

УДК 620.9

^{1,2}ДЕШКО В. І., ^{1,3}БІЛОУС І. Ю., ¹ГУРЄЄВ М. В.

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

²Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна

³Інститут загальної енергетики НАН України, Україна

ВЕНТИЛЯЦІЯ ЯК СКЛАДОВА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ДИНАМІЧНОГО БАЛАНСУ В БУДІВЛЯХ

Мета. Дослідження спрямоване на аналіз динамічного енергетичного моделювання будівель з використанням програмного забезпечення EnergyPlus та DesignBuilder. Основна мета полягає в оцінці енергетичної ефективності, повітряної якості та енергетичного балансу будівель з врахуванням різноманітних аспектів, таких як повітрообмін та динамічні зміни в температурі та вологості.

Методика. В роботі використовувались програми EnergyPlus та DesignBuilder для створення детальних динамічних моделей будівель. Основна увага приділялась моделюванню повітрообміну та вивченню енергетичного балансу. Різні алгоритми моделювання повітрообміну порівнювались для визначення їх впливу на енергетичну ефективність.

Результати. Досліджено енергетичні потоки в будівлях на основі динамічних енергетичних балансів для періоду опалення. Проведено поглиблений аналіз впливу повітрообміну в динамічних енергетичних балансах досліджуваної кімнати житлової будівлі.

Наукова новизна. Це дослідження пропонує новий погляд на динамічне енергетичне моделювання будівель, розширюючи знання в цій галузі через спрямовану увагу на аспекти повітрообміну та енергетичного балансу. Результати внесуть важливий вклад у розвиток підходів до підвищення енергоефективності, створюючи нові можливості для практичного застосування в інженерному проектуванні та будівельній експлуатації.

Практична значимість. Отримані результати є важливим внеском для інженерів та проектувальників, розробляючи стратегії зменшення енергоспоживання та оптимізації енергетичного споживання будівель. Дослідження може слугувати вказівником для практичного впровадження динамічного моделювання в плануванні та експлуатації будівель для досягнення оптимальної енергоефективності.

Ключові слова: динамічне моделювання будівель; повітрообмін; тепловий баланс; енергетична ефективність; споживання енергії.

Вступ. Енергоефективність будівель – це одна з найбільш актуальних проблем сьогодення. За даними Міжнародного агентства з енергетики, на будівлі припадає близько 40% світового енергоспоживання і викидів в атмосферу [1]. Україна не є винятком - існуючий будівельний фонд країни потребує реабілітації, щоб зменшити витрати на енергію та викиди CO₂.

Один з інструментів для досягнення енергоефективності будівель – це енергетичне моделювання, яке дозволяє оцінити енергетичну ефективність будівель та ідентифікувати можливості для їх поліпшення. Крім того, енергетичне моделювання дозволяє проводити різні сценарії та визначати найбільш оптимальні рішення з точки зору енергоефективності. Це може включати зміни в дизайні будівель, оптимізацію систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, а також встановлення енергоефективного обладнання.

Традиційні розрахунки базуються на аналізі статичних енергетичних характеристик будівель. Однак сучасний підхід до дослідження включає в себе моделювання в динаміці, яке дозволяє враховувати зміни в часі та ідентифікувати динаміку енергетичних процесів в будівлі.

Моделювання в динаміці надає можливість вивчати взаємодію між різними системами будівлі в реальному часі. Це означає, що дослідники можуть досліджувати, як зміни в одній

системі впливають на інші [2], а також аналізувати реакцію будівлі на зовнішні чинники, такі як зміни погодних даних, графіків експлуатації будівлі. Режимів опалення/охолодження, тощо.

Однією з основних переваг моделювання в динаміці є можливість розробляти більш точні та реалістичні стратегії для підвищення енергоефективності будівель. Дослідники можуть експериментувати з різними сценаріями, шукаючи оптимальні рішення щодо зменшення споживання енергії [3, 4] та викидів.

Таким чином, енергетичне моделювання в динаміці є важливим інструментом для розуміння та поліпшення енергоефективності будівель. Дослідники можуть використовувати програми, такі як EnergyPlus [6] та DesignBuilder [7], для створення детальних моделей будівель та дослідження їхньої енергетичної продуктивності в реальному часі. Це допомагає розробляти стратегії зниження витрат на енергію та зменшення впливу будівлі на навколишнє середовище.

Тепловтрати через повітрообмін, або інфільтрацію, представляють значущий внесок у загальні тепловтрати будівлі. Цей процес відбувається через непередбачувані шляхи, такі як щілини, тріщини та інші нещільності в конструкціях будівлі. Низька ефективність інфільтрації може призводити до великих втрат тепла, що впливає на енергоефективність і, відповідно, на витрати на опалення.

Для визначення і керування цими тепловтратами застосовують методи моделювання та аналізу повітрообміну. Енергетичні моделі можуть враховувати параметри, такі як швидкість вітру, ефективна площа протікання, коефіцієнт інфільтрації та інші фактори, щоб оцінити вплив інфільтрації на тепловий баланс будівлі.

Ефективне управління повітрообміном може значно підвищити енергоефективність будівель, зменшити витрати на опалення та кондиціонування повітря і сприяти створенню комфортних умов для життя та роботи. Врахування тепловтрат через інфільтрацію у динамічних моделях будівель дозволяє реалістично оцінювати їхні впливи на енергетичну ефективність і розробляти стратегії для їхнього зменшення.

Одним з ключових факторів, що впливає на енергоефективність будівель, є явище теплових перетоків між зонами з різними теплофізичними характеристиками [5]. Це явище виникає через різницю в температурі, вологості та інших параметрах між зонами. Дослідження цих перетоків є важливим для забезпечення енергоефективності будівель та зниження витрат на енергію.

В цьому контексті енергетичне моделювання в динаміці є ключовим інструментом для розуміння і виявлення перетоків теплової енергії в будівлях та для прогнозування енергетичної ефективності будівель. Для проведення досліджень здебільшого використовуються програми EnergyPlus [6] та DesignBuilder [7], які дозволяють створити детальну модель будівлі та визначити її енергетичні характеристики. У результаті можна розробити стратегії зниження енергоспоживання та витрат на енергію, що сприятиме забезпеченню енергоефективності будівель.

Постановка завдання. Мета статті полягає в розв'язанні ключової проблеми енергоефективності будівель шляхом вдосконалення методів енергетичного моделювання в динаміці. Під час огляду сучасних досліджень виявлено недоліки в розумінні впливу повітрообміну на тепловий баланс будівель. Об'єктом даного дослідження є аналіз взаємозв'язку між динамічним моделюванням, повітрообміном та тепловим балансом. Також розглядається вплив кліматичних особливостей на енергетичну ефективність будівель. Отже, стаття пропонує новий підхід до розуміння та оптимізації взаємодії цих факторів для досягнення вищого рівня енергоефективності будівель.

