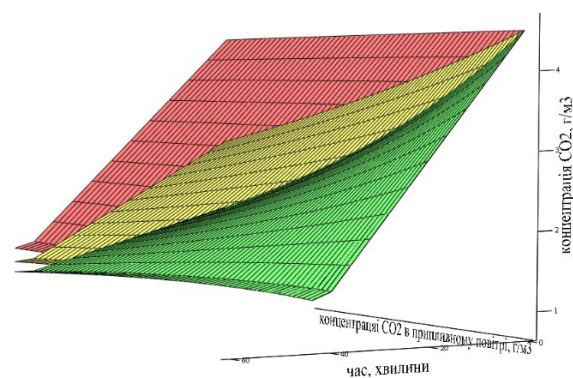
Наприклад, для дорослої людини середнього зросту ($H = 1,8 \text{ м}$), вагою $W = 85 \text{ кг}$, яка займається сидячою роботою при $M = 1,2 \text{ met}$, відповідна швидкість утворення CO_2 становить 0,006 л/с, що в перерахунку становить 42,57 г/год. Саме такі параметри середньостатистичної людини використовувались в розрахунках для даного дослідження. В роботі [76], на основі річних спостережень, досліджено поведінку мешканців як ключового фактору який впливає на кратність повітрообміну.

Отже, присутність людей в приміщеннях має найбільший вплив на зміну концентрації CO_2 в приміщенні, що відображено на рисунку 2.16.

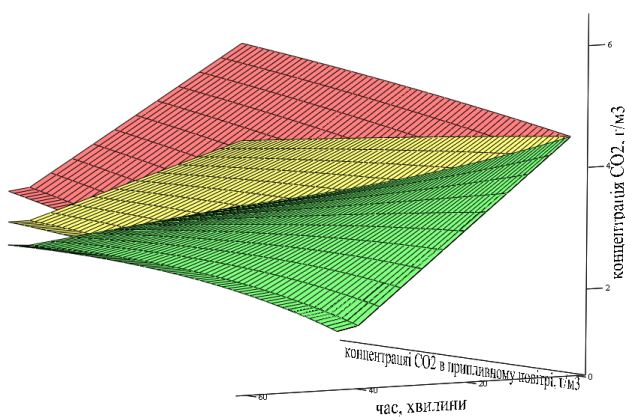
Відповідно, зі збільшенням присутніх в приміщенні необхідний більший об'єм припливного повітря задля забезпечення відповідних умов мікроклімату. Для цієї серії розрахунків було виділено діапазон 2500–420 ppm стартової концентрації CO_2 , значення в зовнішньому припливному повітрі приймалось сталим на рівні 420 ppm, об'єм припливного повітря 10 м³ (червона площа), 30 м³ (жовта площа), 50 м³ (зелена площа).



а)



б)



в)

вісь x – час, хвилини; вісь y – концентрація CO_2 в повітрі кімнати, г/м^3 ;

вісь z – концентрація CO_2 в припливному повітрі, г/м^3 ;

– об'єм припливного повітря $50 \text{ м}^3/\text{год}$;

– об'єм припливного повітря $30 \text{ м}^3/\text{год}$;

– об'єм припливного повітря $10 \text{ м}^3/\text{год}$

Рисунок 2.16 – Динамічна зміна концентрації вуглекислого газу в приміщенні житлової кімнати за відсутності (а), присутності 1 людини (б) та присутності 3 людей (в) [6]

Відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 [29] та ДСТУ Б EN 15251:2011 [27], рекомендований рівень вуглекислого газу в приміщеннях існуючих будівель не повинен перевищувати 800 ppm вище зовнішньої, тобто типове значення 1200 ppm.

Для кімнати площею 17,4 м² в якій 3 дорослі людини займаються сидячою роботою, необхідно забезпечувати кратність повітрообміну на рівні 2,01 год⁻¹ щоб рівень CO₂ в повітрі не перевищував максимально допустимий рівень.

Висновки до розділу 2

1. Об'єктом дослідження обрано репрезентативні будівлі громадського та житлового призначення масової забудови ХХ століття. Наведено загальну схему дослідження з використання емпіричних та експериментальних методів визначення природної кратності повітрообміну.

2. Наведено емпіричну методику визначення кратності повітрообміну. Згідно розробленої методики, природня складова кратності повітрообміну створюється внаслідок ефект плавучості, що створюється різницею густин між теплим і холодним повітрям та вітровим ефектом. Цінність даної методики полягає у можливості її застосування для динамічних розрахунків з використанням погодинних кліматичних даних з міжнародних баз даних, наприклад IWEC. Що робить можливим використання отриманих результатів при моделюванні на основі програмних продуктів. В нормативних кліматологічних даних, що діють в Україні, наведені лише середньомісячні показники.

3. Описано доцільність використання програмного забезпечення EnergyPlus [63] для динамічного енергетичного моделювання, оскільки воно дозволяє врахувати такі фактори, як теплотехнічні характеристики огорожуючих конструкцій, режими експлуатації та зміну параметрів мікроклімату приміщень.

4. Описано методику визначення природної кратності повітрообміну на базі експериментальних вимірювань рівня CO₂ в приміщеннях. В ході проведених досліджень було виявлено два шляхи повітрообміну в квартирі. Перший включає надходження повітря через вікна та вхідні двері квартири, а виведення – через

вентиляційний канал, що є механізмом інфільтрації. Другий шлях передбачає надходження припливного повітря через вентиляційний канал та входні двері, а виведення – через вікна в кухні та кімнаті, що є механізмом ексфільтрації.

5. В результаті досліджень встановлено, що найбільший впливовим параметром зміни концентрації CO_2 в приміщенні є виділення від дихання людей. На основі експериментальних та розрахункових даних було встановлено, що для типової малогабаритної квартири в літній період фактична кратність повітрообміну в цілому перевищує нормативні значення. З результатів імітаційного моделювання слідує, що для забезпечення нормативного рівня концентрації CO_2 не вище 1200 ppm необхідно дотримуватись повітрообміну в розглянутому приміщенні не нижче рівня $2,01 \text{ год}^{-1}$ для умов, коли в кімнаті постійно перебуває 3 людини. Тобто масовий баланс CO_2 , з врахуванням кількості мешканців, може бути привабливим альтернативним методом прогнозування інтенсивності вентиляції будівлі.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ФАКТИЧНОГО ПРИРОДНОГО РІВНЯ ПОВІТРООБМІНУ БУДІВЕЛЬ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Проведення аналізу фактичного природного рівня повітрообміну в будівлях різного призначення є складним процесом, який охоплює ряд ключових аспектів. Починаючи з вимірювань та оцінки кратності повітрообміну для різних приміщень, при аналізі необхідно враховувати призначення будівлі та специфіку діяльності в ній. Також на ефективність повітрообміну впливають кліматичні умови, такі як температура, швидкість та напрямок вітру. Важливою частиною аналізу є оцінка ефективності систем вентиляції відповідно до вимог мікроклімату в приміщеннях.

3.1. Аналіз результатів імітаційного дослідження кратності повітрообміну

За емпіричною методикою визначення повітрообміну на основі вдосконаленої методики ASHRAE, наведеною в розділі 2.2, для навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського №22 було визначено зміну різниці тисків від стек ефекту, тиску вітру та загальну різницю тисків в залежності від зміни таких параметрів як температура, напрямок вітру та швидкість вітру[3].

Погодинні кліматичні дані репрезентативних днів, що були необхідні для розрахунку взяті з кліматичного IWEC файлу типового року для міста Києва.

Було розглянуто групу репрезентативних кімнат будівлі південної та північної орієнтації для теплофізичних властивостей огорожень, характерних для масової забудови. Згідно розрахунків в середньому природна величина кратності повітрообміну становить біля $0,65 \text{ год}^{-1}$ для дерев'яних вікон з подвійним застеленням. Опір повітропроникності для таких вікон на рівні $0,5 \text{ (м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па}^{2/3})/\text{кг}$ [3]. Величина природної кратності повітрообміну фактично може бути більша для старих вікон з дерев'яними рамами, які збільшили повітропроникливість в процесі експлуатації.

Під час розрахунків було враховано, що у будівлі підтримується постійна температура повітря в приміщеннях 18°C .

Так як примусової вентиляції в об'єкті досліджень немає, загальний тиск визначався як сума різниці тисків від ефекту стека та різниці тиску від вітряного ефекту.

Погодинні результати визначеної кратності повітрообміну представлені на рисунку 3.1 для репрезентативних приміщень на 1, 4 та 7 поверхах будівлі північної та південної орієнтацій.

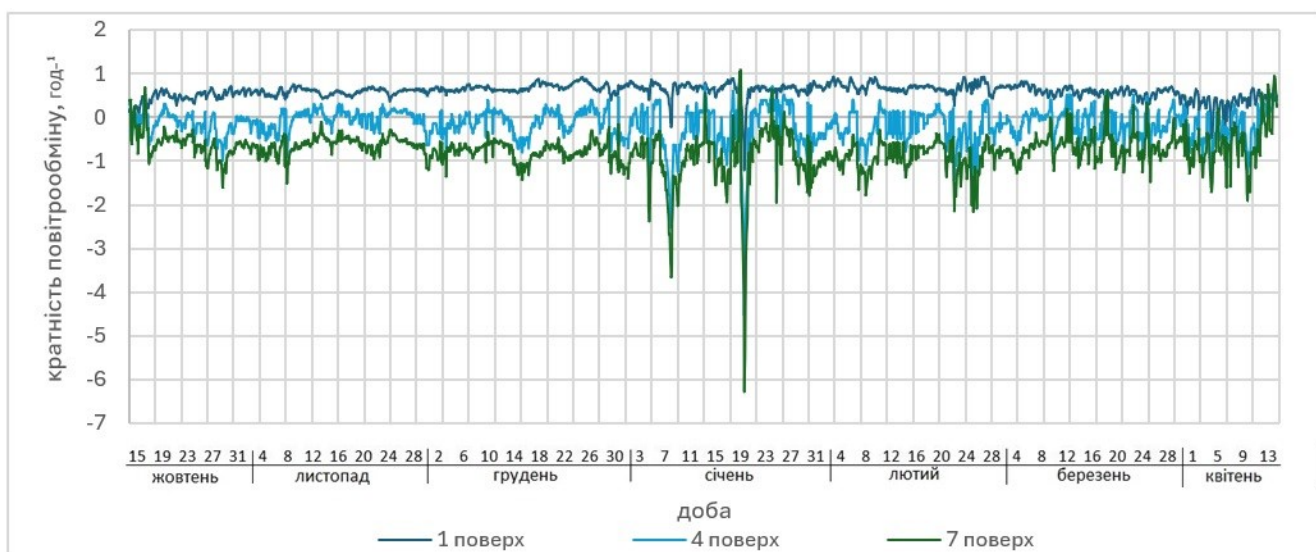
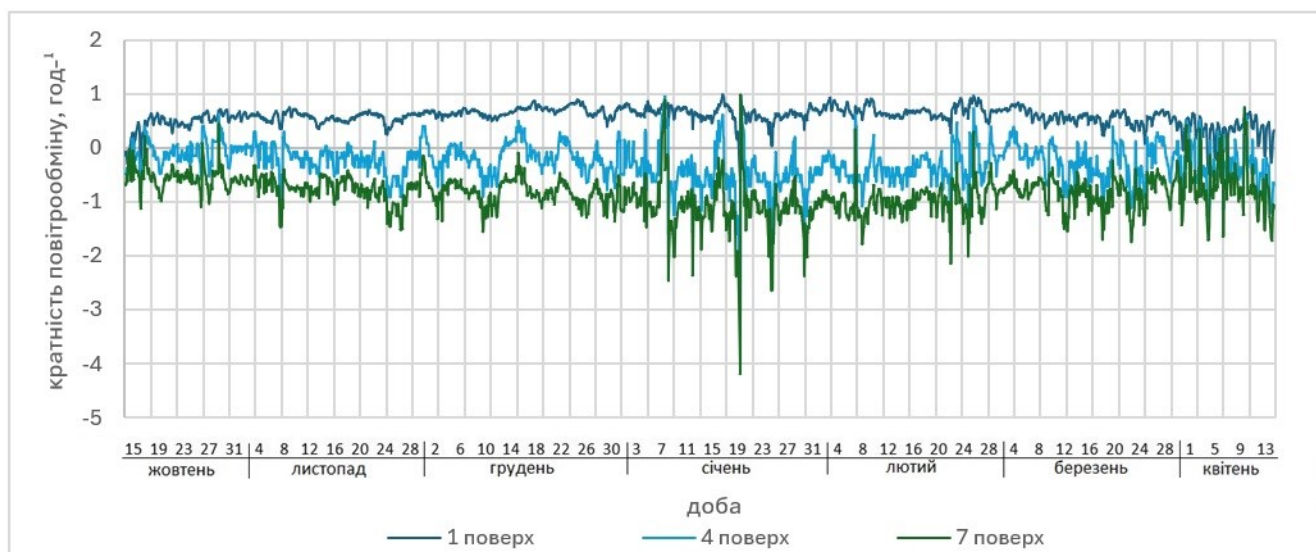


Рисунок 3.1 – Зміна кратності повітрообміну по місяцям за опалювальний період для північної (а) та південної (б) орієнтацій

Для розглянутого типу віконних конструкцій значення природної кратності повітрообміну знаходяться в діапазоні від 0,58 до -0,85 год⁻¹ – для південної орієнтації та від 0,59 до -0,76 год⁻¹ – для північної орієнтації. Найбільший діапазон коливань цієї величини спостерігається для місяця січня.

На першому поверсі спостерігається явище інфільтрації (приплив свіжого повітря природним чином через нещільності у віконних конструкціях), на середньому четвертому поверсі по всіх місяцях кратність середньому близька до нуля, що пов'язано зі NPL будівлі (стек ефект), на сьомому поверсі спостерігається ексфільтрація, що пояснює від'ємні значення кратності повітрообміну. Тобто на першому поверсі відбувається підсмоктування повітря, а на сьомому його викидання.

З графіків видно, що величина кратності повітрообміну має змінний характер, це пов'язано з динамічною зміною температури навколишнього середовища, швидкості на напрямку вітру. Наприклад, 21 січня кратність повітрообміну в приміщеннях 7 поверху з північної сторони становила – 6,2 год⁻¹, така величина зумовлена середньою швидкістю вітру за день 10,3 м/с та західним напрямком вітру. А відносно стабільна кратність повітрообміну в листопаді місяці в приміщеннях 1 та 7 поверхів з північної сторони становила в середньому 0,6 год⁻¹, що зумовлено незначними коливаннями температури та швидкості вітру протягом місяця, а також переважаючими східним та західним напрямками вітру.

Досліджувалась зміна кратності повітрообміну для різного опору повітропроникності світлопрозорих огорожень. З розрахунків випливає, що вікна з покращеними теплофізичними характеристиками менш чутливі до коливань параметрів зовнішнього середовища. Загалом діапазон зміни природної кратності повітрообміну 0–0,25 год⁻¹ для двокамерних склопакетів з ПВХ профілем, 0–0,5 год⁻¹ – для вікон з потрійним заскленням у дерев'яних плетіннях, 0–0,85 год⁻¹ – для подвійного засклення.

Також було проведено розрахунок річної енергопотребі репрезентативних кімнат різних орієнтацій, розташованих на різних поверхах будівлі [3, 4]. Базовий

рівень енергопотреби було визначено на основі розрахунків для нормативної кратності повітрообміну – 1 год^{-1} .

Було виявлено значну різницю між базовим рівнем енергопотреби при постійній нормативній кратності повітрообміну ($n=\text{const}$) та розрахунковими даними при змінній кратності повітрообміну ($n=\text{var}$). Наприклад, енергопотреба кімнати з південною орієнтацією на першому поверсі була на 62,2% менша від базового рівня, на третьому поверсі - на 69,5%, а на шостому - на 73,41%. Для кімнат, орієнтованих на північ, на першому поверсі енергопотреба була на 49,9% менша від базового рівня, на третьому - на 56,5%, а на шостому - на 59,0%.

Ці дані показують, що енергопотреба може значно відрізнятись в залежності від значення кратності повітрообміну, фактичні значення якого різняться в залежності від орієнтації кімнати та поверху, на якому вона розташована.

3.2. Дослідження зміни концентрації CO_2 та визначення повітрообміну в навчальному корпусі ЗВО

За допомогою вище описаних приладів в аудиторіях навчального корпусу №22 КПІ ім. Ігоря Сікорського вимірювались рівень CO_2 та температура досліджуваних приміщень та фоновий (зовнішній) рівень CO_2 , розклад перебування людей та їх кількість в аудиторіях. Дослідження проводились під час занять протягом кількох днів грудня.

В корпусі провітрювання навчальних аудиторій здійснюється шляхом відкриття дверей на коридори. Механічна вентиляція в корпусі не працює, тому цей метод був обраний як основний спосіб провітрювання. Було обрано групу репрезентативних приміщень розташованих на північній та південній стороні будівлі на 1, 3, 4 та 7 поверсі.

Аудиторії відрізнялись початковим значенням вмісту CO_2 , кількістю студентів та об'ємом приміщень. Дані по вимірюванню представлені на графіках рисунку 3.2, на якому представлені вимірювання вмісту CO_2 за денним розподілом занять та узагальнення за інтервалом вимірювань.