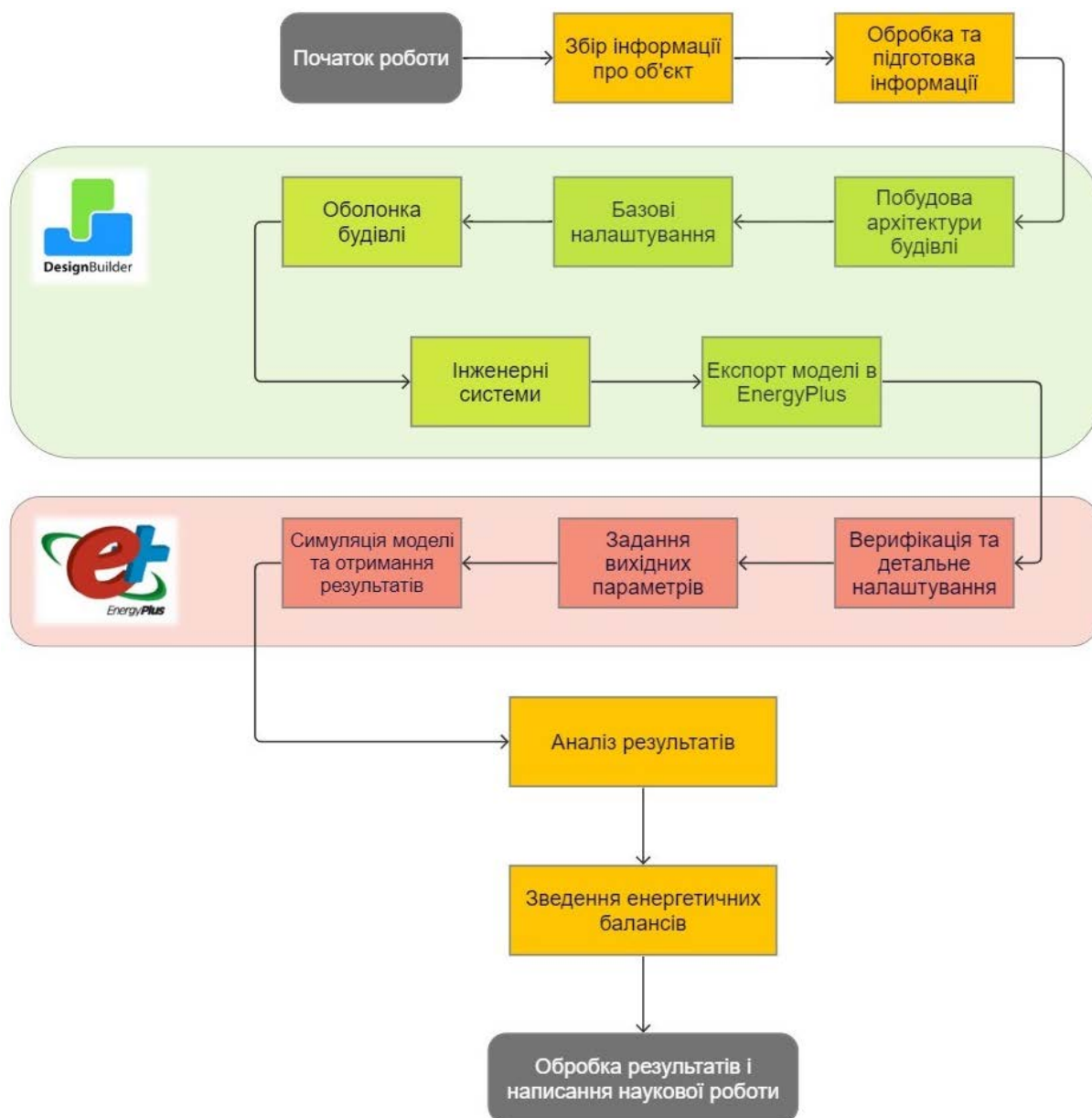


Рис. 1. Блок-схема алгоритму створення енергетичної моделі

Опис моделі. Етапи реалізації енергетичного моделювання будівель (рис. 1):

1. *Збір інформації про об'єкт.* Інспекція об'єкту дослідження: розташування та кліматична інформація про об'єкт, призначення будівлі, поверхові плани, фотофіксація та замір конструктивних елементів будівлі, інформація про систему опалення будівлі (джерело опалення, тип системи), інформація, про системи кондиціонування, вентиляції, водопостачання, освітлення, кількість людей, що проживає у будівлі, середній вік та соціальний статус.

2. *Обробка та підготовка інформації.* Побудова поверхових планів будівлі, розрахунок теплофізичних характеристик конструкцій будівлі (зовнішні та внутрішні стіни, світлопрозорі конструкції та двері, горизонтальні перекриття, підлога, дах).

3. *Побудова архітектури будівлі.* Побудова 3D моделі будівлі в програмному забезпеченні DesignBuilder на основі зібраної інформації.

4. *Базові налаштування.* Задання інформації про розташування, кліматичні дані, орієнтацію та призначення будівлі.

5. *Оболонка будівлі.* Налаштування матеріалів конструкцій будівлі, їх теплофізичних характеристик.

6. *Інженерні системи.* Налаштування систем опалення, вентиляції, кондиціонування, освітлення, водопостачання, обладнання (побутові прилади та інженерні системи).

7. *Експорт моделі в EnergyPlus.*

8. *Верифікація та детальне налаштування.* Перевірка введених даних експортованої моделі, більш детальне налаштування досліджуваних характеристик.

9. *Задання вихідних параметрів.* Визначити досліджувані теплові зони і елементи та їх вихідні параметри.

10. *Симуляція моделі та отримання результатів.*

11. *Аналіз результатів.*

12. *Зведення енергетичних балансів.*

DesignBuilder – це програмне забезпечення, що використовується для проектування, моделювання та аналізу енергоефективності будівель. Це інструмент для інтегрованого проектування будівель, який дозволяє виконувати аналіз енергоспоживання та визначати оптимальні стратегії для забезпечення енергоефективності.

Основні можливості DesignBuilder [7]:

Створення 3D-моделей будівель. За допомогою DesignBuilder можна створити детальну 3D-модель будівлі з усіма необхідними елементами, такими як стіни, вікна, двері, дахи, опалення та кондиціонування повітря, освітлення та ін.

Визначення енергетичної ефективності. DesignBuilder дозволяє визначити енергетичну ефективність будівлі, використовуючи різні аналітичні моделі та алгоритми. За допомогою програми можна визначити енергоспоживання будівлі, оцінити рівень комфорту для користувачів та визначити оптимальні стратегії для зниження енергоспоживання та витрат на енергію.

Оптимізація будівельних систем. DesignBuilder дозволяє виконувати оптимізацію систем опалення, кондиціонування повітря та інших систем, що дозволяє забезпечити оптимальний рівень комфорту для користувачів та знизити витрати на енергію.

Створення звітів. DesignBuilder дозволяє створювати звіти з результатами аналізу енергоефективності будівлі, які містять детальну інформацію про енергоспоживання та оптимальні стратегії для забезпечення енергоефективності.