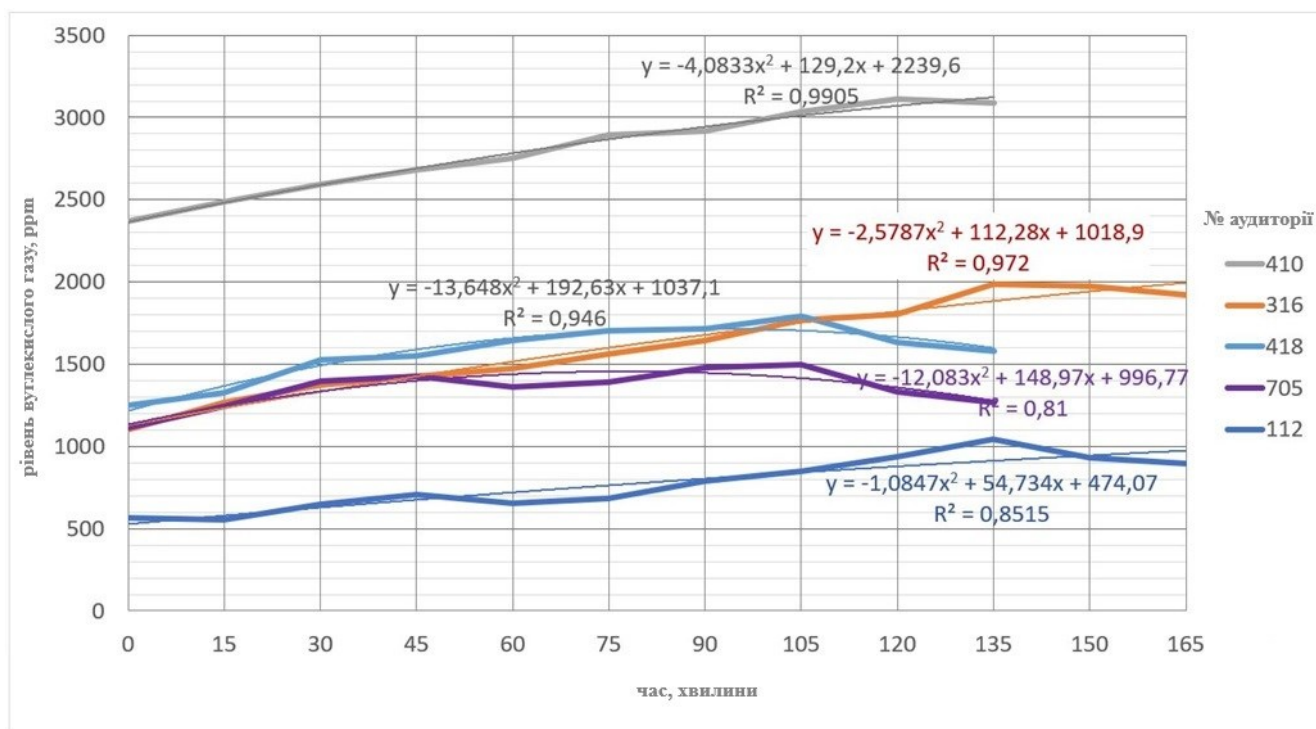
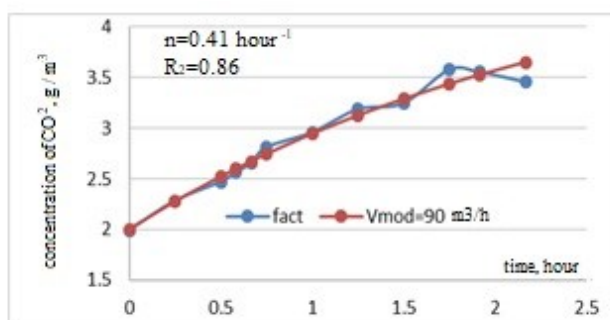


Рисунок 3.2 – Часовий розподіл вимірювань в аудиторіях [7]

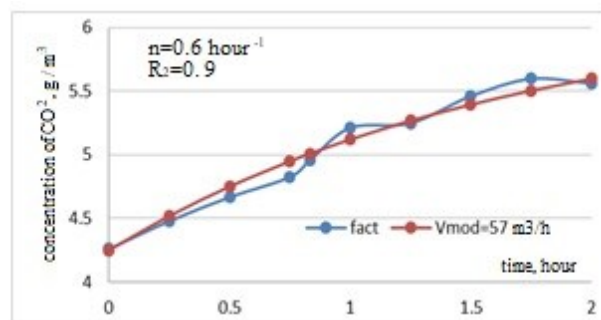
З рисунка 3.2 видно, що під час проведення занять рівень CO_2 зростає і в більшості випадків перевищує нормативні значення.

Додаткове провітрювання та відновлення функціональності вентиляційної системи є необхідними для всіх аудиторій, крім однієї. В 112 аудиторії низький рівень CO_2 пояснюється розташуванням на першому поверсі та наявністю стак-ефекту, що викликає більшу різницю тиску. Також, під час першої пари, коли проводилися дослідження, в кімнаті був низький початковий рівень CO_2 . Оцінка якості мікроклімату в приміщеннях, базуючись на концентрації CO_2 , вимагає проведення розрахунків фактичної кратності повітрообміну.

На рисунку 3.3 наведено значення повітрообміну в приміщеннях південної (рисунок 3.3(а), 316 аудиторія) та північної (рисунок 3.3(б), 410 аудиторія) орієнтації. Різниця у значеннях визначеної кратності повітрообміну пояснюється тим, що в аудиторії 316 були замінені вікна на двокамерні металопластикові склопакети. Скорегований коефіцієнт детермінації для розрахованих даних приміщень є досить високим та становить $R=0,86$ для південної орієнтації та $R=0,9$ для північної орієнтації.



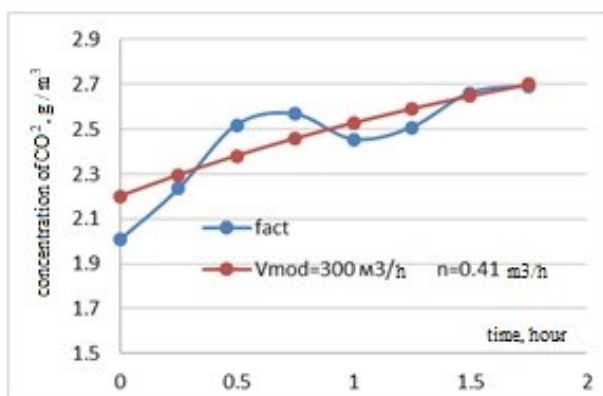
а)



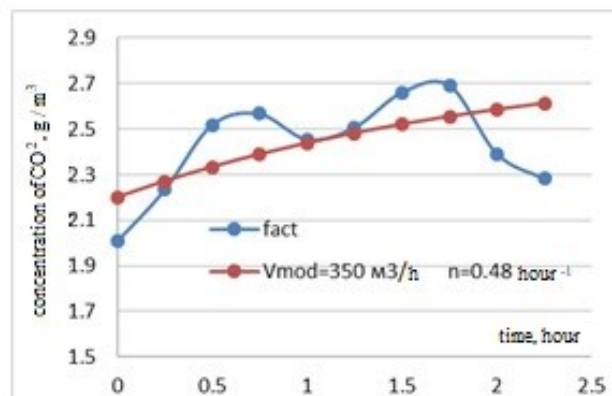
б)

Рисунок 3.3 – Повітрообмін в приміщеннях південної (а, 316 кімната) та північної (б, 410 кімната) орієнтації [7]

На рисунку 3.4 наведено зміну концентрації CO_2 в часі для великої лекційної аудиторії з та без врахування провітрювання шляхом відкриття дверей на коридори.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Повітрообмін в приміщенні (705 кімната) без врахування (а) та врахуванням (б) провітрювання [7]

Потрібно відмітити, що на перервах двері в аудиторіях відкриті, тому проведено визначення кратності повітрообміну для лекційного приміщення 705 (об'єм приміщення $V_k=727 \text{ м}^3$) без врахування відкриття дверей на перервах (рисунок 3.4(а)) повітрообмін складає $300 \text{ м}^3/\text{год}$, та з врахуванням відкритих дверей – $350 \text{ м}^3/\text{год}$ (рисунок 3.4(б)).

З отриманих експериментальних даних було визначено середню кратність повітрообміну лекційного приміщення для розглянутого інтервалу часу.

Встановлено, що без врахування провітрювань кратність повітрообміну становить $0,41 \text{ год}^{-1}$, з врахуванням провітрювань середня кратність повітрообміну становить $0,48 \text{ год}^{-1}$.

Експериментально визначена кратність повітрообміну в аудиторій, орієнтованих на північ і з дерев'яними вікнами – $0,41 \text{ год}^{-1}$. Відповідно до результатів емпіричної методики, кратність повітрообміну для приміщень північної орієнтації 1–7 поверхів становить $(0,59)–(-0,76) \text{ год}^{-1}$.

Тобто експериментально визначене значення кратності повітрообміну знаходиться в межах цього діапазону, що свідчить про узгодженість результатів отриманих за різними методиками.

Закордонні дослідники [77] розробили підходи щодо провітрювання класів навчальних закладів. В Україні регламентовано тривалість провітрювання класів для закладів загальної середньої освіти [78], проте для приміщень ВНЗ таких рекомендацій наразі немає. У стандарті [31] зазначено лише, що у навчальних приміщеннях з постійним перебуванням людей, окрім необхідних систем вентиляції, слід передбачити наскрізне або кутове провітрювання приміщень (в тому числі через рекреації, коридор або суміжне приміщення), і що вікна повинні бути обладнані пристроями механічного відчинення фрамуг чи квартирками на доступній для відчинення висоті. При цьому у стандарті також зазначено, що задля забезпечення відповідного класу енергоефективності навчальних закладів у системах вентиляції можливе регулювання відповідно до фактичних значень кількості присутніх людей або концентрації CO_2 у повітрі приміщень.

3.3. Дослідження концентрації CO_2 в аудиторії учбового корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського в режимі охолодження внутрішнього повітря

Також в рамках експериментального дослідження проводились експериментальні заміри концентрації CO_2 в аудиторії учбового корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського №22 в режимі зміни температури внутрішнього повітря

в літній період. Серія вимірювань включала 9 періодів вимірювань по 60–120 хвилин.

Репрезентативна навчальна аудиторія площею 49,2 м² (5,93×8,3м) знаходиться на 4 поверсі навчального корпусу. Висота приміщення 2,85 м.. Аудиторія має дві зовнішні стіни з вікнами. Вікна з подвійним заскленням у дерев'яних спарених плетіннях.

Експеримент з підвищенням рівня CO₂ в аудиторії проводився відповідно плану наведеному на рисунку 2.9 з щохвилинним фіксування даних. Кліматичні данні зовнішнього середовища, а саме: зовнішня температура, напрямок та сила вітру – були отримані з найближчої метеостанції [80].

В період проведення досліджень переважаючим був південно-західний та північний напрямки вітру. Заміри проводились в денний період, коли зовнішня температура була (+18°C) – (+27°C). Протягом експерименту фіксувались значення рівня CO₂ безпосередньо в досліджуваній аудиторії, в коридорі будівлі та зовні. Рівень вуглекислого газу в зовнішньому повітрі під час експериментів був в межах 415–440 ppm.

Для візуалізації досліджуваної аудиторії (рисунок 3.5) було використано онлайн сервіс Roomtodo [81].



Рисунок 3.5 – Візуалізація учбової аудиторії

Охолодження повітря в аудиторії відбувалась за рахунок роботи кондиціонера.

За результатами серії вимірювань знову чітко прослідковувалась залежність явищ інфільтрації та ексфільтрації від напрямку вітру. Зовнішні стіни приміщення орієнтовані на північ та захід. Відповідно, при північному напрямку вітру, коли зовнішня сторона будівлі з найбільшим заскленням була навітряною – спостерігалось явище інфільтрації. І навпаки, при південному напрямку вітру – явище ексфільтрації. При переважаючому південно-західному напрямку вітру дані явища чергувались. При чому зі збільшенням перепаду температур в приміщенні і зовні, також мав місце стек ефект і величина кратності повітрообміну збільшувалась. Наприклад, за схожих зовнішніх кліматичних умов при різниці зовнішньої та внутрішньої температур в діапазоні 0–3 °С – визначена кратність повітрообміну становила 0,38 – 0,47 год⁻¹, а при різниці температур понад 5 °С – кратність становила 0,9 год⁻¹. Середня кратність повітрообміну за період досліджень була на рівні 0,6 год⁻¹, що також відповідає діапазону визначеному за емпіричною методикою. У стандарті [31] нормативне значення вимоги до повітрообміну в аудиторіях вищих навчальних закладів – 20 м³/год на 1 людину. Тобто для досліджуваної аудиторії, кратність повітрообміну 0,6 год⁻¹ буде задовольняти вимогам, за умов присутності 4 людей.

3.4. Експериментальне визначення кратності фактичного повітрообміну у житловій будівлі

Першим кроком в проведенні експериментальних досліджень в житловій квартирі було вимірювання зміни концентрації CO₂ у приміщеннях де найчастіше перебувають мешканці за звичайних/фактичних умов експлуатації приміщень. Вимірювання проводились протягом 10 діб квітня. Типова зміна концентрації CO₂ в приміщеннях житлової кімнати та кухні протягом доби наведена на рисунку 3.6.

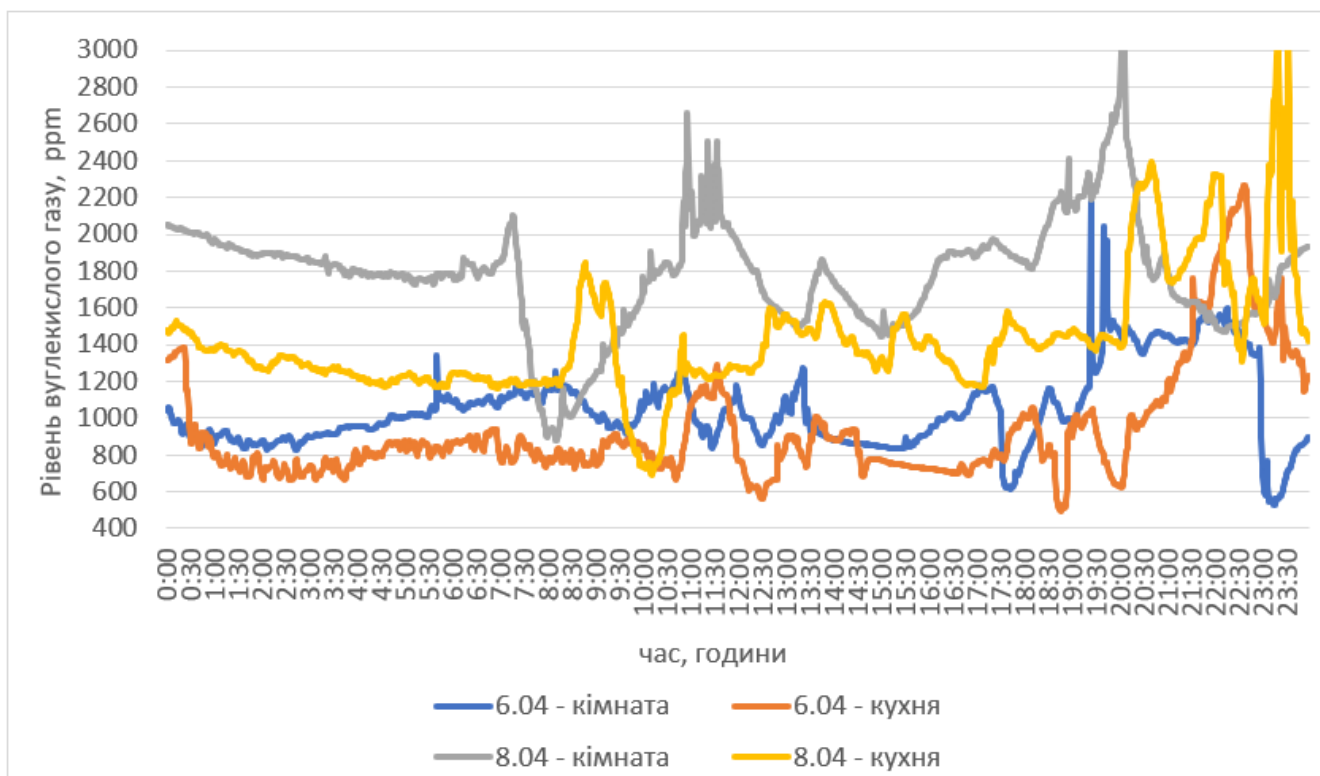


Рисунок 3.6 – Зміна концентрації вуглекислого газу протягом доби в приміщеннях квартири за фактичних умов [4]

У ході дослідження було виявлено, що коливання рівня вуглекислого газу в приміщенні залежали від ряду чинників. Серед них: кількість людей, які перебувають в приміщенні, тривалість їхнього перебування, графік провітрювань, а також кліматичні зміни зовнішнього середовища. В нічний період, коли мешканці спали, були відсутні різкі перепади у концентрації CO_2 в приміщеннях. Протягом дня, навпаки, активність людей мала значний вплив на рівень CO_2 . Різкі скачки на графіках, як правило, пояснюються періодами провітрювань квартири. Середній рівень вуглекислого газу в квартирі протягом доби тримався на рівні 1200-1500 ppm.

З метою отримання більш точних результатів розрахунку, було вирішено не враховувати надходження CO_2 від людей, тому подальші серії вимірювань проводились за відсутності людей в квартирі. Також чутливість приладів не дозволяла одразу з достатньою точністю визначити з балансів зміни концентрації CO_2 рівень переносу повітря між кімнатами квартири за фактичних умов

експлуатації, коли були незначні коливання CO_2 . Тому під час експериментальних вимірювань штучно підвищувався рівень CO_2 в приміщеннях, шляхом спалювання сухого спирту, для того щоб більший період часу можна було фіксувати зміни концентрації вуглекислого газу і провести більш якісний аналіз отриманих результатів.

В рамках наступних серій досліджень одночасно проводились експериментальні заміри концентрації вуглекислого газу в приміщеннях житлової кімнати, кухні, коридору квартири та у вентиляційному каналі, що виходить на кухню з кроком 1 хв. План проведення експерименту наведено на рисунку 2.9.

Також вимірювалась температура в приміщеннях квартири. Фактичні кліматичні данні, такі як: зовнішня температура, напрямок та сила вітру, були зібрані за даними з найближчої до досліджуваного об'єкту метеостанції [80].

Наступна серія досліджень зміни концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири проводилась в зимовий та літній періоди. Серія вимірювань в опалювальний період включала 13 інтервалів вимірювань по 60–120 хвилин протягом 10 днів.