Крім основних функцій моделювання, DesignBuilder також може допомогти в створенні 3D-моделі будівлі та початковому налаштуванні параметрів. Ця програма дозволяє користувачам зручно та швидко створювати реалістичну 3D-модель будівлі, додавати вікна, двері та інші елементи інтер'єру. Також DesignBuilder має можливість експортувати модель в EnergyPlus, що дозволяє подальше детальне моделювання та аналіз енергоефективності будівлі. EnergyPlus є одним з найбільш потужних та широко використовуваних інструментів для моделювання енергоефективності будівель. EnergyPlus дозволяє досліджувати та аналізувати перетоки теплової енергії між зонами з різними тепловими умовами.

Для дослідження була взята існуюча 12 поверхова будівля 1993 року забудови. Об'єкт розташований у Солом'янському районі у м. Києві. Будівля була побудована за індивідуальним проектом. У будівлі 175 квартир з загальною кількістю житлових кімнат 431.

Стіни будівлі самонесучі виконані з керамічної пустотілої цегли. На фасаді присутне клаптикове утеплення проведене за індивідуальною ініціативою власників квартир. Вікна металопластикові з подвійним склінням в своїй більшості (80%) проте в деяких квартирах

зустрічаються й однокамерні металопластикові або вікна з дерев'яними рамами (20%). Опір теплопередачі зовнішніх стін будівлі – $1,122 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$.

Горизонтальні перекриття між квартирами прийнято з залізобетонної плити 220 мм, оштукатуреної з однієї сторони, облаштоване звукоізоляцією та підлоговим перекриттям. Опір теплопередачі перекриття – $0,572 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$.

Внутрішні міжкімнатні стіни прийняті з цегляної кладки, товщиною 125 мм (півцегли), оштукатурені з обох сторін. Опір теплопередачі перекриття – $0,402 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$. Характеристики оболонки будівлі представлені на рис. 2.

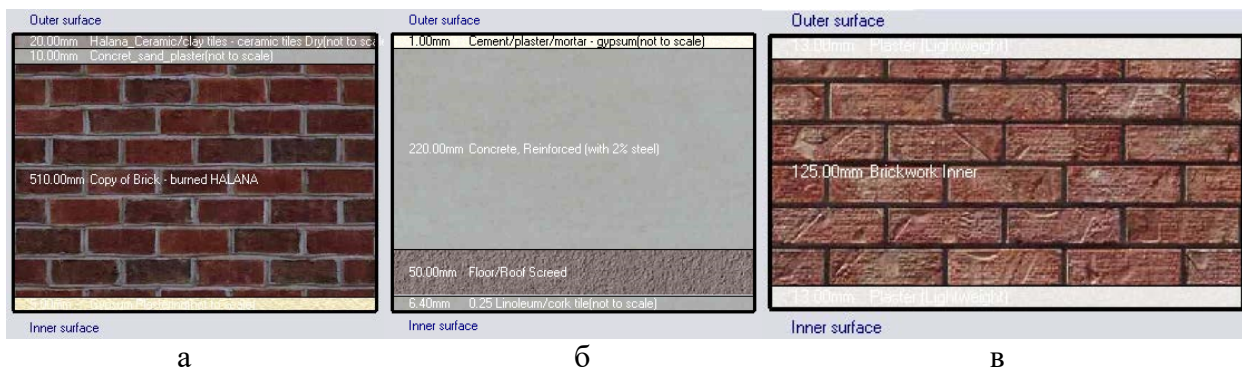


Рис. 2. Склад огорожувальних конструкторських кімнати:
а – зовнішніх стін; б – внутрішнього горизонтального перекриття;
в – внутрішніх стін між квартирами

Для проведення досліджень було обрано репрезентативну кімнату в одній із центральних квартир на 4-му поверсі і прилеглі до неї приміщення. На рис. 3 представлено 3Д-модель будівлі та її план.

Створена динамічна модель будівлі враховує враховувати погодинні сонячні тепло надходження в зону будівлі, рівень повітрообміну, втрати через оболонку будівлі, акумуляцію тепла в огороженнях, тощо. В розглянутій моделі внутрішні джерела теплонадходження від освітлення, обладнання та людей не задавалися.

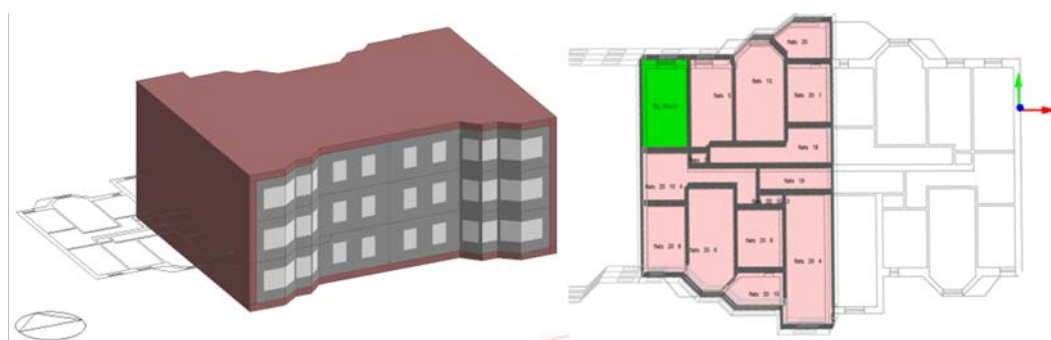


Рис. 3. Вигляд 3D моделі та поверхового планування

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

Аналізувалися кліматичні дані з міжнародного погодинного погодного файлу IWEC для м. Київ [8] (International Weather for Energy Calculation). В рамках дослідницького проекту

RP-1015 U.S. National Climatic Data Center були створені кліматичні файли типового року International Weather for Energy Calculations (IWEC) для ряду міст. Процедура отримання даних була заснована на виборі типового року протягом 18-річної послідовності погодних даних. Погодинні значення з файлу IWEC [8] включають в себе температуру сухого термометра, відносну вологість, швидкість та напрям вітру, барометричний тиск, пряму (виражена через direct normal) та розсіяну сонячну радіацію на горизонтальну поверхню (diffuse horizontal) тощо. Кліматичний файл представляє значення для погодинних інтервалів. Середня температура зовнішнього повітря в IWEC вища за стандарт [9], що обумовлюється різними часовими інтервалами, які були використані для створення кліматичних даних типового року (рис. 4). В зимовий період середньомісячна температура повітря згідно з IWEC на $0,84^{\circ}\text{C}$ вища за ДСТУ «Будівельна кліматологія» [9], а в літні місяці вища на $1,83^{\circ}\text{C}$.