Для міста Києва характерними є південно-східний напрямки вітру в лютому місяці відповідно [68]. В період проведення досліджень відповідно фактичним кліматичним даним характерним був південний та південно-західний напрямки вітру. Средньодобова температура зовнішнього повітря становила $(+4,1^\circ\text{C})$ – $(+6^\circ\text{C})$, добові коливання становили $(+6^\circ\text{C})$, (-3°C) . Також на початку та вкінці експерименту фіксувались значення рівня CO_2 в коридорі гуртожитку, який тримався в межах 540–570 ppm. Рівень вуглекислого газу в зовнішньому повітрі під час експериментів був в межах 390–430 ppm.

З метою визначення механізму масопереносу повітря між приміщеннями квартири, штучне підвищення рівня CO_2 відбувалось в різних приміщеннях. На рисунку 3.7 наведено результати вимірювань за умов підвищення рівня CO_2 в приміщенні кухні.

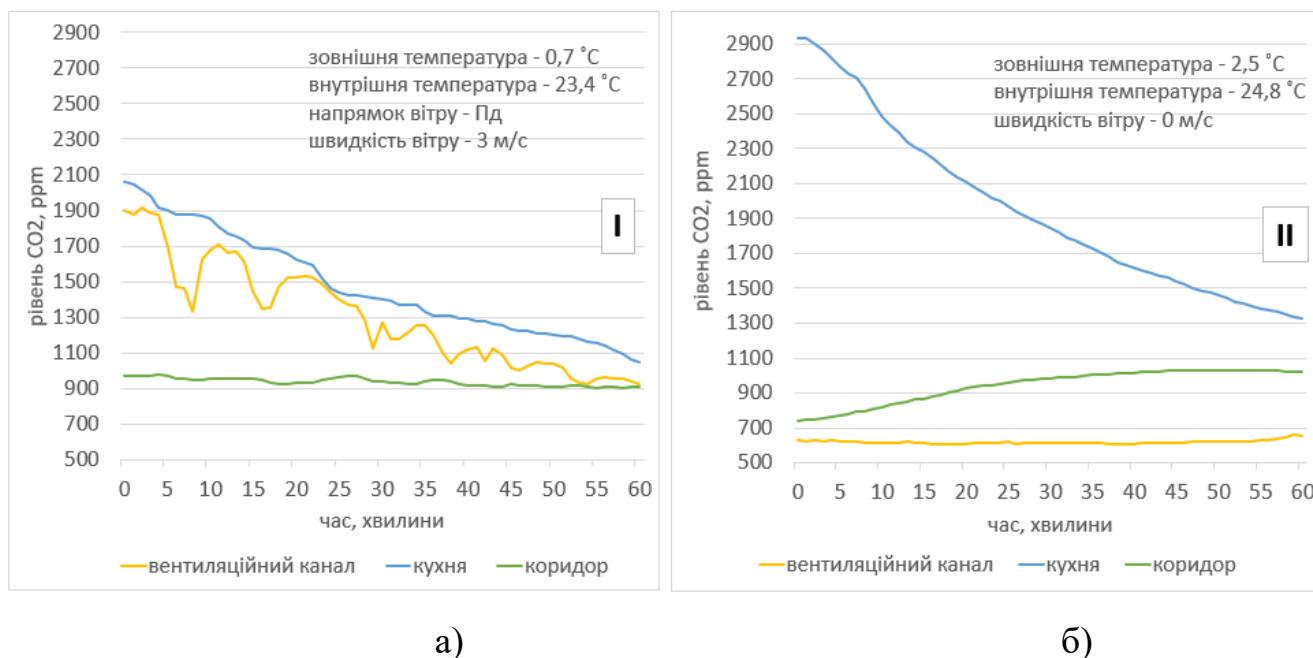


Рисунок 3.7 – Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири при підвищенні рівня CO₂ в приміщенні кухні за різних кліматичних умовах [4]

Аналізуючи типові графіки на рисунку 3.7, можна зробити висновок про залежність руху повітря у вентканалі від напрямку вітру. При південному і південно-західному напрямку вітру повітря з приміщення кухні надходило до вентканалу – механізм руху I (рисунок 3.7(а)), адже зміна концентрації вуглекислого газу в приміщенні кухні і вентканалу мають подібні тенденції. При західному напрямку вітру та при відсутності вітру (рисунок 3.7(б)) навпаки, припливне повітря надходило до квартири через вентканал – механізм руху II, тому що рівень вуглекислого газу у вентканалі під час всього експерименту залишався відносно незмінним і на рівні зовнішнього середовища.

В результаті проведених досліджень були виділені два напрями повітрообміну в квартирі, а саме інфільтрація та ексфільтрація.

На рисунку 3.8 наведено результати вимірювань рівня вуглекислого газу в приміщеннях кухні, коридору квартири, житлової кімнати та вентиляційному каналі за умов підвищення рівня CO₂ в приміщенні коридору.

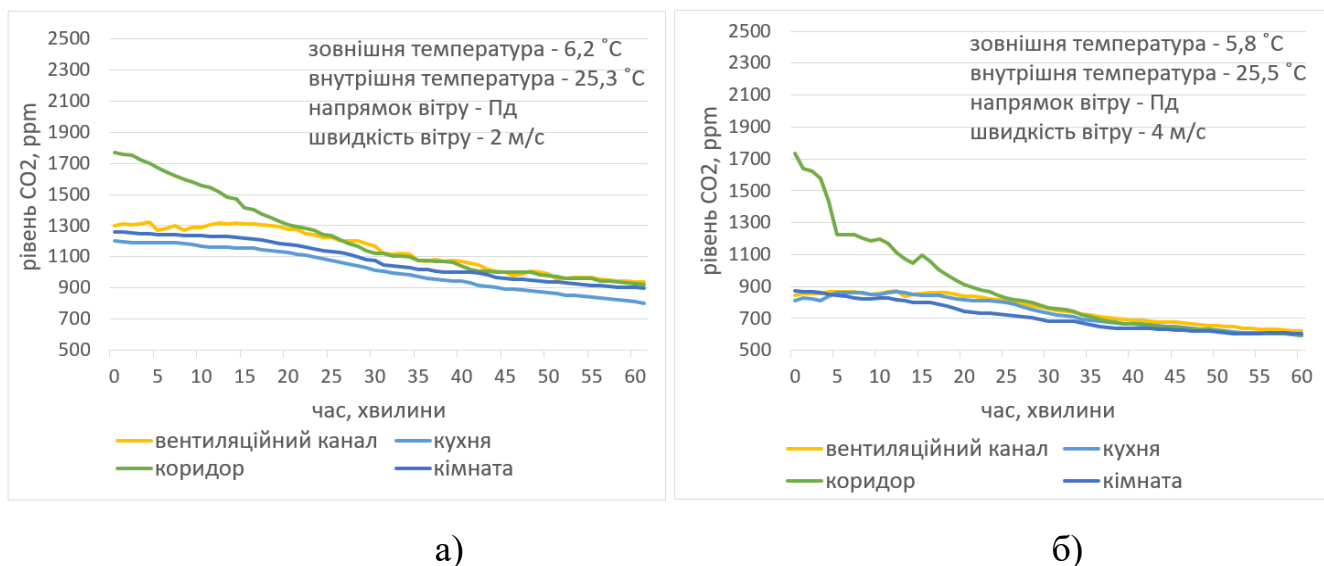


Рисунок 3.8 – Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири при нагнітанні CO₂ в приміщенні кухні за різних кліматичних умовах [4]

Дані наведені на рисунку 3.8, свідчать про те, що концентрація CO₂ в вентиляційному каналі значно перевищує фонову концентрацію CO₂ в атмосферному повітрі. Графік зміни концентрації CO₂ в вентиляційному каналі схожий на графік зміни концентрації CO₂ на кухні, що свідчить про те, що повітря з кухні виходить через вентиляційний канал. На основі декількох серій вимірювань було виявлено, що вентиляція в квартирі в значній мірі залежить від природного вентиляційного потоку, який створюється через вікна.

На графіках (рисунок 3.9) наведено результати типових дослідів, де стартова концентрація в різних приміщеннях квартири була різною при відносно однакових внутрішніх і зовнішніх умовах. При цьому, визначена кратність повітрообміну залишалась приблизно на тому ж рівні: 0,74 год⁻¹ для житлової кімнати, 0,66–0,81 год⁻¹ для коридору, 3,4 год⁻¹ для приміщення кухні. Це означає, що кратність повітрообміну була приблизно однаковою незалежно від початкових концентрацій CO₂.

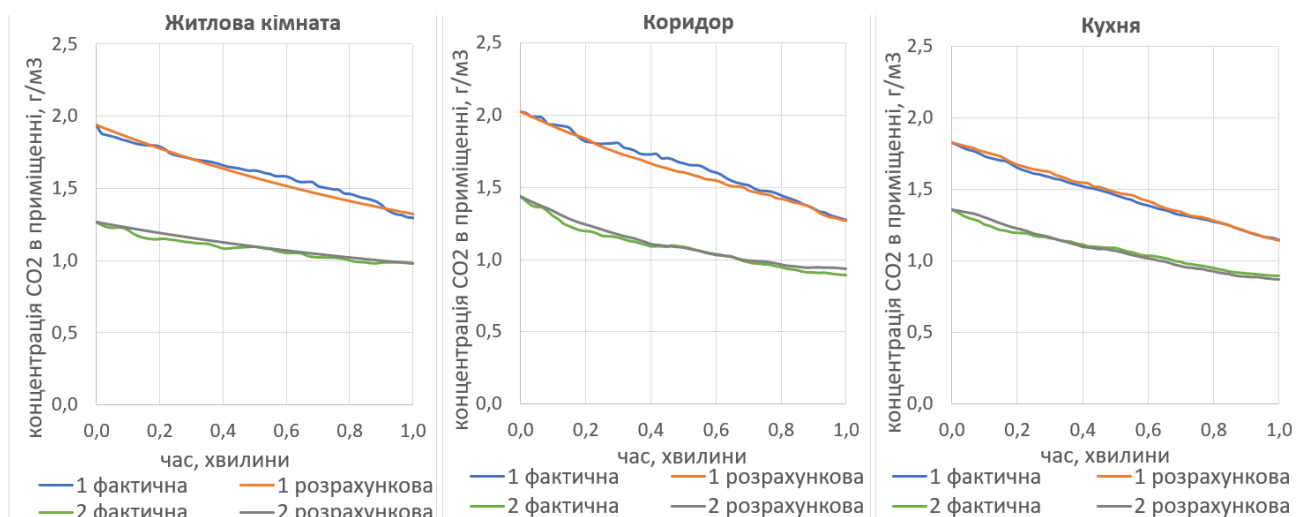


Рисунок 3.9 – Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири при умовах, коли припливне повітря надходить через вікна і входні двері (індекси 1, 2 – відповідають номеру дослідів) [4]

В класичних розрахунках [79] припускається, що свіже повітря надходить до кімнат шляхом інфільтрації, а саме нещільності у вікнах і дверях і виходить через вентиляційний канал. Результати проведених досліджень вказують на наявність двох напрямків руху повітря. На рисунку 3.10 представлені результати обробки типового дослідження проведеного в умовах, коли припливне повітря надходить через вентиляційний канал та входні двері. Враховуючи, що напрямок руху повітря в цьому досліді відповідає рисунку 2.13(а), є відмінності у величинах кратності повітрообміну в порівнянні з напрямком руху повітря, що наведений на рисунку 2.13(б). Для наведених умов кратність повітрообміну для житлової кімнати становила $0,37 \text{ год}^{-1}$, для коридору - $1,06 \text{ год}^{-1}$, а для кухні - $0,57 \text{ год}^{-1}$. Зміна величини кратності повітрообміну пояснюється іншим перепадом густин та температур повітря.

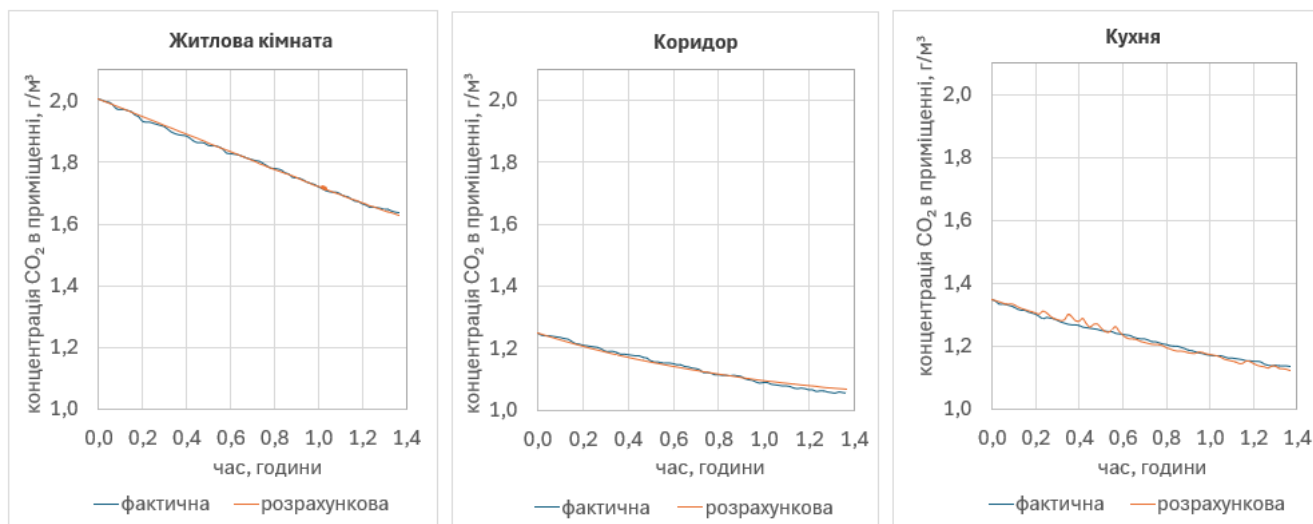
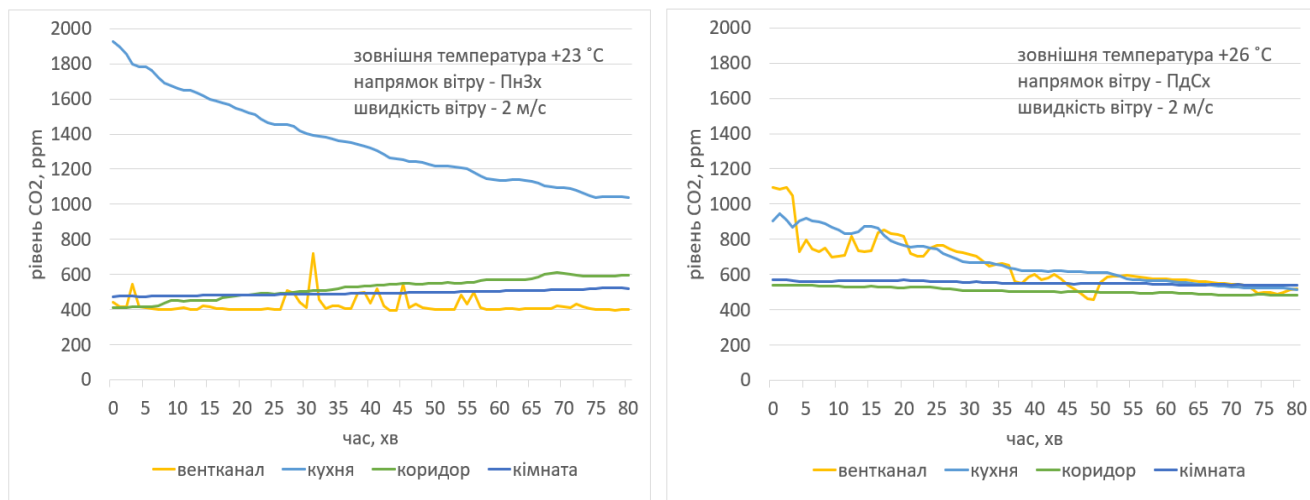


Рисунок 3.10 – Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири при умовах, коли припливне повітря надходить через вентиляційний канал і вхідні двері [4]

Також проводилась серія експериментальних досліджень зміни концентрації CO₂ в репрезентативних приміщеннях квартири в літній період. Дана серія вимірювань включала 18 періодів вимірювань по 60–120 хвилин протягом місяця серпня. Заміри проводились відповідно плану експерименту наведеному на рисунку 2.9. Для літнього періоду у місті Київ характерними є західний, північно-західний та північний напрямки вітру [68]. В період проведення досліджень переважаючим був північно-західний напрямок вітру. Заміри проводились в денний період, коли зовнішня температура була (+21°C)–(+30°C). Також на початку та вкінці експерименту фіксувались значення рівня CO₂ на коридорі гуртожитку, який тримався в межах 410–460 ppm. Рівень вуглекислого газу в зовнішньому повітрі під час експериментів був в межах 410–435 ppm.

За результатами вимірювань чітко прослідковується залежність явищ інфільтрації та ексфільтрації від напрямку вітру. При північно-західному напрямку вітру свіже повітря надходило через вентиляційний канал (рисунок 3.11(а)). При південному, південно-західному, південно-східному напрямках повітря надходило через вікна і двері, а виходить через вентиляційний канал (рисунок 3.11(б)), адже

тенденції зміни концентрації вуглекислого газу в приміщенні кухні і вентканалу подібні.



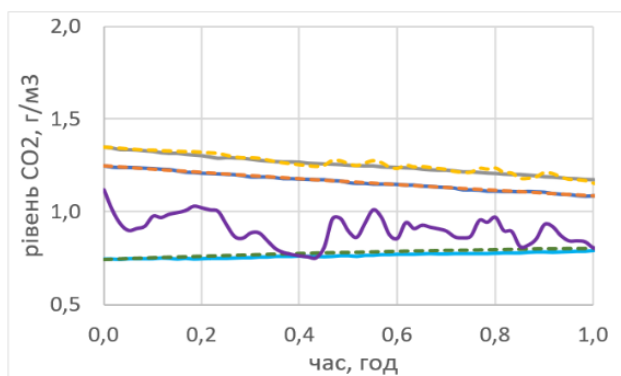
а)

б)

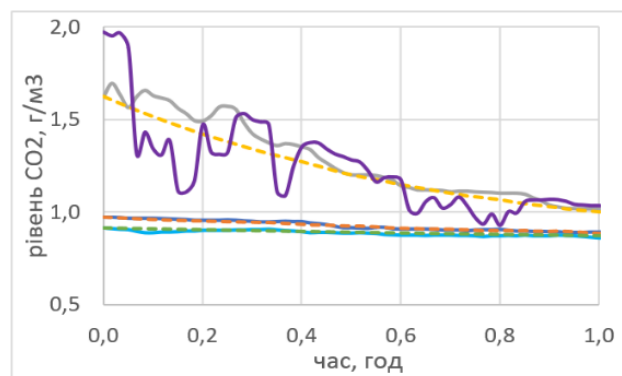
Рисунок 3.11 – Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири [4] для механізмів інфільтрації (а) та ексфільтрації (б)

Після обробки усіх серій досліджень, було встановлено, що виведенні системи рівнянь (2.17) та (2.18) достатньо точно описують фактичні зміни CO₂ в приміщеннях для обох механізмів переносу повітря. На рисунку 3.12 наведені графіки результатів обрахунку типових дослідів за умов підвищення рівня вуглекислого газу в різних приміщеннях квартири. Максимальна розбіжність між фактичним та розрахованим значенням становила ± 50 ppm і пов'язана з похибкою вимірювальних приладів, а також перепадами концентрації CO₂ у вентканалі, який є спільним для усього стояка.

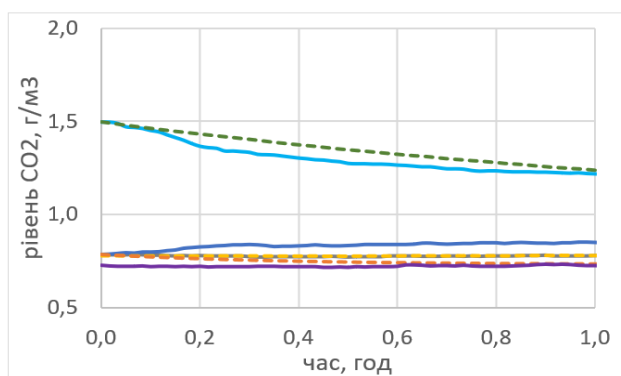
Для зимового періоду характерним було підсмоктування свіжого повітря до приміщень квартири через вікна, в літній період явища інфільтрації та ексфільтрації були зафіксовані в майже однаковій кількості. Також було визначено фактичну кратність повітрообміну для обох механізмів руху повітря в квартирі. Вікна та балконні двері квартири орієнтовані на південь, відповідно, при південному, південно-східному та південно-західному напрямках вітру вітрові, величина кратності повітрообміну більша.



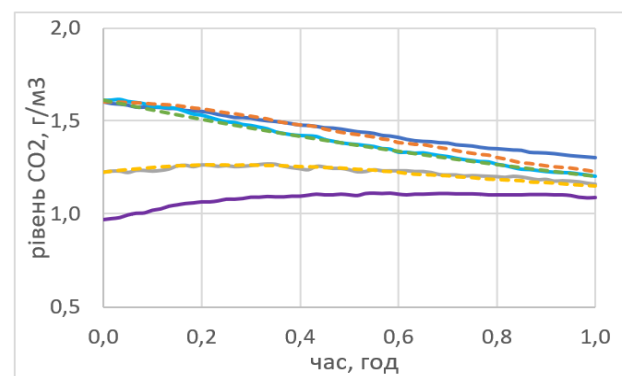
а)



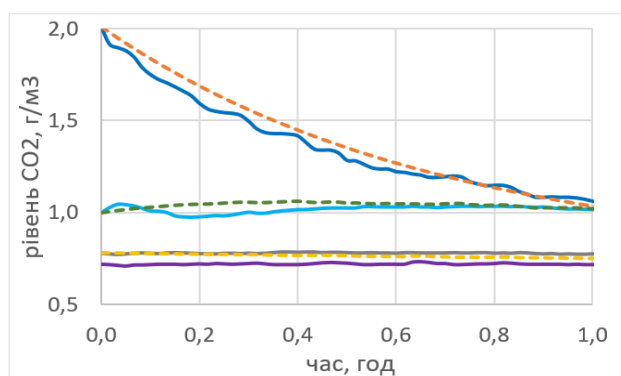
г)



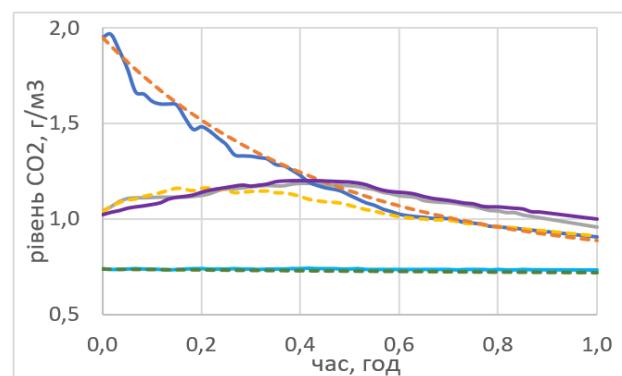
б)



г)



в)



д)

— фактичний на кухні — фактичний в коридорі — фактичний в кімнаті
 - - розрахунковий на кухні - - розрахунковий в коридорі - - розрахунковий в кімнаті
 — фактичний у вентканалі

Рисунок 3.12 – Фактична та розрахована концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири за умов ексфільтрації (а,б,в) та інфільтрації (г, г, д) при підвищенні рівня вуглекислого газу в різних приміщеннях репрезентативної квартири а), г) – збільшення рівня CO_2 в приміщенні кухні; б), г) – збільшення рівня CO_2 в приміщенні кімнати; в), д) – збільшення рівня CO_2 в приміщенні коридору [6]

У літній період кратність повітрообміну для механізму інфільтрації була на рівні $0,57 \text{ год}^{-1}$ для житлової кімнати, $2,34 \text{ год}^{-1}$ для коридору та $2,41 \text{ год}^{-1}$ для кухні. При ексфільтраційному русі повітря середня кратність повітрообміну була на рівні $0,24 \text{ год}^{-1}$ для житлової кімнати, $0,94 \text{ год}^{-1}$ для коридору та $0,52 \text{ год}^{-1}$ для кухні.

На основі проведених експериментальних досліджень було виявлено, що фактична кратність повітрообміну, коли свіже повітря надходить до приміщення через вікна та двері, перевищує мінімальні нормативні значення. Однак при оберненому русі повітря цей показник не відповідає нормативним вимогам щодо рівня повітрообміну. При врахуванні напрямку руху повітря, яке надходить в квартиру, фактично, енергія, яка затрачається на нагрів припливного повітря, буде пропорційна кратності повітрообміну повітря, яке надходить зовні.

Висновки до розділу 3

1. В ході розрахунків, здійснених на основі імітаційного дослідження кратності повітрообміну за емпіричними методами, було виявлено, що для однокамерних склопакетів в спарених дерев'яних плетіннях кратність повітрообміну для вибіркової групи приміщень становить від $0,58$ до $-0,85 \text{ год}^{-1}$ – для південної орієнтації та від $0,59$ до $-0,76 \text{ год}^{-1}$ – для північної орієнтації. Ці значення менші мінімального нормативного значення для навчальних закладів. Було встановлено, що при годинному розрахунку енергоспоживання різниця між базовим рівнем енергоспоживання та фактичним перевищує 50% протягом опалювального періоду.

2. За результатами експериментального визначення концентрації CO_2 було визначено середню кратність повітрообміну в аудиторіях навчального закладу в зимовий період. Встановлено, що без врахування провітрювань кратність повітрообміну становить $0,41 \text{ год}^{-1}$, з врахуванням провітрювань середня кратність повітрообміну становить $0,48 \text{ год}^{-1}$.

3. Результати дослідження концентрації CO_2 в аудиторії учбового корпусу №22 КПІ ім. Ігоря Сікорського в режимі охолодження свідчать про залежність

величини природної кратності повітрообміну від вітрового та стек ефектів. Зі збільшенням різниці температур між внутрішнім та зовнішнім повітрям зростала і величина кратності повітрообміну від 0,37 до 0,9 год⁻¹. Також прослідковувалась залежність явищ інфільтрації та ексфільтрації від напрямку вітру.

4. Експериментально визначені значення кратності повітрообміну знаходиться в межах діапазону визначеному за емпіричною методикою, що свідчить про узгодженість результатів отриманих за різними методиками.

5. За результатами серії вимірювань фактичний рівень CO₂ в однокімнатній квартирі становив 1200–1500 ppm за умов присутності двох людей. Враховуючи незначну зміну концентрації CO₂ при фактичних умовах експлуатації, були створені експериментальні дослідницькі умови шляхом штучного збільшення рівня вуглекислого газу. Серія досліджень зі збільшенням рівня CO₂ проводилась в приміщеннях типової однокімнатної квартири в зимовий та літній періоди. В рамках експерименту проводились експериментальні щохвилинні заміри концентрації вуглекислого газу в житловій кімнаті, кухні, коридорі квартири та у вентиляційному каналі. Під час аналізу результатів враховувалась динамічна зміна зовнішніх кліматичних показників, а саме: зовнішня температура, швидкість та напрям вітру. На базі досліджених рівнів концентрації вуглекислого газу було визначено кратність повітрообміну, яка залежить від мінливості зовнішніх та внутрішніх умов. За результатами досліджень кратність повітрообміну в зимовий період в квартирі була однаковою і трималась на рівні 0,74 год⁻¹ для житлової кімнати, 0,73 год⁻¹ для коридору, 3,4 год⁻¹ для приміщення кухні, при умовах, коли припливне повітря надходить через вікна і входні двері. Для умов коли припливне повітря надходить через вентиляційний канал і входні двері кратність повітрообміну для житлової кімнати була на рівні 0,37 год⁻¹, для коридору – 1,06 год⁻¹, для приміщення кухні – 0,57 год⁻¹. Для літнього періоду, визначена кратність повітрообміну для механізму інфільтрації становила 0,57 год⁻¹ для житлової кімнати, 2,34 год⁻¹ для коридору, 2,41 год⁻¹ для приміщення кухні. При ексфільтраційному русі повітря, середня кратність повітрообміну для житлової кімнати була на рівні 0,24 год⁻¹, 0,94 год⁻¹ для коридору, 0,52 год⁻¹ для кухні.

Аналіз кількісних даних кратності повітрообміну, отриманих під час спостережень в літній та зимовий періоди, вказує на важливість врахування сезонних варіацій. Виявлено, що влітку природний обмін повітря в основному відбувається під впливом вітрового ефекту. Під час опалювального періоду обмін повітря в основному відбувається за рахунок комбінації стакового та вітрового ефектів.

РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ БУДІВЛІ

Визначення локальних показників енергетичного стану будівлі – це складний і багатоаспектний процес, що передбачає детальний аналіз споживання тепла в будівлі з урахуванням різних параметрів і факторів. Одним із важливих аспектів цього процесу є розподіл будівлі на локальні зони, що дозволяє враховувати специфіку кожного приміщення та його вплив на загальне енергоспоживання.

Під час аналізу енергетичного стану будівлі важливо враховувати не тільки конструктивні характеристики будівлі, а й кратність повітрообміну в кожній зоні. Кратність повітрообміну в будівлі впливає на її теплові втрати та енергоспоживання, оскільки кожен цикл обміну повітрям вимагає додаткових енергетичних витрат для обігріву або охолодження нового повітря, що надходить в приміщення.

Детальний аналіз кратності повітрообміну в кожній зоні дозволяє точніше оцінити витрати енергії, пов'язані з обігом повітря, і врахувати їх у загальному енергетичному балансі будівлі. Це допомагає виявити потенційні джерела енергозбереження та розробити ефективні стратегії для оптимізації споживання енергії.

4.1.Налаштування енергетичної моделі

В якості об'єкта дослідження впливу природного фактичного повітрообміну на енергопотребу було обрано існуючу однокімнатну квартиру в гуртожитку сімейного типу №22 КПІ ім. Ігоря Сікорського у м. Київ. Квартира знаходиться на дев'ятому поверсі дев'ятиповерхового будинку. Квартира має одну зовнішню стіну орієнтовану на південь. У житловому будинку наявний технічний поверх. Загальна площа приміщень квартири, без балкону, становить 32,8 м², висота приміщень – 2,5 м. Базові геометричні параметри досліджуваної моделі квартири представлено на плані на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – План об'єкту дослідження

3D-модель будівлі, розроблена в програмному забезпеченні DesignBuilder [64], наведена на рисунку 4.2. Виконання динамічного моделювання енергетичних потоків проводилось за допомогою програмного продукту EnergyPlus [63]. При створенні енергетичної моделі приміщення квартири було розділено на п'ять зон, відповідних кімнатам: житлова кімната, коридор, кухня, санвузол та кладова.

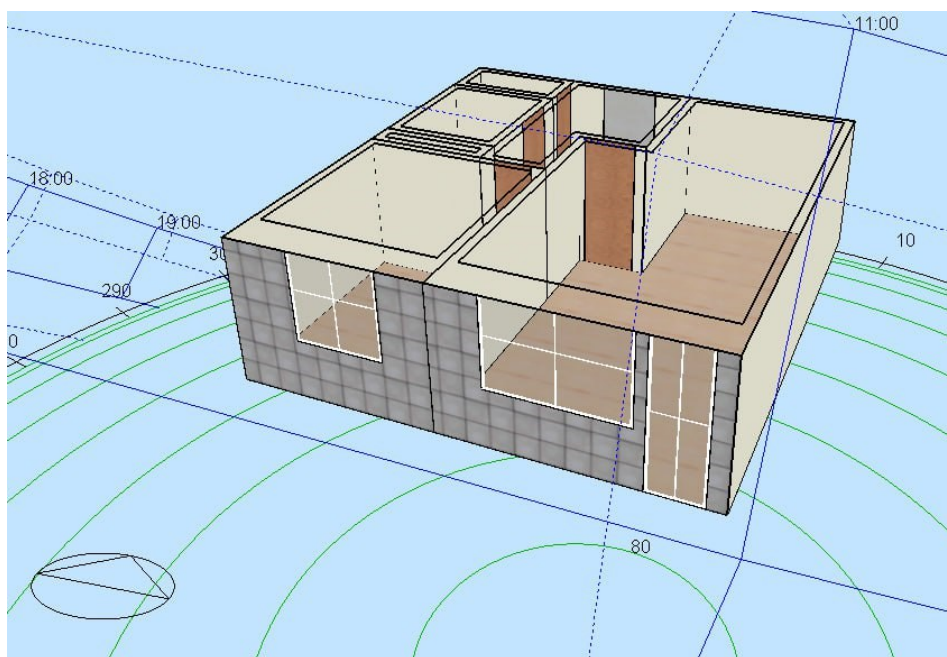


Рисунок 4.2 – 3D візуалізація об'єкту

Нижче наведені дані про основні розмірні параметри квартири в цілому та основних досліджуваних приміщень (таблиця 4.1) та матеріали конструкцій типової однокімнатної квартири (таблиця 4.2 та 4.3).

Таблиця 4.1 – Основні розмірні показники

	Площа, м ²	Висота, м	Об'єм, м ³
Квартира	32,8	2,5	92,5
Житлова кімната	17,4	2,5	43,5
Коридор	4,9	2,5	12,3
Кухня	6,3	2,5	15,8

Таблиця 4.2 – Опис конструктивних елементів будівлі

Конструктивні елементи	Опис
Перекрыття	Залізобетонні плити
Стіни	Цегляні, оштукатурені, з декоративною плиткою
Перегородки	Цегляні, оштукатурені
Вікна	Однокамерний склопакет в дерев'яних спарених плетіннях
Двері входні	Металеві
Двері внутрішні	Дерев'яні
Двері балконні	Дерев'яні подвійні з частковим заскленням

Таблиця 4.3 – Матеріали та характеристики огорожувальних конструкцій

Огороджуючі конструкції	Матеріали	Товщина шару, м
Зовнішні стіни	штукатурка	0,010
	цегляна кладка	0,520
	облицювальна плитка	0,010
Світлопрозорі конструкції	скло	0,004
	повітря	0,055
	скло	0,004
Перекрыття	залізобетонна плита	0,250
	цементна стяжка	0,020
	паркет	0,020

При побудові 3D геометрії (рисунок 4.3) внутрішній об'єм будівлі було розділено на зони, для того, щоб в перспективі, використовуючи EP, врахувати різні кратності повітрообміну в різних приміщеннях.

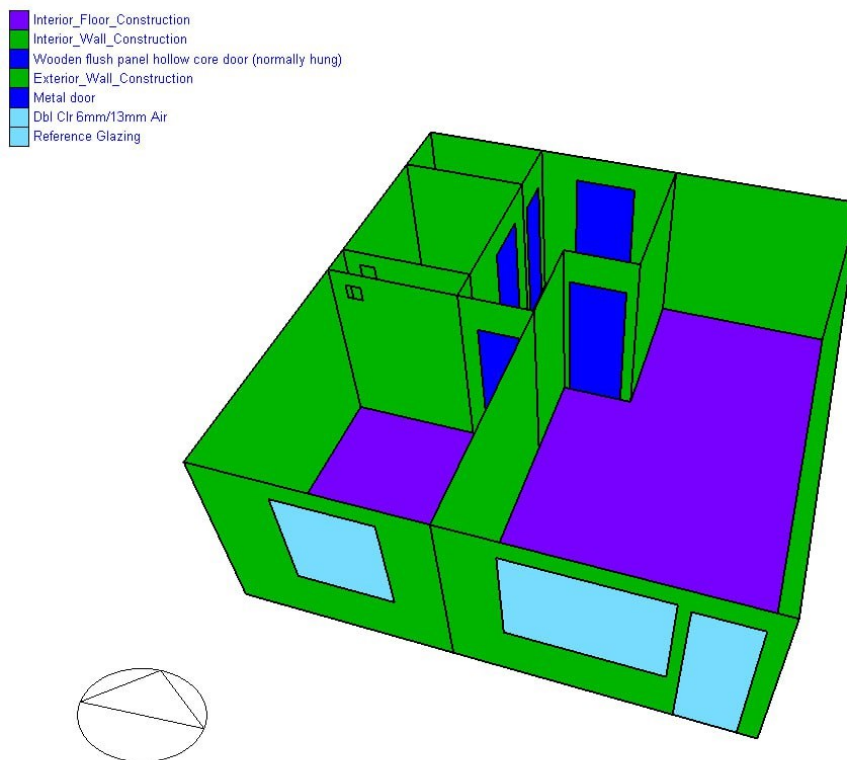


Рисунок 4.3 – 3D модель будівлі в DesignBuilder

В квартирі функціонує канална природна вентиляція. Свіже повітря надходить в приміщення квартири через нещільності в огорожуючих конструкціях (вікна та двері). Повітрообмін відбувається за рахунок перепаду тиску всередині та ззовні будівлі.