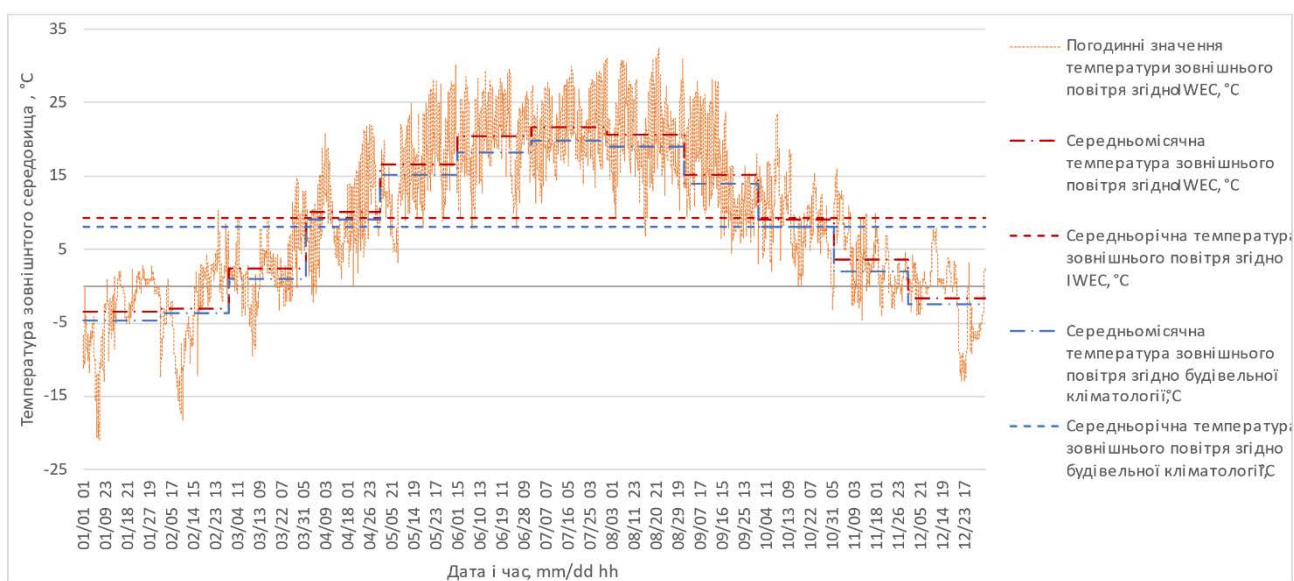


Рис. 4. Температура зовнішнього повітря

Результати дослідження. Теплонадходження від системи опалення можна розділити на дві частки: радіаційну (Radiant) та конвективну (Convective):

- Baseboard Radiant Heating Rate (Інтенсивність радіаційного потоку системи опалення);
- Baseboard Convective Heating Rate (Інтенсивність конвекційного потоку системи опалення).

Теплові надходження та втрати поверхонь стін кімнати характеризують теплообмін між повітрям у кімнаті та відповідною стіною. Їх також можна поділити на складові (рис. 5):

- Surface Inside Face Convection Heat Gain Rate (Інтенсивність конвекційних теплових надходжень до внутрішньої поверхні);
- Surface Inside Face Net Surface Thermal Radiation Heat Gain Rate (Інтенсивність радіаційних теплових надходжень до внутрішньої поверхні від інших поверхонь);
- Surface Inside Face System Radiation Heat Gain Rate (Інтенсивність радіаційних теплових надходжень до внутрішньої поверхні від системи опалення).

Теплові втрати через вікно поділяються на потік через раму та через прозору частину вікна, який в свою чергу поділяється на конвекційний (Surface Window Inside Face Glazing Zone Convection Heat Gain Rate) та інфрачервоний (Surface Window Inside Face Glazing Net Infrared Heat Transfer Rate) потоки.

В дослідженні динамічних енергетичних балансів будівлі з використанням програмного продукту EnergyPlus, можливо розділити навантаження на інженерні системи будівлі та теплові втрати на окремі складові, що дозволяє складати та аналізувати тепловий баланс будівлі.

Основні складові навантаження, які присутні у досліджуваній моделі:

- Тепловтрати через зовнішню стіну
- Теплові перетоки через внутрішні огорожувальні конструкції (стіни, стеля, підлога)
- Тепловий потік через вікно
- Сонячні теплонадходження.
- Тепловтрати через інфільтрацію
- Теплонадходження від системи опалення.

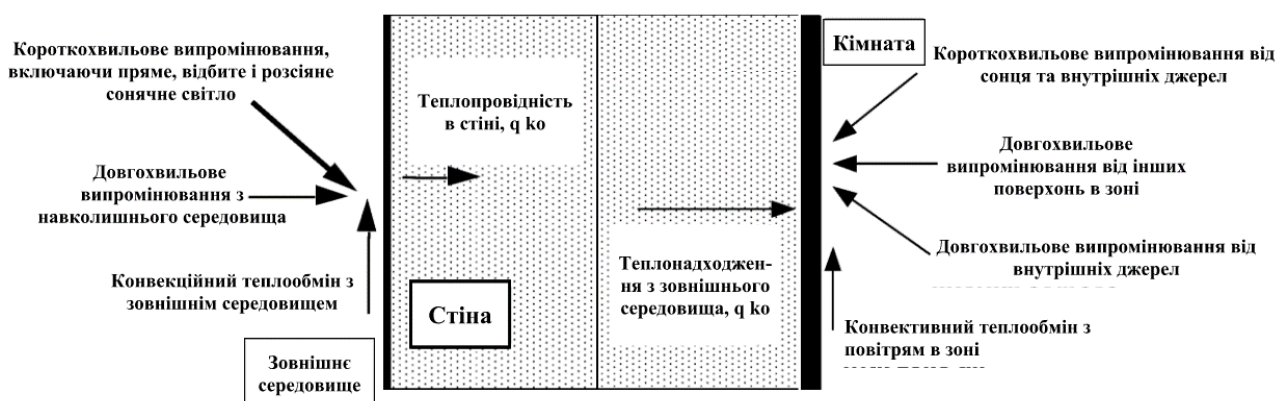


Рис. 5. Теплові потоки через зовнішню стіну будівлі

Повітрообмін, виконує важливу роль у дослідженні та аналізі енергетичної ефективності будівель. Повітрообмін впливає на якість повітря в приміщенні, комфортні умови для життя та роботи людей, а також на енергетичну ефективність опалювання та кондиціонування. Варто зазначити, що на підігрів вентиляованого повітря взимку затрачається значна частина енергії. Яка затрачається будівлями на потреби опалення [10].

EnergyPlus [6] дозволяє врахувати повітрообмін за допомогою різних алгоритмів, щоб передбачені програмою. Кожен алгоритм має свої особливості та використовується в залежності від доступних даних та потреб дослідження. Деякі алгоритми зосереджені на інфільтрації, яка відбувається через щілини та тріщини в будівельних елементах, таких як двері та вікна. Інші алгоритми моделюють вентиляцію, що залежить від швидкості вітру та природної конвекції.

Кожен алгоритм має свої вхідні параметри та розрахункові формули, що використовуються для визначення обсягу повітря, що проникає в будівлю або видаляється з неї. Деякі алгоритми базуються на заданих обсягах потоку повітря, тоді як інші використовують фізичні властивості будівельних елементів та зовнішні умови для розрахунку.

Використання цих алгоритмів дозволяє моделювати повітрообмін в будівлі з урахуванням різних факторів, таких як температура, вологість, швидкість вітру та фізичні властивості будівельних матеріалів. Це дозволяє інженерам отримати детальну оцінку енергетичної ефективності будівель та прийняти відповідні рішення для їх вдосконалення. Основні алгоритми розрахунку повітрообміну в будівлях:

1. ZoneInfiltration:DesignFlowRate: Цей алгоритм використовує заданий розрахунковий об'єм потоку повітря для моделювання інфільтрації в приміщенні. Використовується, коли відома або задана конкретна величина потоку повітря, яку треба врахувати в моделі.