Теплонадходження від людей та системи освітлення задані відповідно графіку наведеному на рисунку 4.4. У квартирі проживає 2 людини. 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. В години максимального навантаження освітлення та електричного обладнання в будівлі задано на рівні 2 Вт/ м².

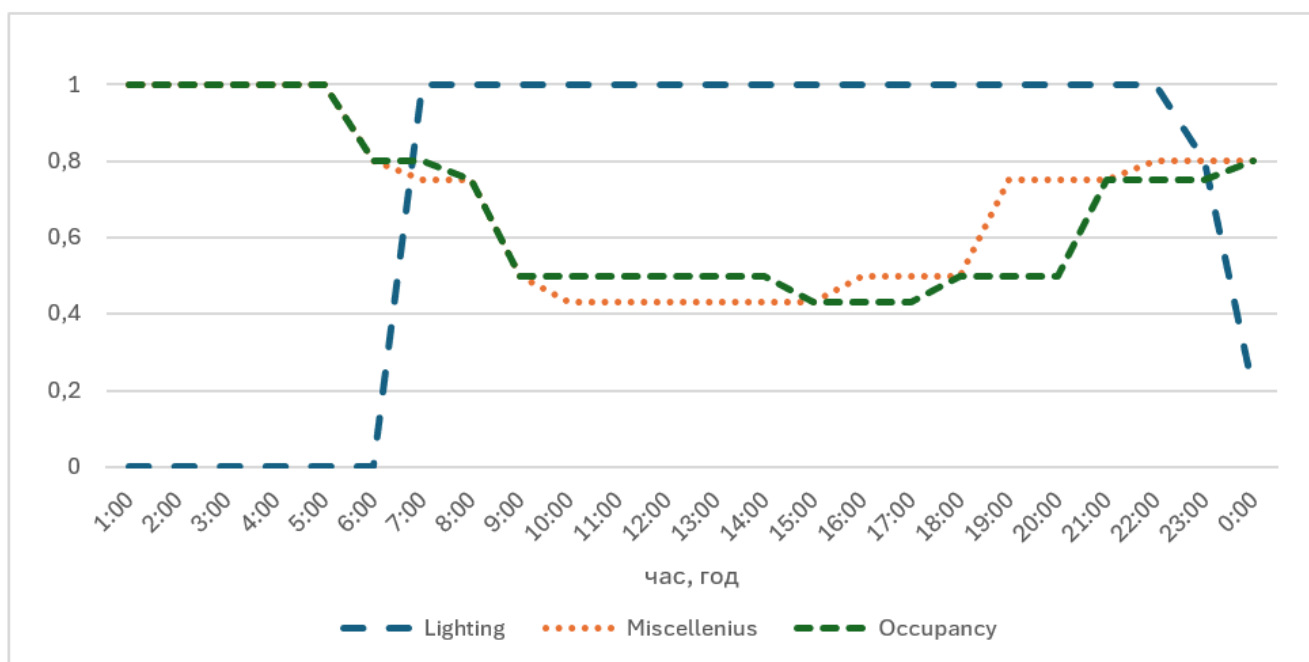


Рисунок 4.4 – Графік активності та роботи системи освітлення та використання електричного обладнання протягом доби

Теплообмін в огорожувальних конструкціях відбувається за допомогою двох основних механізмів: конвекції та теплопровідності. Враховуючи однакові температурні умови в сусідніх квартирах, припускається, що стіни, стеля та підлога, які межують з іншими квартирами, є адіабатними.

У енергетичній моделі квартири основним джерелом теплопостачання є індивідуальний двоконтурний газовий котел. Цей котел використовується для забезпечення опалення та гарячого водопостачання. Протягом 176 днів опалювального періоду здійснюється опалення квартири.

Внутрішня система опалення квартири є двотрубною та горизонтальною. Опалювальні прилади (радіатори) встановлені біля зовнішніх стін під вікнами в спальнях та на кухні без радіаційного захисту. У санвузлі встановлена рушникосушарка. Регулювання температури повітря в квартирі відсутнє. Під час опалювального періоду, температура в приміщеннях квартири підтримується на рівні 20°C. Система опалення квартири, створена в програмному середовищі DesignBuilder [64], наведена на рисунку 4.5.

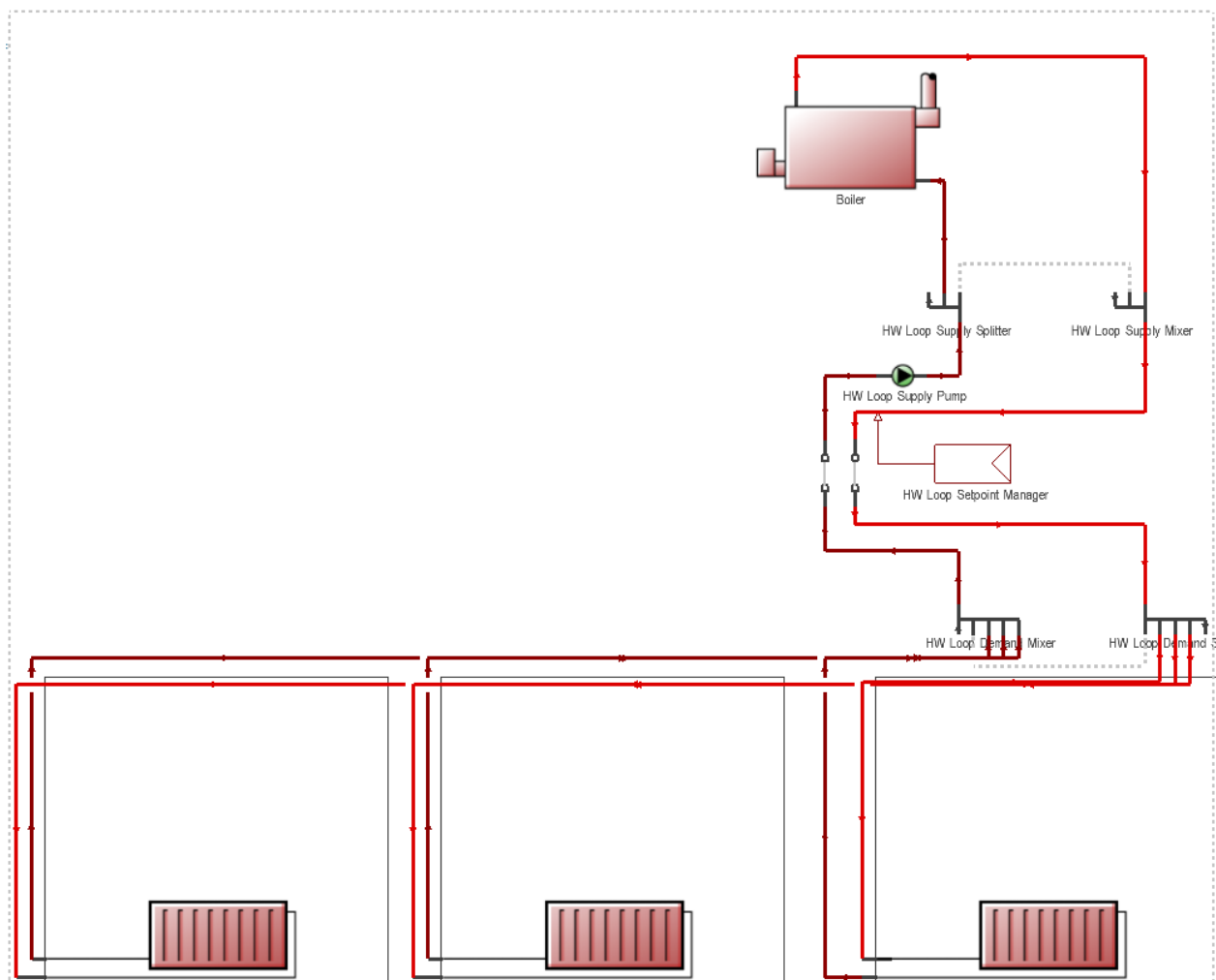


Рисунок 4.5 – Схематичне зображення системи опалення квартири

Процес теплопередачі в приміщенні квартири відбувається за допомогою випромінювання та конвекції від опалювальних приладів. Повітря в кімнатах акумулює частину цього тепла, тоді як інша частина передається до внутрішніх та зовнішніх структур будівлі.

В алгоритмі розрахунку теплонадходжень від людей, що використовується в EnergyPlus [63], враховується енергетичний баланс, який включає променеве, конвективне та приховане тепло вологи, що випаровується з поверхні тіла людини. В програмній моделі задано, що метаболічна теплота від людей, які проживають в квартирі, становить 117 Вт/людину.

Теплонадходження від системи освітлення та електричного обладнання визначено в EnergyPlus [63] методом задання навантаження на квадратний метр площі приміщення.

Погодинні параметри навколишнього середовища для опалювального періоду типового року були взяті для умов типового року з міжнародної кліматологічної бази даних IWEC для міста Києва [70]. На рисунку 4.6 представлені погодинні показники зовнішньої температури повітря та швидкості вітру. Загалом для зимового періоду міста Києва міждобові зміни температури становлять 3–4°C [14, 70]. Швидкість вітру для опалювального періоду в середньому становила 3,6 м/с з переважним західним та південним та південно-східним напрямками вітру.

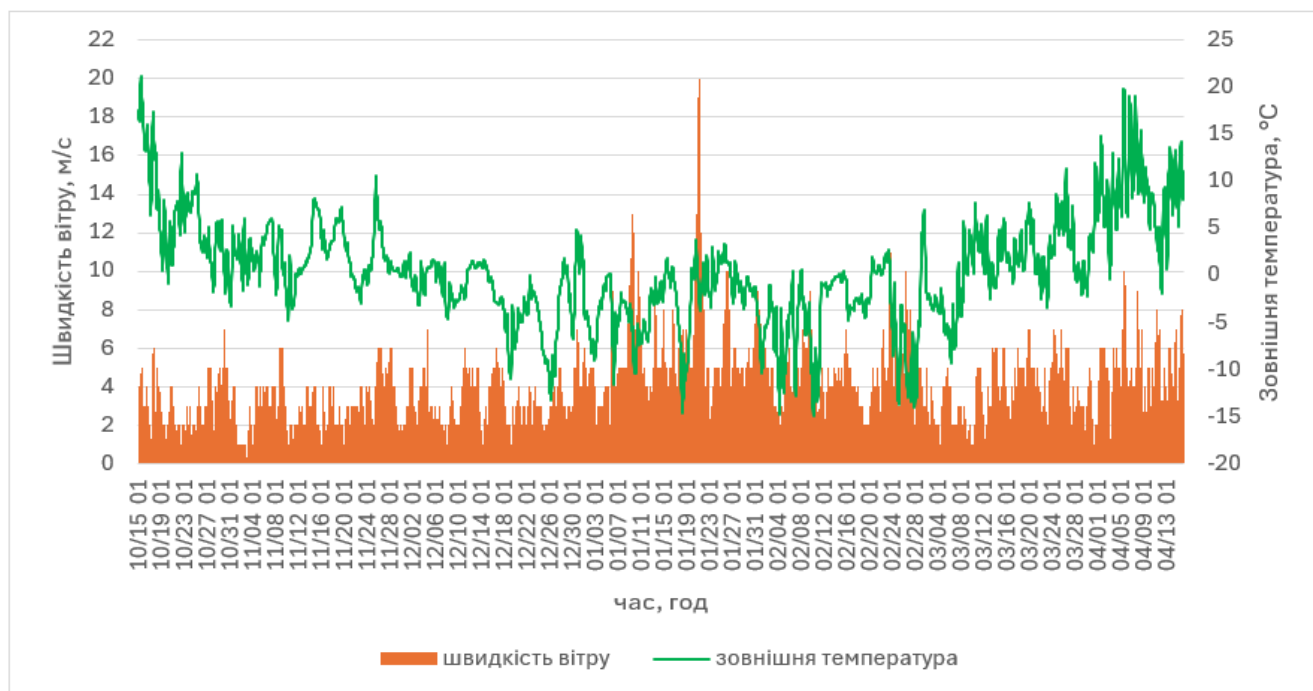


Рисунок 4.6 – Погодинна температура та швидкість вітру протягом опалювального періоду

Погодинні сонячні теплонадходження на вертикальні поверхні для південної орієнтації наведені на рисунку 4.7. Коефіцієнт пропускання сонячної радіації вікнами – 0,691 [63].

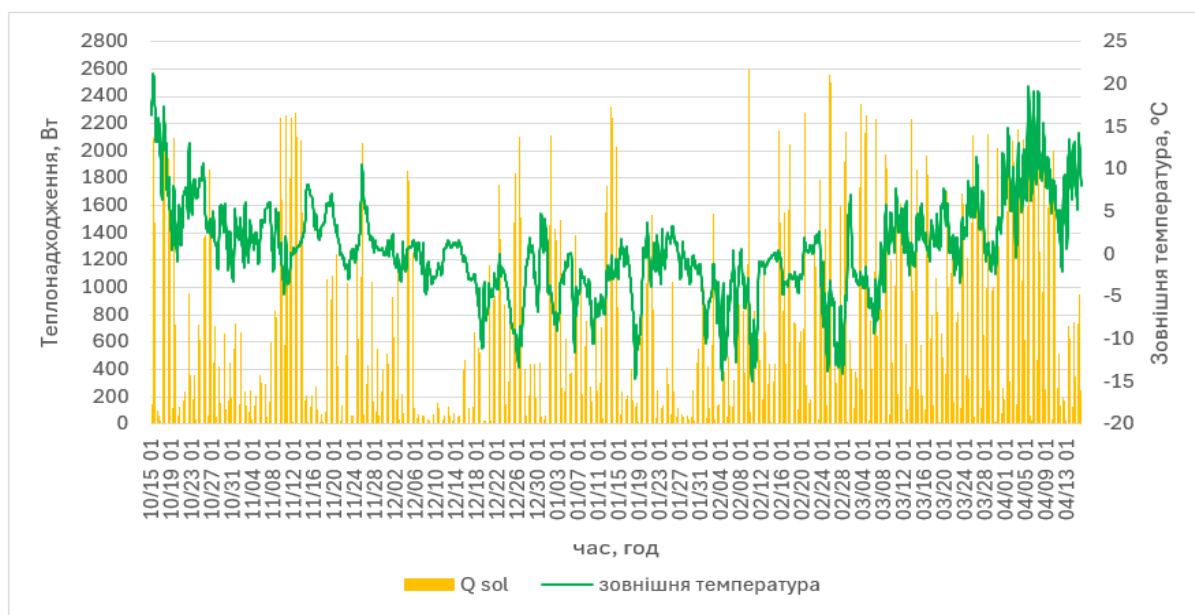


Рисунок 4.7 – Погодинні сонячні теплонадходження в репрезентативну квартиру протягом опалювального періоду

4.2. Моделювання енергоспоживання будівлі з врахуванням природного повітрообміну за різними стандартами.

В рамках проведеного дослідження було вивчено вплив режиму повітрообміну на теплове навантаження та енергоспоживання об'єкту. Для цього було використано динамічну модель квартири в програмному середовищі EnergyPlus [63], яка дозволила провести погодинну симуляцію. Енергетична модель квартири була розроблена з урахуванням експлуатаційного режиму та внутрішніх теплонадходжень, що включають людей, освітлення та електрообладнання. Це дозволило отримати більш точні та реалістичні результати.

Результати розрахунків були представлені для кліматичних умов типового року, які були взяті з міжнародної кліматологічної бази даних IWEC для міста Києва. Це дозволило врахувати сезонні варіації та специфіку клімату даної географічної зони.

Енергоспоживання для житлових будівель в Україні розраховується на базі стандартів ДБН В.2.2-15:2019 «Житлові будинки. Основні положення» [16] та ДСТУ 9091:2022 «Енергетична ефективність будівель» [28].

За стандартом ДБН В.2.2-15:2019 «Житлові будинки. Основні положення» [16], який застосовують для умов проектування, реконструкції та капітального ремонту мінімальна кратність повітрообміну в будинках з природною вентиляцією для загальних кімнат, спалень, дитячих та кабінетів становить $0,5 \text{ год}^{-1}$, для кухонь ця величина становить $1,5 \text{ год}^{-1}$. При енергетичній сертифікації будівель, енергоаудиторами приймається, що кратність повітрообміну в житлових будівлях з природною вентиляцією становить $0,6 \text{ год}^{-1}$ відповідно до ДСТУ 9091:2022 «Енергетична ефективність будівель» [28]. Та в розрахунках енергетичного сертифікату будівель ця величина приймається як інфільтраційна.

На сьогоднішній день, більшість діючих стандартів не мають чіткого визначеного методу для встановлення мінімального обсягу повітрообміну, а лише пропонують рекомендації стосовно того, як визначати цей параметр. Відповідно стандарту ASHRAE 62.2-2022 кратність повітрообміну для всієї квартири визначається за формулою (4.1):

$$Q_{tot} = 0,15A_{floor} + 3,5(N_{br} + 1), \quad (4.1)$$

де:

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

A_{floor} – площа житла, м^2 ;

N_{br} – кількість спалень.

Об'єм повітря, який обчислений за формулою (4.1) для квартири із однією спальнею та загальною площею $32,8 \text{ м}^2$, становить $11,92$ літрів на секунду. Це відповідає кратності повітрообміну $0,52 \text{ год}^{-1}$.

Відповідно до стандарту EN 15251:2011 оцінка внутрішнього середовища досліджуваної квартири відноситься до II категорії, що відповідає нормальному рівню очікувань. Для розрахунку кратності повітрообміну в репрезентативній квартирі необхідне значення витрати повітря – $0,42$ л/с на квадратний метр [27], яке еквівалентно кратності повітрообміну $0,6 \text{ год}^{-1}$ при внутрішній висоті $2,5 \text{ м}$, що співпадає з табличними значеннями цього стандарту.