2. ZoneInfiltration:EffectiveLeakageArea: Цей алгоритм використовує ефективну площу проникання для моделювання інфільтрації в приміщенні. Ефективна площа проникання визначається на основі фізичних характеристик будівельних елементів і зовнішніх умов, таких як температура, вологість та швидкість вітру.

3. ZoneInfiltration:FlowCoefficient: Цей алгоритм використовує коефіцієнт пропускної здатності для моделювання інфільтрації в приміщенні. Коефіцієнт пропускної здатності визначається на основі розрахункових значень потоку повітря та різних параметрів, таких як різниця температур, різниця вологості та площа поверхні будівельних елементів.

4. ZoneVentilation:DesignFlowRate: Цей алгоритм використовує заданий розрахунковий об'єм потоку повітря для моделювання вентиляції приміщення. Використовується, коли відома або задана конкретна величина потоку повітря, яку треба врахувати в моделі.

5. ZoneVentilation:WindandStackOpenArea: Цей алгоритм використовує площу відкритих вікон і прорізів для моделювання вентиляції приміщення, що виникає внаслідок дії вітру та природного конвекційного потоку. Враховується вплив швидкості вітру, розмірів вікон і прорізів, а також інших параметрів, що впливають на повітряний потік.

6. ZoneAirBalance:OutdoorAir: Цей алгоритм використовує різницю між зовнішнім повітрям та внутрішнім повітрям для моделювання вентиляції приміщення. Враховується заданий обсяг зовнішнього повітря, який потрібно введення або витягнути з приміщення з метою підтримки балансу повітря.

У цьому дослідженні використана модель інфільтрації DesignFlowRate [6], яка до нормативного/заданого значення кратності повітрообміну додає надбавку, яка залежить від внутрішніх та зовнішніх умов середовища (для теплого періоду ця розбіжність менша, а холодного періоду більша) (формула 1). Саме тому, за результатами моделювання інфільтрація вище, ніж задана або константа, яка часто використовується у розрахунках за стандартами [11]. Особливо в опалювальний період, коли різниця температур може значно варіюватися. Такий розкид спричинений, більшою мірою, змінами в погодних умовах, від яких залежить температура, густина, вологість повітря.

$$\text{Інфільтрація} = (I_{\text{пр}})(F_{\text{графік}})[A + B |T_{\text{вн}} + T_{\text{зовн}}| + C (\text{Шв. Вітру}) + D (\text{Шв. Вітру}^2)], \quad (1)$$

де $I_{\text{пр}}$ – це проектне значення інфільтрації, яке вводиться в модель. Воно визначає очікуваний потік повітря через інфільтрацію при стандартних умовах;

$F_{\text{графік}}$ – фактор відображає графік роботи будівлі та його вплив на інфільтрацію. Він враховує зміни в інфільтрації в залежності від часу і дня тижня. Цей фактор може бути заданий користувачем або враховуватись автоматично;

$T_{\text{вн}}$ – температура повітря всередині приміщення;

$T_{\text{зовн}}$ – температура зовнішнього повітря;

Шв. Вітру – швидкість вітру згідно кліматичних даних;

А, В, С і D – коефіцієнти встановлюються для розрахунку інфільтрації. Вони корегують різні фактори впливу на інфільтрацію (температури внутрішнього і зовнішнього середовищ, швидкості вітра).

На рис. 6 представлено графік зміни кратності повітрообміну пов'язаної з природною вентиляцією.

На рис. 6 наведено рівень повітрообміну, який задається при налаштуванні моделей/в розрахунку за [12], для житлових будівель допускається $0,6 \text{ год}^{-1}$. Відповідно, до формули (1)

при погодинному розрахунку (коригуванні) заданого значення кратності повітрообміну протягом опалювального періоду змінюється в діапазоні 0,59...0,69 год⁻¹.

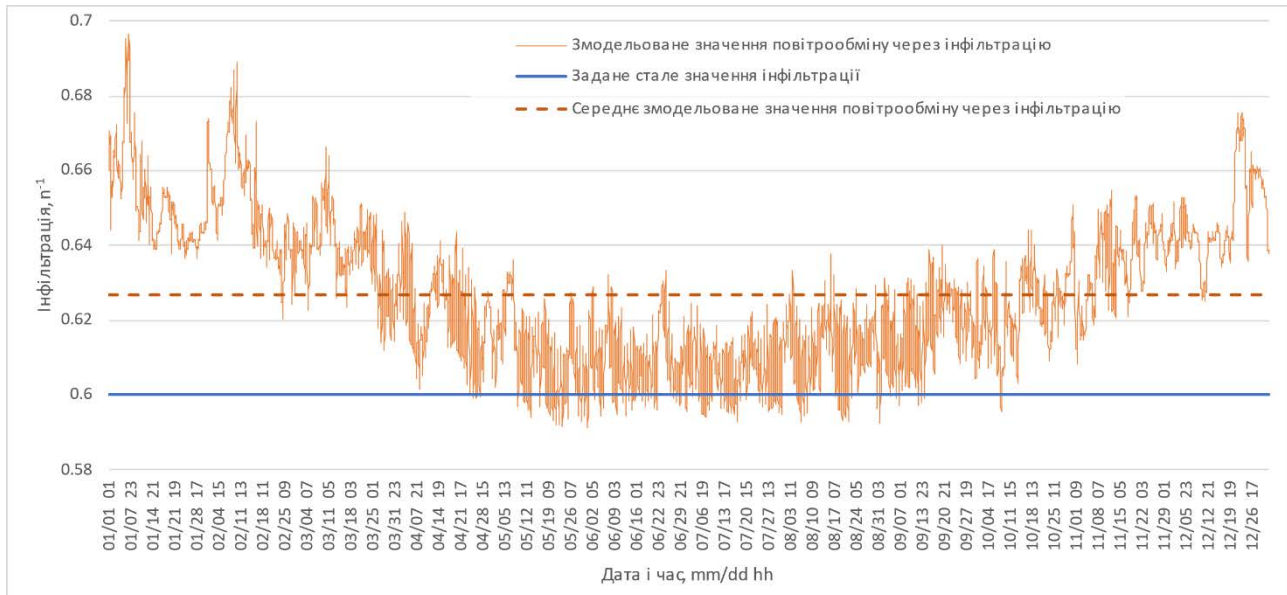


Рис. 6. Кратність повітрообміну

У статті представлено порівняння тепловтрат з інфільтрацією, розраховані за допомогою середньомісячних температур з будівельної кліматології [9], з тепловтратами, розрахованими за допомогою температур з енергетичної моделі [13], та змодельованими значеннями інфільтрації (Air Heat Balance Outdoor Air Transfer Rate) [6]. На рис. 7 представлено тепловий потік з природною складовою повітрообміну для погодинних інтервалів розрахунку розрахованих на основі формули 2 та модельного розрахунку в програмному середовищі EnergyPlus.

$$Q_{inf} = 0,337nV(t_{int} - t_{ext}), \quad (2)$$

де Q_{inf} – тепловтрати з природною вентиляції, Вт,
 n – кратність повітрообміну, год⁻¹;
 V – об’єм приміщення, що вентилюється, м³;
 t_{int} – внутрішня температура повітря в приміщенні, °С;
 t_{ext} – зовнішня температура повітря, °С.

З рис. 7 слідує, що основним фактором, що впливає на зростання тепловтрат в зимовий період, це збільшення різниці температур між внутрішнім та зовнішнім повітрям. Також інфільтрація може посилюватися через виникнення стак ефекту – це явище, яке виникає, коли тепле повітря в середині будівлі піднімається вгору і виходить через вентиляційні отвори або витоки, створюючи низький тиск у нижніх поверхах. Це спричиняє засмоктування холодного повітря ззовні через двері, вікна або інші прогалини [13, 14]. Аналіз відхилення тепловтрат через інфільтрацію з використанням середньомісячних зовнішніх температур за двома джерелами кліматологічних даних для м. Київ [8, 9] становить -0,68% для холодного періоду року.

Тепловтрати, розраховані за допомогою температур з енергетичної моделі, дали більш якісну оцінку тепловтрат через інфільтрацію в порівнянні зі значеннями, розрахованими за допомогою середньомісячних температур зовнішнього повітря.

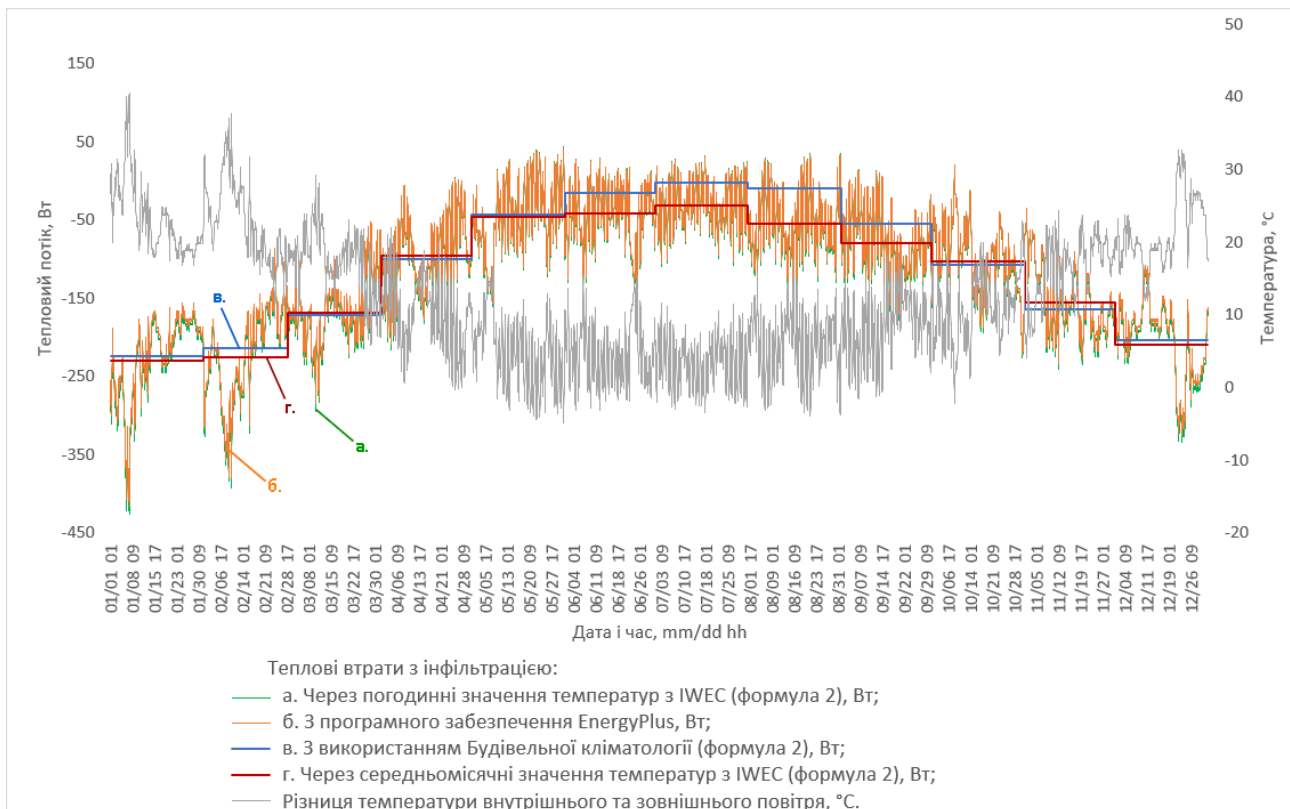


Рис. 7. Тепловий потік з природною складовою повітрообміну

Рівняння теплового балансу для внутрішнього повітря:

$$Q_{\text{огор.к}} + Q_{\text{сон}} + Q_{\text{с.оп}} + Q_{\text{вн.т}} + Q_{\text{вент}} = 0.$$

Рівняння теплового балансу для огорожень:

$$Q_{\text{огор.к}} = Q_{\text{з.ст}} + Q_{\text{вікн}} + Q_{\text{вн.ст1}} + Q_{\text{вн.ст2}} + Q_{\text{вн.ст3}} + Q_{\text{ст}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{накопичення}} + Q_{\text{інф}};$$

$$Q_{\text{вн.т}} = Q_{\text{люд}} + Q_{\text{обл}};$$

$$Q_{\text{вент}} = Q_{\text{вент.мех.}} + Q_{\text{вент.нат.}} = 0;$$

$$Q_{\text{люд}} = 0;$$

$$Q_{\text{обл}} = 0,$$

де $Q_{\text{огор.к}}$ – тепловий потік через огорджувальні конструкції кімнати;

$Q_{\text{сон}}$ – теплові надходження від сонця;

$Q_{\text{вн.т}}$ – теплові надходження від внутрішніх джерел;

$Q_{\text{вент}}$ – теплові надходження або втрати через систему вентиляції;

$Q_{\text{з.ст}}$ – тепловий потік через зовнішні стіни кімнати;

$Q_{\text{вікн}}$ – тепловий потік через світлопрозорі конструкції кімнати;

$Q_{\text{вн.ст1}}, Q_{\text{вн.ст2}}, Q_{\text{вн.ст3}}$ – тепловий потік через внутрішні стіни кімнати;

$Q_{\text{ст}}$ – тепловий потік через стелю кімнати;

$Q_{\text{п}}$ – тепловий потік через підлогу кімнати;

$Q_{\text{накопичення}}$ – тепла енергія, що накопичується у стіні в моменті часу;

$Q_{\text{інф}}$ – теплові надходження або втрати через інфільтрацію;

$Q_{\text{с.оп}}$ – теплові надходження від системи опалення;

$Q_{\text{люд}}$ – теплові надходження від людей;

$Q_{\text{обл}}$ – теплові надходження від обладнання;

$Q_{\text{вент.мех.}}$ – теплові надходження/втрати через природню систему вентиляції;
 $Q_{\text{вент.нат.}}$ – теплові надходження/втрати через механічну систему вентиляції.