Результати енергоспоживання на потреби опалення для квартири за умов нормативного повітрообміну відповідно до національних та міжнародних стандартів наведені в річному (рисунок 4.8) та погодинному (рисунок 4.9) розрізі.

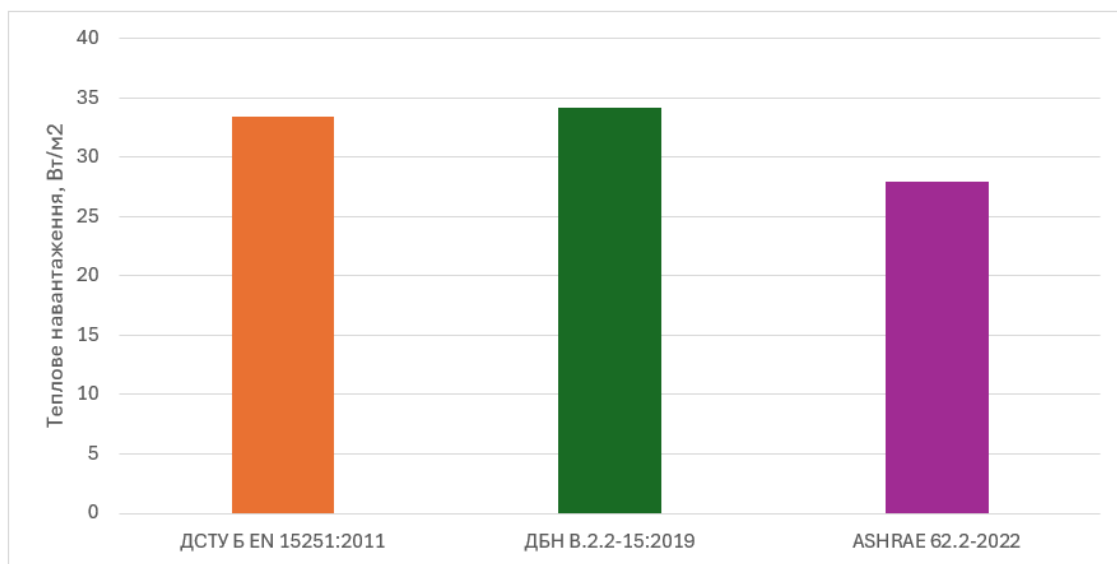


Рисунок 4.8 – Річне теплове навантаження квартири

Для варіанту моделювання відповідно до стандарту ASHRAE 62.2-2022 приймалось розрахункове значення кратності повітрообміну на рівні $0,52 \text{ год}^{-1}$.

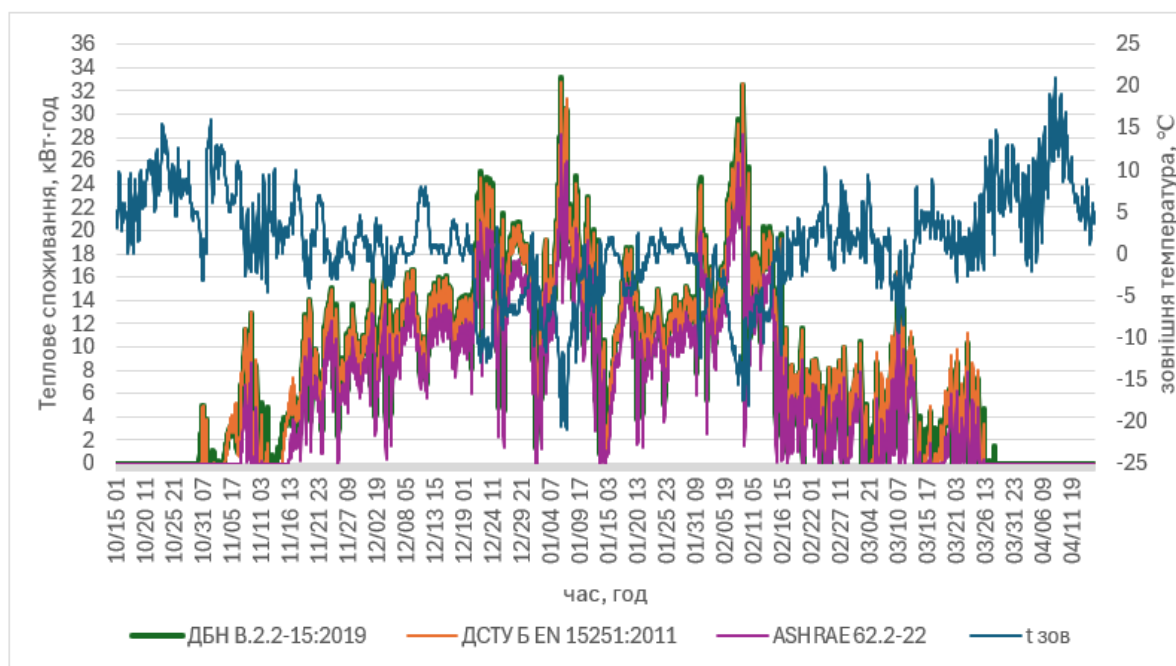


Рисунок 4.9 – Погодинне теплове споживання квартири

Отримані результати демонструють, що величина річного теплового споживання репрезентативною квартирою може значно відрізнятися в залежності від вимог до кратності повітрообміну, які встановлені в різних стандартах.

Зокрема, було виявлено, що при використанні стандарту ДБН В.2.2-15:2019 та ДСТУ Б EN 15251:2011 різниця у річному тепловому споживанні складає 2,4%.

Крім того, при порівнянні стандартів ДБН В.2.2-15:2019 та ASHRAE 62.2-2022 різниця у річному тепловому споживанні досягає 18%. Це свідчить про значну відмінність вимог до кратності повітрообміну, які встановлені в цих стандартах, та їх вплив на енергоспоживання.

Таким чином, вибір стандарту, вимоги до кратності повітрообміну якого будуть використовуватися при розрахунках, може суттєво вплинути на енергоефективність об'єкту.

4.3. Моделювання енергоспоживання будівлі з врахуванням мінливості природного повітрообміну.

На базі експерименту були визначені основні механізми руху повітря в приміщеннях типової квартири в залежності від мінливості зовнішніх умов.

Враховуючи механізми руху повітря встановлено наступну залежність. Якщо свіже повітря заходить зовні в приміщення житлової кімнати та кухні (механізм руху повітря I), воно нагрівається і при переміщенні його в інші приміщення квартири, там енергію на нагрів цього повітря повторно витратити не потрібно. За умов, коли свіже повітря надходить через вентканал (механізм руху повітря II), воно також не потребує нагріву, адже підігрівається безпосередньо у вентиляційному каналі. Тому в роботі було враховано залежності зміни механізму переносу повітря між приміщеннями квартири в залежності від напрямку вітру.

В кліматичному файлі типового року IWEC наведено погодинні дані швидкості та напрямку вітру (рисунок 4.10). Напрямок вітру заданий в градусах. На рисунку 4.11 наведено особливості визначення напрямку вітру відповідно до кута.

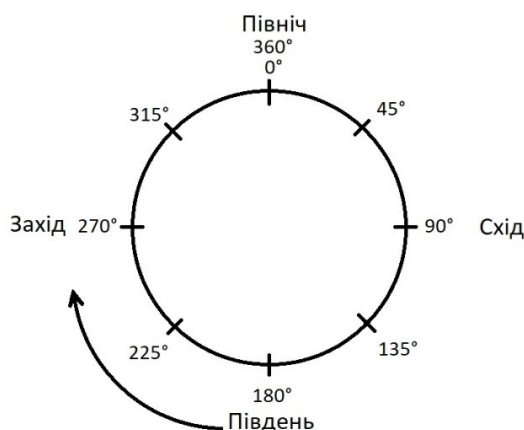
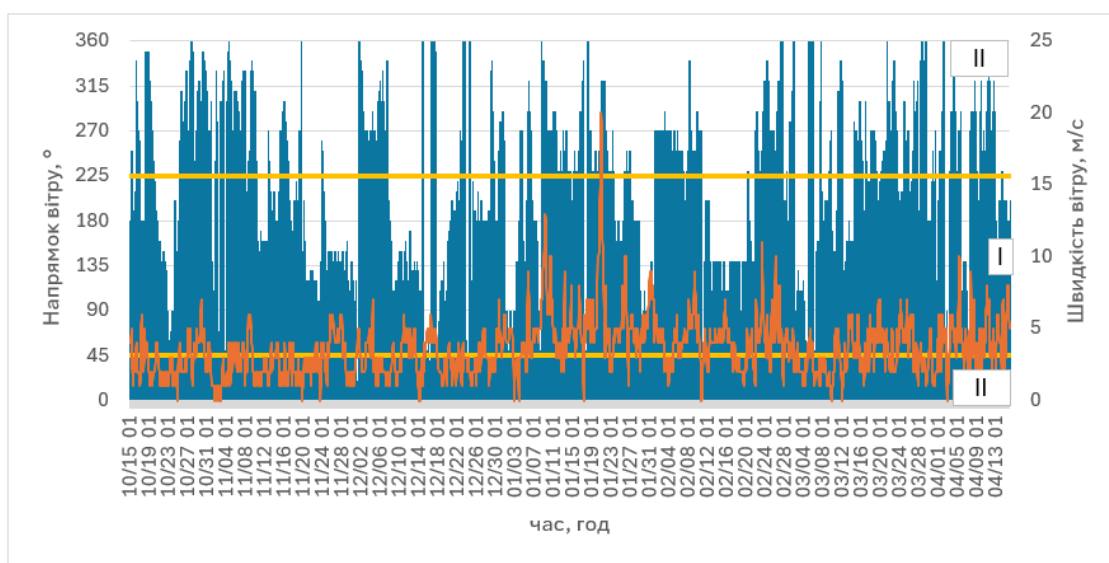


Рисунок 4.10 – Визначення напрямку вітру заданого кутом відповідно до файлу типового року IWEC [4]

Відповідно до експериментальних даних при північно-східному, східному, південно-східному та південно-західному напрямках вітру, переважаючим є явище інфільтрації (механізм руху повітря I) в приміщеннях квартири, зовнішні стіни якої орієнтовані на південь. І навпаки, при західному, північно-західному, північному напрямках вітру або штилі – переважно спостерігалось явище ексфільтрації (механізм руху повітря II). При енергетичному моделюванні відповідно до експериментальних даних кратність повітрообміну задавалась як усереднене значення з погодинним врахуванням напрямку вітру.



I – інфільтрація, II – ексфільтрація

Рисунок 4.11 – Погодинна зміна швидкості та напрямку вітру

В діючих стандартах України [16, 27, 29] напрямок руху повітря ніяк не враховується. Тому, були проведені розрахунки експериментально встановлених рівнів природного повітрообміну за умови, що напрямок/механізм руху припливного повітря в квартирі не враховується.

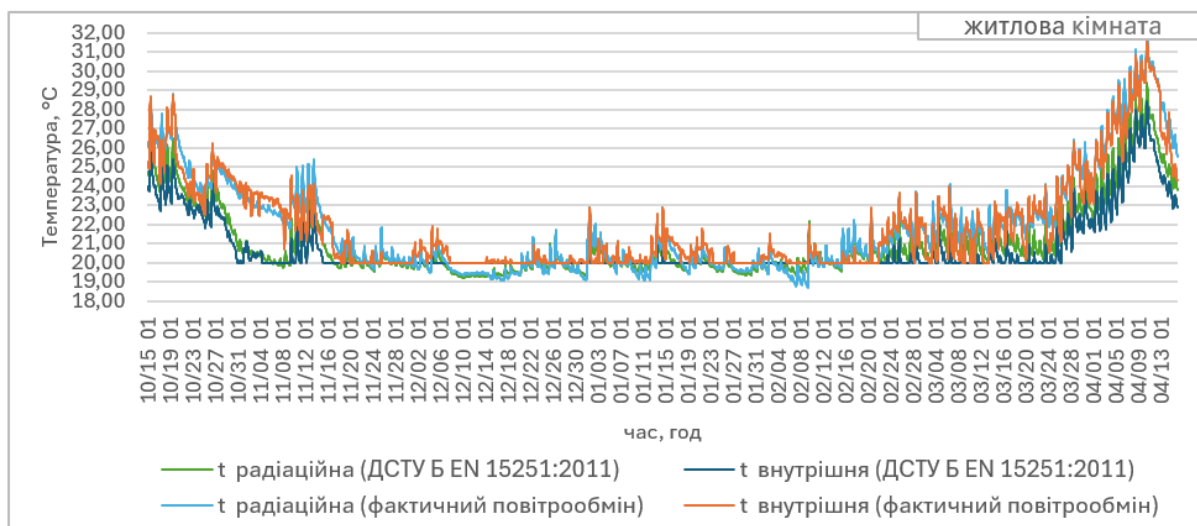
Для порівняння граничних випадків споживання енергії на потреби опалення були розглянуті наступні варіанти:

1) Механізм I – повітря надходить в зону кімнати шляхом інфільтрації (рисунки 2.13 (а)) незмінно протягом всього опалювального періоду (рис.4.13, I(a)) – $78,8 \text{ (кВт}\cdot\text{год)/м}^2$;

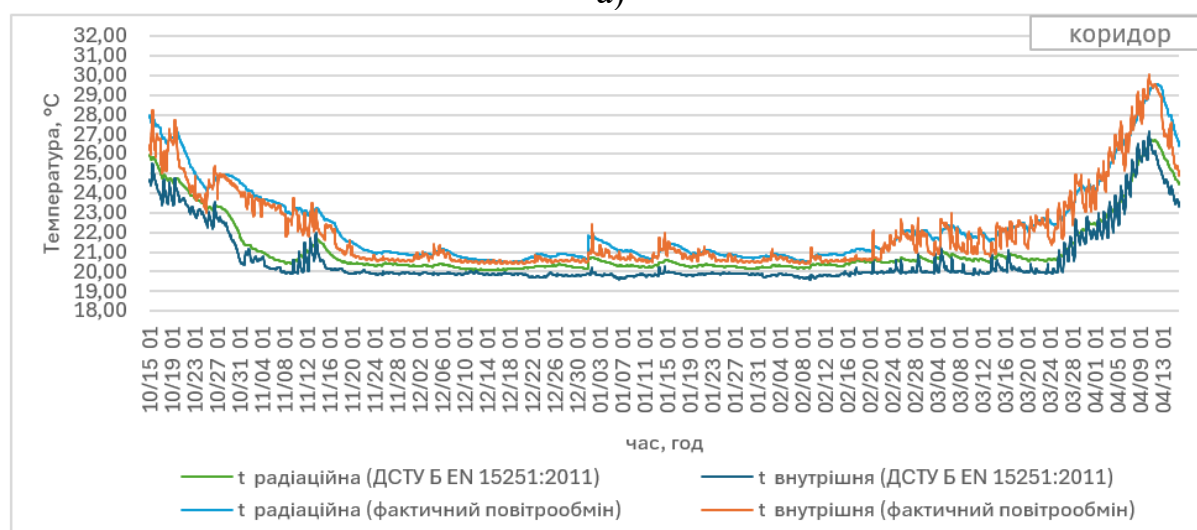
2) Механізм II – повітря надходить в зону кімнати шляхом ексфільтрації (рисунки 2.13 (б)) незмінно протягом всього опалювального періоду (рис.4.13, II(a)) – $23,3 \text{ (кВт}\cdot\text{год)/м}^2$.

Різниця між даними величинами становить 70%, що свідчить про вагомість і важливість врахування напрямку руху повітря в приміщеннях будівлі при розрахунку споживання енергії на потреби опалення.

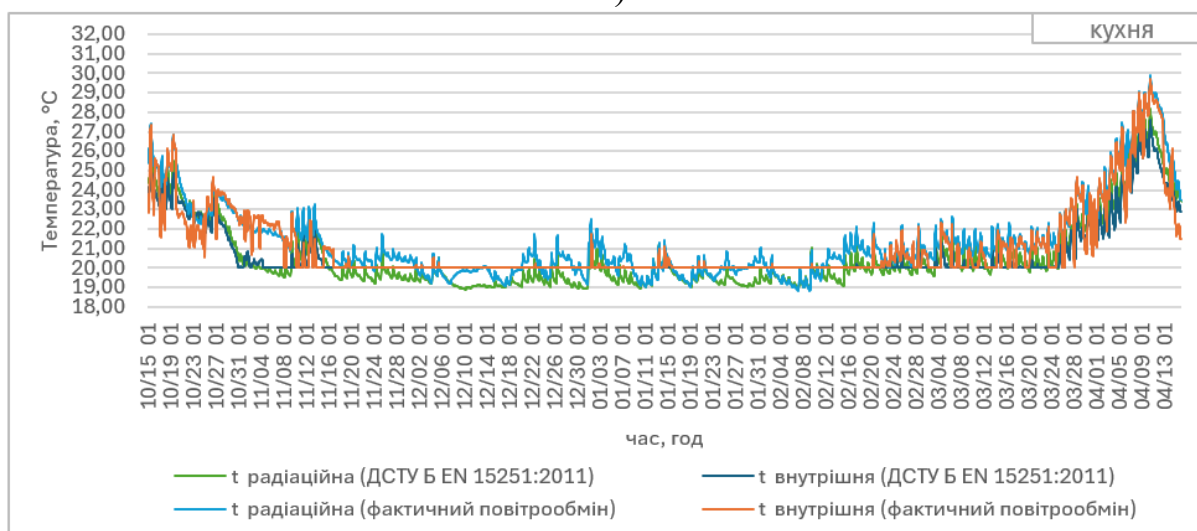
Динаміка внутрішньої та радіаційної температури в репрезентативних кімнатах квартири при використанні постійного значення кратності повітрообміну відповідно ДСТУ Б EN 15251:2011 та фактичного повітрообміну приведена на рисунку 4.12. З графіків на рисунку 4.9 видно, що в періоди міжсезоння були періоди коли опалення вимикалось, але за рахунок високої сонячної активності та високої зовнішньої температури, температура в приміщеннях квартири в цей період зростала, та перевищувала нормативну в $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [27].



а)



б)



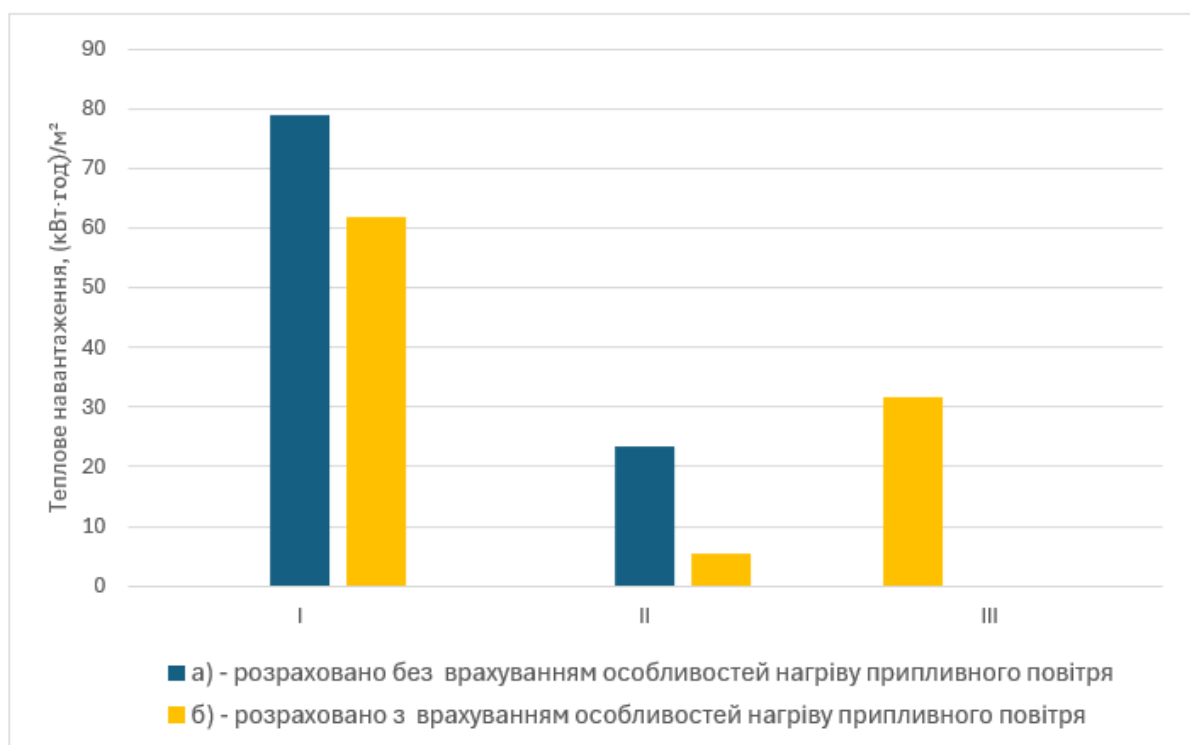
в)

Рисунок 4.12 – Погодинна зміна внутрішньої та радіаційної температури в приміщеннях житлової кімнати (а), коридору квартири (б) та кухні (в)

В розглянутих граничних випадках руху повітря в приміщеннях також враховано особливості нагріву припливного повітря. Тобто випадок, коли зовнішнє повітря, яке надходить в приміщення квартири нагрівається, і при подальшому масопереносі повітря до інших зон (приміщень) квартири енергія на його нагрів не витрачається (рис.4.13, ряд даних (б)). І випадок, коли енергія на нагрів повітря витрачається в кожній зоні квартири (рис.4.13, ряд даних (а)).

В двох крайніх випадках, при врахуванні особливостей нагріву припливного повітря річне теплове споживання репрезентативної квартири для умов інфільтрації протягом всього опалювального періоду зменшиться на 21%, а для умов ексфільтрації протягом всього опалювального періоду зменшиться на 76%.

Також на рисунку 4.13(III) наведено величину теплового навантаження квартири з врахуванням мінливості механізмів руху повітря в часі, в залежності від погодних умов. Дана величина близька до усередненого значення між крайніми випадками і становить $31,6 \text{ (кВт}\cdot\text{год)/м}^2$.



I – механізм інфільтрації незмінно протягом всього опалювального періоду;

II – механізм ексфільтрації незмінно протягом всього опалювального періоду;

III – з врахуванням погодинної зміни природного повітрообміну.

Рисунок 4.13 – Річне теплове навантаження на систему опалення

На рисунку 4.14 наведено результати моделювання енергоспоживання на потреби опалення для репрезентативної квартири з врахуванням рівня природної кратності повітрообміну відповідно до нормативних документів та експериментальних даних.

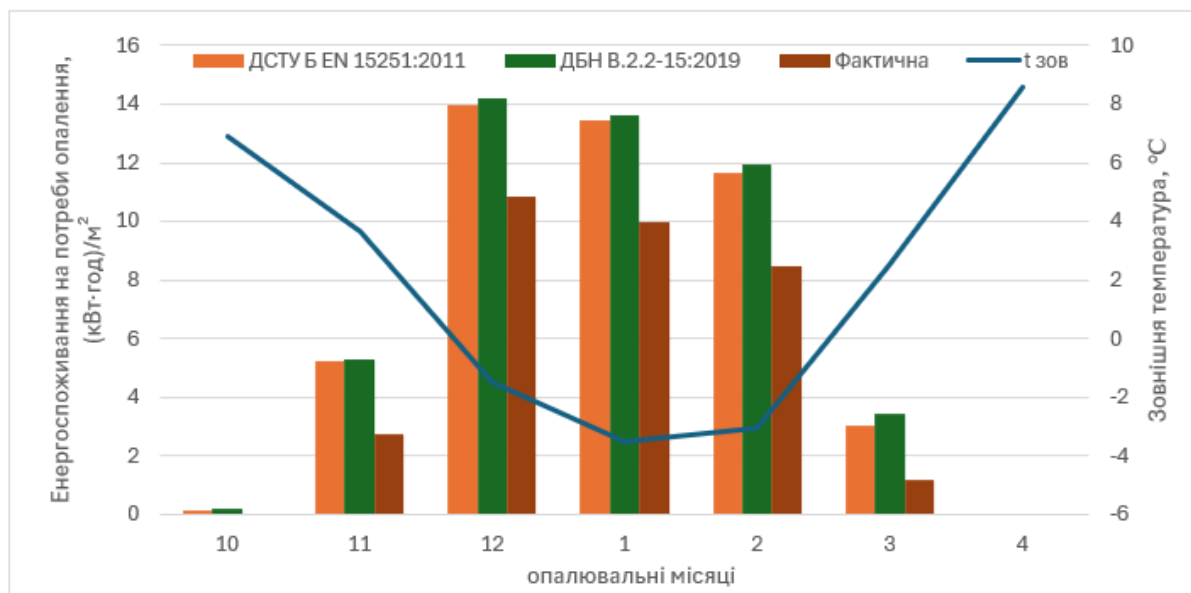


Рисунок 4.14 – Помісячне енергоспоживання на потреби опалення

Згідно з останніми опублікованими даними державної служби статистики України, усереднене за 2016–2020 роки кінцеве енергоспоживання домашніми господарствами в Україні – 15576,8 тис. т н.е. При цьому споживання енергії домогосподарствами на потреби опалення усереднене за 2016–2020 роки становить 44%, що еквівалентно – 6814,2 тис. т н.е.

За результатами енергетичного моделювання, яке було проведене з врахуванням кліматичних даних і тих залежностей, що були визначенні під час експериментів річна економія енергії в порівнянні зі стандартом який використовується при енергетичній сертифікації будівель ДСТУ Б EN 15251:2011 становить 5,4%. В перерахунку відповідно до статистичних даних 2016–2020 років річна економія теплової енергії становить 3,7 млн. Гкал. В порівнянні зі стандартом, який застосовують для умов проектування, реконструкції та капітального ремонту ДБН В.2.2-15:2019 економія становитиме 7,7%, що еквівалентно 5,2 млн. Гкал

Висновки до розділу 4

1. Дана частина дослідження була зосереджена на вивченні впливу режиму повітрообміну на теплове навантаження та енергоспоживання об'єкту. Для цього в програмному забезпеченні DesignBuilder [64] було розроблено 3D-модель будівлі досліджуваної однокімнатної квартири, а в програмному середовищі EnergyPlus [63] було створено динамічну модель квартири, яка була використана для погодинної симуляції. У процесі створення енергетичної моделі, простір квартири був поділений на п'ять зон: житлова кімната, коридор, кухня, ванна кімната та кладова. Модель враховує експлуатаційний режим квартири та внутрішні джерела тепла, такі як люди, освітлення та електрообладнання.

2. В результаті було визначено енергоспоживання на опалення квартири за умови дотримання нормативного повітрообміну, встановленого національними та міжнародними стандартами, а також з врахуванням фактичної кратності повітрообміну визначеної експериментально. За результатами енергетичного моделювання, річна економія енергії з врахуванням фактичних значень природної кратності повітрообміну в різних зонах будівлі становить 5,4% в порівнянні зі стандартом ДСТУ Б EN 15251:2011, а в порівнянні зі стандартом ДБН В.2.2-15:2019 – 7,7%.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить нові науково обґрунтовані результати застосування та подальшого розвитку методів і засобів оцінювання природної кратності повітрообміну в будівлях. У процесі виконання роботи отримано наступні науково-практичні результати:

1. Визначено погодинну кратність повітрообміну в багатоповерховій будівлі з використанням емпіричної методики на основі вдосконаленої методики ASHRAE, яка базується на визначенні різниці тисків від стек ефекту, тиску вітру та загальної різниці тисків в залежності від зміни таких параметрів як температура, напрямок та швидкість вітру. Для будівлі ВНЗ з однокамерними склопакетами в дерев'яних спарених плетіннях значення природної кратності повітрообміну знаходяться в діапазоні від 0,58 до -0,85 год⁻¹ – для південної орієнтації та від 0,59 до -0,76 год⁻¹ – для північної орієнтації.

2. Проведено параметричний аналіз факторів, що впливають на рівень повітрообміну. Проаналізовано зміну концентрації CO₂ в приміщенні в залежності від зміни концентрація CO₂ у припливному повітрі, об'єму припливного повітря та виділень від людей.

3. Проведено експериментальне визначення природної кратності повітрообміну на базі експериментальних вимірювань рівня CO₂ в приміщеннях житлової будівлі та ВНЗ. В результаті проведених досліджень були виділені два напрями повітрообміну: механізми інфільтрації та ексфільтрації. За результатами експерименту визначені величини кратностей повітрообміну для основних досліджуваних приміщень для зимового та літнього періодів. В зимовий період кратність повітрообміну в аудиторіях ВНЗ була на рівні 0,41 год⁻¹, а в літній період в режимі охолодження від 0,37 год⁻¹ до 0,9 год⁻¹. Кратність повітрообміну в зимовий період в квартирі була однаковою і трималась на рівні 0,74 год⁻¹ для житлової кімнати, 0,73 год⁻¹ для коридору, 3,4 год⁻¹ для приміщення кухні, при умовах, коли припливне повітря надходить через вікна і входні двері. Для умов коли припливне повітря надходить через вентиляційний канал і входні двері кратність

повітрообміну для житлової кімнати була на рівні $0,37 \text{ год}^{-1}$, для коридору – $1,06 \text{ год}^{-1}$, для приміщення кухні – $0,57 \text{ год}^{-1}$. Для літнього періоду, визначена кратність повітрообміну для механізму інфільтрації становила $0,57 \text{ год}^{-1}$ для житлової кімнати, $2,34 \text{ год}^{-1}$ для коридору, $2,41 \text{ год}^{-1}$ для приміщення кухні. При ексфільтраційному русі повітря, середня кратність повітрообміну для житлової кімнати була на рівні $0,24 \text{ год}^{-1}$, $0,94 \text{ год}^{-1}$ для коридору, $0,52 \text{ год}^{-1}$ для кухні.

4. На базі динамічної моделі проведено програмний аналіз річного енергоспоживання репрезентативної квартири при врахуванні стандартних та фактичних погодинних значень природної кратності повітрообміну, різниця між якими становить 5,4 %. В цілому для житлового сектору будівель України використання фактичних значень кратності повітрообміну протягом опалювального сезону з врахуванням динаміки зміни умов середовища дозволить досягти економії до 3,7 млн. Гкал.

5. Результати роботи використані ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», ГО «Школа енергоефективності» та відділом енергоменеджменту та екології КПІ ім. Ігоря Сікорського.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. “WHY THE BUILT ENVIRONMENT”. Architecture 2030. Дата звернення: 22 лют. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment/>
2. В. І. Дешко, І. Ю. Білоус, Г. О. Гетманчук, “Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель”, *Енергетика: Економіка, технології, екологія*, т. 4, № 50, с. 67–73, 2017.
3. М. В. Тимофєєв, В. І. Дешко, І. Ю. Білоус та Г. О. Гетманчук, “Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівель в динамічних сіткових моделях.”, *Наука та будівництво*, № 2 (20), с. 62–69, 2019.
4. В. І. Дешко, І. Ю. Білоус та Г. О. Гетманчук, “Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну в багатоповерхових будівлях в умовах мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища”, *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, № 2, с. 68–78, 2019.
5. В. І. Дешко, І. Ю. Білоус та Г. О. Гетманчук, “Дослідження повітрообміну в квартирі на основі експериментального визначення масопереносу CO₂”, *Енергетика і автоматика*, № 3, с. 28–40, 2023.
6. В. І. Дешко, І. Ю. Білоус та Г. О. Гетманчук, “Параметричний аналіз природного повітрообміну в багатоквартирних житлових будівлях”, *Енергетика: Економіка, технології, екологія*, № 4, с. 57–68, 2023.
7. V. Deshko, I. Bilous, V. Vynogradov-Saltykov, M. Shovkaliuk, H. Hetmanchuk, “Integrated approaches to determination of CO₂ concentration and air rate exchange in educational institution”, *Rocznik ochrona srodowiska*, vol. 22(1), pp. 82–104, 2020.
8. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22 червня 2017 р. № 2118-VIII // Верховна Рада України. Відомості Верховної Ради України.

– 2017. – № 33. – Ст. 359. 2024. [Онлайн]. Доступно: https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/zf/zf_reg/arh_zf_reg_u.htm

9. “Концепція державної цільової економічної програми з енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії на 2021 – 2025 роки”, груд. 2020. Дата звернення: 30 груд. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://saee.gov.ua/uk/pressroom/3612>

10. О. І. Яценко, “Енергетичні показники динамічних режимів будівлі та інженерних систем”, дис. докторара філософії в галузі техн. наук, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2023.

11. “European Environmental Agency”. Дата звернення: 29 груд. 2023. [Онлайн]. Доступно: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/unit-consumption-of-space-heating#tab-chart_1

12. В. БЕЗУС. “Енергоефективність передусім”. Економічна правда. Дата звернення: 22 лют. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/12/14/707679/>

13. В. І. Дешко, М. М. Шовкалюк та Ю. С. Кузьміна, “Оцінювання енергетичних показників для нових житлових будівель в Україні з урахуванням соціальних аспектів”, *Енергетика: Економіка, технології, екологія*, № 1, с. 29–37, 2022.

14. І. Ю. Білоус, “Оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища”, дис. канд. техн. наук, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2019.

15. Bilous I.Yu., Deshko V.I., and Sukhodub I.O. "Building energy modeling using hourly infiltration rate" *Magazine of Civil Engineering*, №. 4 (96), 2020, pp. 27 – 41.

16. *Житлові будинки. Основні положення*, ДБН В.2.2-15:2019, Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, Київ, 2019.

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

18. S. J. Emmerich, A. K. Persily, T.P. Dowell. "Impact of infiltration on heating and cooling loads in US office buildings.", *Proceedings of the 26th IEA Conference of the Air Infiltration and Ventilation Center*, 21 – 23 September, Madison, pp.1 – 7, 2005.
19. "Guidelines for Home Energy Professionals Standard Work Specifications". Energy Department. Дата звернення: 1 січ. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://www.energy.gov/scep/guidelines-home-energy-professionals-standard-work-specifications>
20. *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2010, ANSI/ASHRAE, 2012.
21. A. Biler, A.U. Tavit, Y. Su, N. Kha. A, "Review of Performance Specifications and Studies of Trickle Vent.", *Buildings*, vol. 8, pp. 152 – 183, 2018.
22. A. Berge, "Analysis of methods to calculate air infiltration for use in energy calculations", Master's Thesis, Chalmers Univ. Technol., Göteborg, Sweden, 2011.
23. *Energy Performance of Buildings – Ventilation for Buildings – Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics – Module M1-6*, EN 16798-1:2019, CEN, Brussels, 2019.
24. *Енергоефективність будівель. Вентиляція будівель. Частина 3. Вентиляція в нежитлових будівлях. Експлуатаційні вимоги до систем вентиляції та кондиціювання повітря в приміщенні (модулі M5-1, M5-4) (EN 16798-3:2017, IDT)*, ДСТУ EN 16798-3:2019, ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», Київ, 2019.
25. *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*, ASHRAE 62.1-2022, ANSI/ASHRAE, Atlanta, Georgia, 2022.
26. *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings*, ASHRAE 62.2-2022, ANSI/ASHRAE, Atlanta, Georgia, 2022.
27. *Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики (EN 15251:2007, IDT)*, ДСТУ Б EN 15251:2011. Держ. підприємство "Укрархбудінформ", Київ, 2012.

28. *Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання*, ДСТУ 9190:2022, ДП НДІБК, Київ, 2022.

29. *Опалення, вентиляція та кондиціонування*, ДБН В.2.5-67:2013, Мінрегіон України, Київ, 2013.

30. В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, І.О. Суходуб, О.І. Яценко, “Аналіз впливу розподілення повітрообміну між кімнатами на енергоспоживання квартири”, *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №1(63). с. 39 – 50, 2021.

31. *Будинки і споруди. Заклади освіти*, ДБН В.2.2-3-2018, Український зональний науково-дослідний і проектний інститут по цивільному будівництву, 2018.