На рис. 8 представлено енергетичні покоти складових балансу по повітря в приміщені для подинних інтервалів, на прикладі лютого. Відповідно до даних погодніх файлу IWEC [8] серед трьох зимових місяців для лютого характерно найнижча температура (до мінус 16°C) та найвища сонячна активні, тому даний місяць був обраний як репрезентативний.

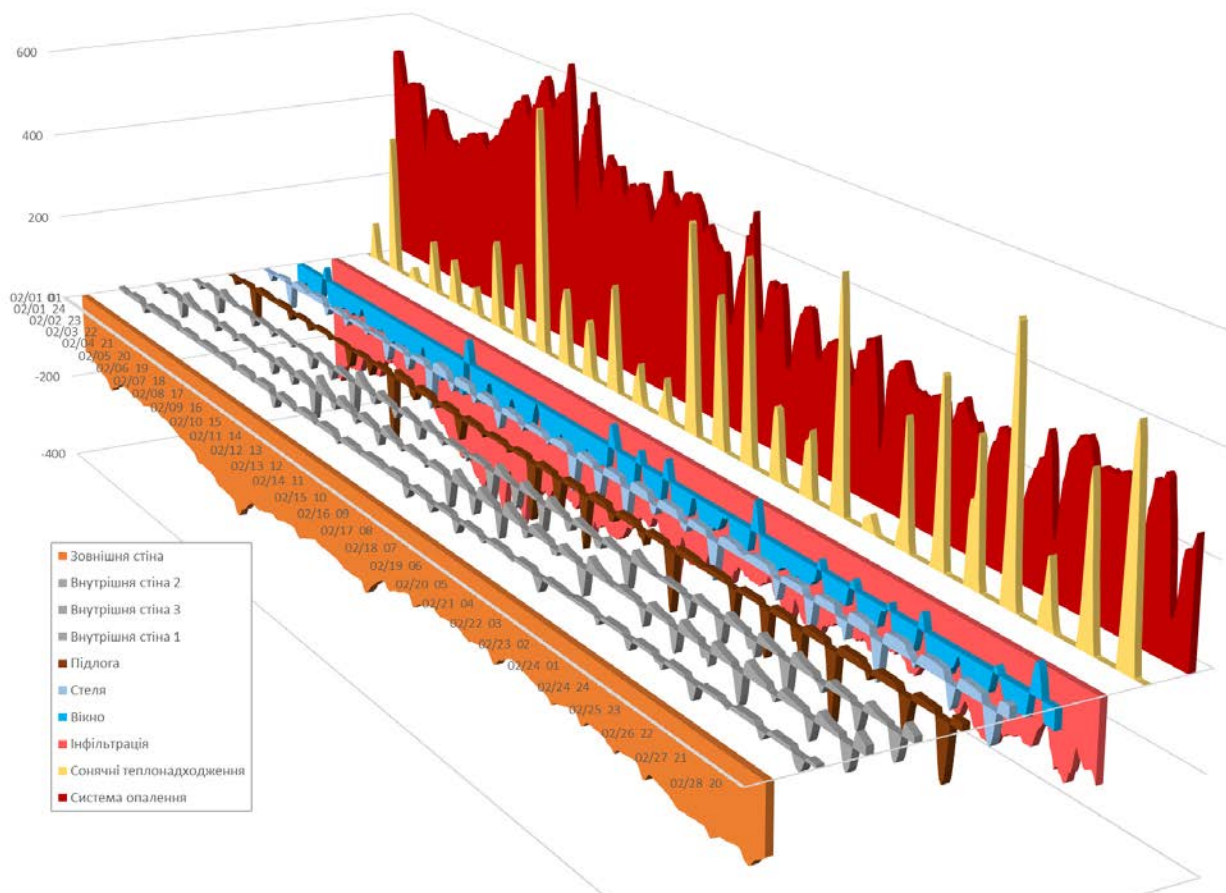


Рис. 8. Тепловий баланс

На рис. 8 проілюстровано, що для розглянутого місяця (лютого) характерні теплові потоки з кімнати (втрати) для зовнішніх огорожень та вентиляційна складова. Для внутрішніх огорожень (внутрішні стіни, підлогу та стелю) характерні схожі тенденції зміни теплових потоків, які в свою чергу залежать від теплового потоку від сонячних тепло надходжень. Тепловий потік через світлопрозорі елементи огорожень для більшої частини розглянутого часового періоду характерні від'ємні значення, для коротких проміжків часу світлопрозорі елементи огорожень у періоди пікової сонячної активності слугують як пасивні системи опалення (характерний додатній тепловий потік).

На рис. 9 представлено детальний баланс однієї години для денного та нічного часу доби.

З рис. 9 видно, що навантаження на систему опалення для денного періоду доби за рахунок сонячних тепло надходжень знижується порівняно з нічним періодом. Наведені на рис. 9 енергетичні потоки для різних періодів доби розраховані для незначних добових коливань зовнішньої температури (майже не змінна зовнішня температура протягом доби). В

денний період доби тепловий потік від вікна направлений в зону кімнати, що обумовлено сонячними теплонадходженнями. Внутрішні огорожувальні конструкції в денний період доби акумулюють тепло, а в нічний період доби віддають в зону будівлі. Так, рівень опалення в розглянутий денний момент на 40% менший, ніж у нічний. А загальний рівень теплонадходжень більш ніж на 30% вищий за рахунок сонячних теплонадходжень. Більше третини теплонадходжень в денний момент часу іде на нагрівання внутрішніх стін, підлоги та стелі.