32. R. Almeida, M. Pinto, P. Pinho, L. Lemos, “Natural ventilation and indoor air quality in educational buildings: experimental assessment and improvement strategies”, *Energy Efficiency*, vol. 10, pp. 839-854, 2017, doi: 10.1007/s12053-016-9485-0

33. V. Leivo, T. Prasauskas, Du, L., Turunen, M., Kiviste, M., Aaltonen, A. Haverinen-Shaughnessy, “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*, vol. 621, pp. 398–406, 2018.

34. K. Myroniuk, Y. Furdas, V. Zhelykh, Y. Yurkevych, “Examining Wind Flow's Impact on Multi-Storey Buildings: A Quest for Quality Improvement”, *Production Engineering Archives*, vol. 30, pp. 57-66, 2024

35. Goopyo Hong, Byungseon Sean Kim, “Field measurements of infiltration rate in high rise residential buildings using the constant concentration method”, *Building and Environment*, vol. 97, pp. 48 – 54, 2016.

36. D. Laussmann та D. Helm, *Air Change Measurements Using Tracer Gases: Methods and Results. Significance of Air Change for Indoor Air Quality*. London: IntechOpen LTD, 2011. Дата звернення: 30 груд. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.5772/1030>

37. J. Few, C. Elwell, “Applying the CO₂ concentration decay tracer gas method in long-term monitoring campaigns in occupied homes: identifying appropriate unoccupied

periods and decay periods.”, *International Journal of Building Pathology and Adaptation ahead-of-print*, vol. 41(1), pp.96 – 108, 2021, doi: 10.1108/IJBPA-05-2021-0077

38. S. Shi, C. Chen, B. Zhao, “Air infiltration rate distributions of residences in Beijing.”, *Building and environment*, vol. 92., pp. 528–537, 2015.

39. M. H. Sherman, I. S. Walker, M. Lunden, “Uncertainties in Air Exchange using Continuous-Injection, Long-Term Sampling Tracer-Gas Methods.”, *International journal of ventilation*, vol. 13(1), pp. 13-27, 2014, doi: 10.1080/14733315.2014.11684034

40. A. Sfakianaki, K. Pavlou, M. Santamouris, I. Livada, M.N. Assimakopoulos, P. Mantas, A. Christakopoulos, “Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece”, *Building and Environment*, vol. 43 (4), pp. 398-405, 2008

41. L. Du, T. Prasauskas, V. Leivo, M. Turunen, M. Pekkonen, M. Kiviste, A. Aaltonen, D. Martuzevicius, U. Haverinen-Shaughnessy, “Assessment of indoor environmental quality in existing multi-family buildings in North-East Europe”, *Environment international*, vol. 79. pp. 74–84, 2015.

42. Shanshan Shi, Chen Chen, Bin Zhao, “Air infiltration rate distributions of residences in Beijing”, *Building and Environment*, vol. 92, pp 528 – 537, 2015.

43. P.L. Cheng, X. Li, “Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou”, *Energy and Buildings*, vol. 164, pp. 219 – 225, 2018.

44. S. Goubran, D. Qi, W.F. Saleh, L. Wang, “Comparing methods of modeling air infiltration through building entrances and their impact on building energy simulations”, *Energy and buildings*, vol. 138, pp. 579–590, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.071

45. Yamamoto N, Shendell DG, Winer AM, Zhang J. “Residential air exchange rates in three major US metropolitan areas: results from the Relationship Among Indoor, Outdoor, and Personal Air Study 1999 – 2001”, *Indoor Air*. vol. 20(1), pp. 85 – 90, 2010, doi: 10.1111/j.1600-0668.2009.00622.x

46. V. Földvály, G. Bekö, S. Langer, K. Arrhenius, D. Petráš, “Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia”, *Building and environment*, vol. 122, pp. 363–372, 2017.

47. C. Howard-Reed, L. A. Wallace, W. R. Ott, “The effect of opening windows on air change rates in two homes”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 52(2), pp. 59-147, 2002.

48. “ASHRAE position document on indoor carbon dioxide”, лют. 2022. Дата звернення: 1 січ. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://www.ashrae.org/search?q=ASHRAE%20Position%20Document%20on%20Indoor%20Carbon%20Dioxide>

49. C.H. Halios, C.G. Helmis, K. Deligianni, S. Vratolis, K. Eleftheriadis, “Determining the ventilation and aerosol deposition rates from routine indoor-air measurements”, *Environmental monitoring and assessment*, vol. 186(1), pp.151-163, 2013.

50. G. Bekö, T. Lund, F. Nors, J. Toftum, G. Clausen, “Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children”, *Building and environment*, vol. 45(10), pp. 2289–2295, 2010.

51. M. Sherman, “Analysis of errors associated with passive ventilation measurement techniques”, *Building and environment*, vol. 24 (2), pp. 131–139, 1989.

52. C. Pok Lun, L. Xiaofeng, “Air change rate measurements using tracer gas carbon dioxide from dry ice”, *International Journal of Ventilation*, vol. 13(3), pp. 235 – 245, 2014, doi:10.1080/14733315.2014.11684051

53. R. Przekop, “Oxygen transport in human alveolar sacs”, *Chemical engineering transactions*, vol. 24, pp. 565–570, 2011. doi:10.3303/CET1124095

54. S. Vilcekova, L. Meciarova, E. K. Burdova, D. Kosicanova, S. Doroudiani, “Indoor environmental quality of classrooms and occupants' comfort in a special education school in Slovak Republic”, *Building and Environment*, vol. 120, pp. 29-40, 2017.

55. S. Vilcekova, Z. Budaiova, “Productivity and indoor environmental quality in offices”, *International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2015*, vol. 1(4), pp. 993–1000, 2015.

56. S. R. Thom, V. M. Bhopale, J. Hu, M. Yang, “Inflammatory responses to acute elevations of carbon dioxide in mice”, *Journal of applied physiology*, № 123(2), 297–302, 1895

57. S. R. Thom, V. M. Bhopale, J. Hu, M. Yang, “Increased carbon dioxide levels stimulate neutrophils to produce microparticles and activate the nucleotide-binding domain-like receptor 3 inflammasome”. *Free Radical Biology and Medicine*: 106:406–416, 2017, doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2017.03.005

58. P. Strøm-Tejsen, D. Zukowska-Tejsen, P. Wargocki, D. Wyon, “The effects of bedroom air quality on sleep and next-day performance”, *Indoor Air*, vol. 26(5), pp. 679–686, 2015, doi:10.1111/ina.12254

59. P. Kapalo, O. Voznyak, “Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode”, *Journal of civil engineering, environment and architecture*, vol. 62(4/15), pp. 201–210, 2016, doi: 10.7862/rb.2015.189

60. V. Deshko, I. Bilous, I. Sukhodub, O. Yatsenko, “Analysis of the influence of air exchange distribution between rooms on the apartment energy consumption”, *Power engineering: Economics, technique, ecology*, vol. 1, pp. 39-50, 2021, doi: 10.20535/1813-5420.1.2021.242133

61. Wei, W., P. Wargocki, J. Zirngibl, J. Bendžalová, and C. Mandin, “Review of parameters used to assess the quality of the indoor environment in Green Building certification schemes for offices and hotels”, *Energy and Buildings*, vol 209, 109683, 2020, doi:10.1016/j.enbuild.2019.109683

62. Wei, W., O. Ramalho, and C. Mandin, “Indoor air quality requirements in green building certifications”, *Building and Environment*, vol. 92, pp.10–19, 2015, doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.035

63. “EnergyPlus”. Дата звернення: 7 груд. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://energyplus.net/>

64. “DesignBuilder”. Дата звернення: 7 груд. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://designbuilder.co.uk/>

65. L. Ng, A. Persily, S. Emmerich, “Improving infiltration modeling in commercial building energy models”, *Energy and Buildings*, vol. 88, pp. 316-323, 2015, doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.078

66. Z. O'Neill, Y. Li, H. Cheng, X. Zhou, “Energy savings and ventilation performance from CO₂ -based demand controlled ventilation: Simulation results from ASHRAE RP-1747 (ASHRAE RP-1747)”, *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 26(2), pp. 1-20, 2019.

67. CONTAM Introduction. NIST. URL: <https://www.nist.gov/el/energy-and-environment-division-73200/nist-multizone-modeling/software/contam> (date of access: 02.03.2024).

68. *Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія*, ДСТУ-Н Б В.1.1–27: 2010, ДП НДІБК, Київ, 2011

69. S. Sayadi, G. Tsatsaronisb, T.A Morosuk, “New Approach for Applying Dynamic Exergy Analysis and Exergoeconomics to a Building Envelope”, *The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact of Energy Systems (ECOS)*, June 19-23, 2016, Portorož, Slovenia.

70. International Weather for Energy Calculations [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR .

71. A. Mechouet, T. Mouhib, A. Balhamri, E. M. Ouali, “Evaluating the impact of air infiltrations on the thermal and energy performances for different types of dwellings in casablanca city”, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, vol. 8, pp. 793-800, 2018.

72. A. Biler, A.U. Tavit, Y. Su, N. Kha. A, “Review of Performance Specifications and Studies of Trickle Vent”, *Buildings*, vol. 8. pp. 152-183, 2018.

73. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2013 ASHRAE handbook : fundamentals. Atlanta, GA : ASHRAE, 2013.

74. *Теплотехнічні характеристики будівель. Визначення повітропроникності будівель. Метод випробувального тиску (EN ISO 9972:2015,*

IDT; ISO 9972:2015, IDT), ДСТУ EN ISO 9972:2022, Технічний комітет стандартизації ТК 302 «Енергоефективність будівель і споруд», Київ, 2022.

75. *Standard guide for using indoor carbon dioxide concentrations to evaluate indoor air quality and ventilatio. Replaces ASTM D6245-12 ; effective from 2023-06-01. Official edition. West Conshohocken, PA : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2018.*

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*, vol. 132, pp. 837–842, 2017.

77. L. Stabile, M. Dell'Isola, A. Russi, A. Massimo, G. Buonanno, “The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools”, *Science of the Total Environment*, vol. 595, pp. 894–902, 2017.

78. Україна, Міністерство охорони здоров'я України. *Наказ Міністерства охорони здоров'я України, Про затвердження Санітарного регламенту для закладів загальної середньої освіти.*

79. Deshko, V., Bilous, I., Sukhodub, I., Yatsenko, O. “Експериментальне дослідження якості повітря та повітрообміну в закладах освіти та житлових будівлях”, *Мехатронні системи. Енергоефективність та Ресурсозбереження*, № 4(148). с. 25–34, 2020.

80. “Sinoptik”. Дата звернення: 23 груд. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://ua.sinoptik.ua/>

81. “Roomtodo”. Дата звернення: 13 груд. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://roomtodo.com/planner>

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель”, Енергетика: Економіка, технології, екологія, т. 4, № 50, с. 67–73, 2017. **(фахове видання)**
2. М. Тимофєєв, В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівель в динамічних сіткових моделях.”, Наука та будівництво, № 2 (20), с. 62–69, 2019. **(фахове видання)**
3. В. І. Дешко, І. Ю. Білоус та Г. О. Гетманчук, “Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну в багатоповерхових будівлях в умовах мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища”, Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, № 2, с. 68–78, 2019. **(фахове видання)**
4. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Дослідження повітрообміну в квартирі на основі експериментального визначення масопереносу CO₂”, Енергетика і автоматика, № 3, с. 28–40, 2023. **(фахове видання)**
5. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Параметричний аналіз природного повітрообміну в багатоквартирних житлових будівлях”, Енергетика: Економіка, технології, екологія, № 4, с. 57–68, 2023. **(фахове видання)**
6. V. Deshko, I. Bilous, V. Vynogradov-Saltykov, M. Shovkaliuk, H. Hetmanchuk, “Integrated approaches to determination of CO₂ concentration and air rate exchange in educational institution”, Rocznik ochrona srodowiska, vol. 22, № 1, pp. 82–104, 2020. **(іноземне видання, включене до бази даних Scopus)**
7. I. Bilous and H. Hetmanchuk, “Use of climatic databases for determining the energy need of heat buildings”, Scientific Results of 2017, Vinnitsa, Ukraine, Dec. 15, 2017. Vinnitsa, 2017, pp. 14–16.

8. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Бази кліматичних і погодних даних для визначення енергетичних характеристик будівель”, Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених "Буд-майстер-клас-2017", Київ, Україна, 1 груд. 2017. Київ: КНУБА, 2017, с. 256–257.

9. М. Тимофєєв, В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Розрахунок в динамічних сіткових моделях погодинної кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівель”, Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція-2019»», Київ, Україна, 26 квіт. 2019. Київ: КНУБА, 2019, с. 26–27.

10. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Визначення кратності повітрообміну в залежності від зовнішніх та внутрішніх факторів”, Міжнародна студентська науково-технічна конференція "Природничі та гуманітарні науки. актуальні питання.", Тернопіль, Україна, 27 квіт. 2018. Тернопіль: ТНТУ, 2018, с. 81–82.

11. І. Білоус та Г. Гетманчук, “Розрахунок кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівлі”, Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» II тур, Маріуполь, Україна, 25 берез. 2019. Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2019, с. 7.

12. В. Дешко, І. Білоус, І. Суходуб та Г. Гетманчук, “Моделювання обтікання зовнішнім повітрям будівель середньої поверховості”, Міжнародна науково-практична конференція пам’яті професора Віктора Михайловича Синькова "Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнології та автоматики в АПК", Київ, Україна, 19 груд. 2019. Київ: НУБіП, 2019, с. 160–161.

13. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Динамічні моделі для визначення енергопотреби на охолодження будівель”, Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, Київ, Україна, 27 квіт. 2018. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018, с. 184.

14. І. Білоус та Г. Гетманчук, “Розрахунок кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівлі”, Всеукраїнська науково-технічна конференція

«Енергетика. Екологія. Людина», Київ, Україна, 25 квіт. 2019. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2019, с. 26–31.

15. В. Дешко, І. Білоус та Г. Гетманчук, “Експериментальне дослідження якості повітря в багатоквартирному житловому будинку сімейного типу”, XI міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», Чернігів, Україна, 27 трав. 2021. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021, с. 148–149.

16. І. Білоус та Г. Гетманчук, “Експериментальне дослідження повітрообміну з урахуванням масопереносу CO_2 в квартирі”, XX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених і студентів (присвячена 125-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та 90-річчю НН ІАТЕ (ТЕФ)) "Сучасні проблеми наукового забезпечення", Київ, Україна, 25 квіт. 2023. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023, с. 222–223.

ДОВІДКА

впровадження результатів дисертаційної роботи аспірантки
кафедри теплової та альтернативної енергетики
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ГЕТМАНЧУК ГАННИ ОЛЕКСАНДРІВНИ

Результати дисертаційної роботи Гетманчук Г.О. були використані при розробці навчальних матеріалів для програм, розроблених Громадською Організацією “Школа енергоефективності”, що стосуються питань, пов’язаних з підвищенням енергоефективності будівель. Автором було досліджено вагомість впливу природної кратності повітрообміну на енергоспоживання будівлі на базі динамічних моделей.

Розвинуті у роботі сучасні підходи до аналізу енергетичних показників будівель з врахуванням механізмів руху повітря та затрат енергії на його нагрів використовуються також в діяльності Громадської Організації “Школа енергоефективності” під час підготовки та реалізації проектів з енергоефективності в будівлях закладів вищої освіти. Запропоновані підходи до створення енергетичних моделей розширюють можливості для оперативного ухвалення обґрунтованих технічних рішень та підвищення енергоефективності будівель.

Даний документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова правління

ГО «Школа Енергоефективності»



Вячеслав Лісовик

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД, ТЕРИТОРІЙ
ТА ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
(МІНІІНФРАСТРУКТУРИ)



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) 249-38-00, (050) 415-36-22
www.niisk.com; e-mail: ndibk@ndibk.gov.ua; niisk-office@ndibk.gov.ua; код ЄДРПОУ 02495431

09.04.2024 № 100-501

ДОВІДКА

впровадження результатів дисертаційної роботи аспірантки кафедри теплової та
альтернативної енергетики Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ГЕТМАНЧУК ГАННИ ОЛЕКСАНДРІВНИ

В дисертаційній роботі Гетманчук Г.О. проведено аналіз сучасних методів
визначення енергетичних показників будівель і підходів до визначення
повітрообміну в них.

Проведені експериментально-розрахункові дослідження динаміки зміни
рівня вуглекислого газу в житлових приміщеннях під впливом природного
повітрообміну для врахування руху повітря між приміщеннями та затрат енергії
на його нагрів. Запропоновано нові підходи до визначення мінімального
повітрообміну, з урахуванням динаміки експлуатаційних особливостей будівель
та з забезпеченням вимог щодо рівня вуглекислого газу в повітрі приміщень.

Результати зазначених наукових досліджень використовуються ДП
«Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» при розробці
сучасних стандартів щодо визначення природної кратності повітрообміну в
житлових будівлях.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор ДП НДІБК,
голова ТК 302
«Енергоефективність будівель і споруд»
докт. техн. наук, проф.



Г.Г. ФАРЕНЮК

Проректор
з адміністративної роботи
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»



Вадим КОНДРАТЮК
2024 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи аспірантки кафедри теплової та
альтернативної енергетики Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ГЕТМАНЧУК ГАННИ ОЛЕКСАНДРІВНИ

В дисертаційній роботі Гетманчук Г.О. удосконалено підхід до створення енергетичних моделей будівель, шляхом одночасного врахування динаміки експлуатаційних особливостей житлового приміщення та рівня природного повітрообміну. Для будівель кампусу КПІ ім. Ігоря Сікорського створено динамічну модель будівлі для дослідження теплового стану та енергетичних показників житлової будівлі кампусу, що дозволяє проводити прогноз опалення з врахуванням зміни фактичного рівня кратності повітрообміну. Експериментально досліджено величину природного повітрообміну та якість повітря в навчальних корпусах та гуртожитках КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Результати зазначених наукових досліджень використовуються відділом енергоменеджменту та екології КПІ імені Ігоря Сікорського при розробці методів аналізу прогнозування енергопотреби будівель, оцінці якості повітря та рівня повітрообміну в будівлях кампусу.

Даний документ не є підставою для фінансових розрахунків.

В.о. начальника відділу
енергоменеджменту та екології

Дмитро ЯЦЕНКО