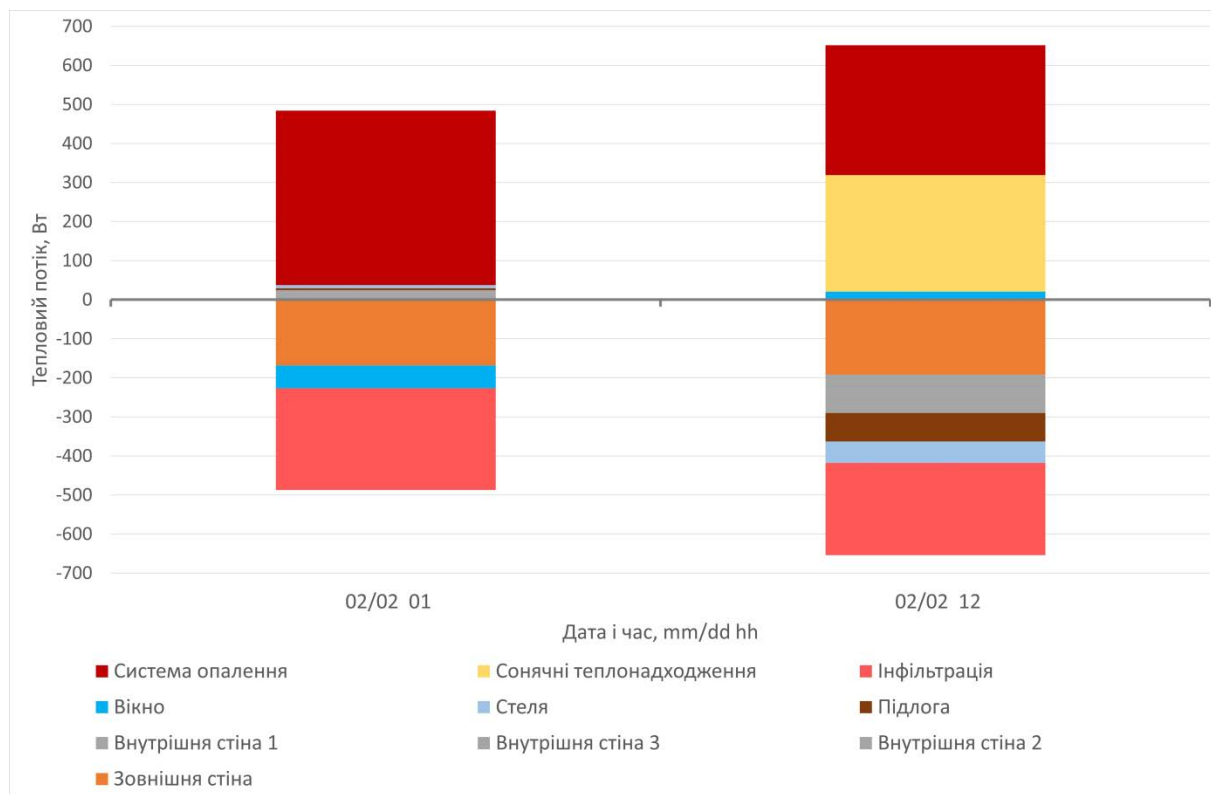


Рис. 9. Нічний та денний розріз теплового балансу

Висновки. В роботі була створена енергетична динамічна модель житлової будівлі в програмному середовищі EnergyPlus та DesignBuilder. Виділено репрезентативну кімнату для якої проведено детальне дослідження енергетичних динамічних балансів. В роботі проведено поглиблений аналіз повітрообміну як складової енергетичних балансів будівлі.

Аналіз показав, що моделювання повітрообміну в EnergyPlus надає кілька моделей для розрахунку проникнення повітря в будівлю, що дозволяє враховувати різні фактори. такі як швидкість вітру, ефективна площа протікання, коефіцієнт інфільтрації тощо.

Крім цього, проведено порівняльний аналіз розрахунку повітрообміну при використанні різних кліматичних даних. А саме Будівельна кліматологія України та міжнародний погодинний погодний файл IWEC.

На основі складених енергетичних динамічних балансів встановлено, що для внутрішніх огорожень характерні схожі тенденції зміни теплових потоків, які в свою чергу залежать від теплового потоку від сонячних тепло надходжень. Внутрішні огорожувальні конструкції в денний період доби акумулюють тепло, а в нічний період доби віддають в зону будівлі. Тепловий потік через світлопрозорі елементи огорожень для більшої частини розглянутого часового періоду характерні від'ємні значення, для коротких проміжків часу

світлопрозорі елементи огорожень у періоди пікової сонячної активності слугують як пасивні системи опалення.

Основними складовими надходжень теплового балансу, які в розглянутих умовах визначають його кількісні показники та динаміку зміни, є опалення та сонячні надходження. Витратні складові це, в основному, втрати через зовнішні стіни та повітрообмін. Динаміка зміни складових теплового балансу в приміщенні свідчить про необхідність підвищеної уваги до якості регулювання опалення при забезпеченні певного рівня умов комфортності. В подальших дослідженнях планується проаналізувати вплив тепло інерційних властивостей огорожень будівлі на енергетичні баланси.

References

Література

1. International Energy Agency (IEA) (2019). Global Status Report for Buildings and Construction. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>.
 2. Deshko, V., Bilous, I., Biriukov, D. (2021). Modeling of unsteady temperature regimes of autonomous heating systems. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, Vol. 3, P. 91–99. URL: <https://jntes.tu.kielce.pl/wp-content/uploads/2021/11/MODELING-OF-UNSTEADYTEMPERATURE-REGIMES-OF-AUTONOMOUS-HEATING-SYSTEMS.pdf>.
 3. Deshko, V., Bilous, I., Biriukov, D., Yatsenko, O. (2021). Transient Energy Models of Housing Facilities Operation. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, Vol. 23, P. 539–551. <https://doi.org/10.54740/ros.2021.038>.
 4. Deshko, V., Bilous, I., Shovkaliuk, M., Hurieiev, M. (2020). Evaluation of differentiated impact of apartment building occupants' behavior on energy consumption. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, pp. 196–200, <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160046>.
 5. Deshko, V., Bilous, I., Maksymenko, O. (2023). Impact of Heating System Local Control on Energy Consumption in Apartment Buildings. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, Vol. 25, P. 77–85, <https://doi.org/10.54740/ros.2023.009>.
 6. EnergyPlus Energy Simulation Software. URL: <https://energyplus.net>.
 7. Design Builder Energy Simulation Software. URL: <https://designbuilder.co.uk/>
 8. IWEC Climate Data for Kyiv. URL: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Kiev.333450_IWEC.
1. Global Status Report for Buildings and Construction. *International Energy Agency (IEA)*. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>.
 2. Deshko V., Bilous I., Biriukov D. Modeling of unsteady temperature regimes of autonomous heating systems. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*. 2021. Vol. 3. P. 91–99. URL: <https://jntes.tu.kielce.pl/wp-content/uploads/2021/11/MODELING-OF-UNSTEADYTEMPERATURE-REGIMES-OF-AUTONOMOUS-HEATING-SYSTEMS.pdf>.
 3. Deshko V., Bilous I., Biriukov D., Yatsenko O. Transient Energy Models of Housing Facilities Operation. *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2021. Vol. 23. P. 539–551. <https://doi.org/10.54740/ros.2021.038>.
 4. Deshko V., Bilous I., Shovkaliuk M., Hurieiev M. Evaluation of differentiated impact of apartment building occupants' behavior on energy consumption. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine. 2020. P. 196–200. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160046>.
 5. Deshko V., Bilous I., Maksymenko O. Impact of Heating System Local Control on Energy Consumption in Apartment Buildings. *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2023. Vol. 25. P. 77–85. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.009>.
 6. EnergyPlus Energy Simulation Software. URL: <https://energyplus.net>.
 7. Design Builder Energy Simulation Software. URL: <https://designbuilder.co.uk/>
 8. Кліматичні дані IWEC для м. Києва. URL: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Kiev.333450_IWEC.

9. DSTU-NB V.1.1-27:2010. Budivelna kilmatolohiia. [State Standard of Ukraine DSTU-NB V.1.1-27:2010. Building Climatology]. Kyiv, 2011. 127 p. [in Ukrainian].
10. Deshko, V., Bilous, I., Sukhodub, I., Yatsenko, O. Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes. *Journal of Building Engineering*, 2021, 42, 103020. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103020>
11. DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osviltenni ta hariachomu vodopostachanni [State Standard of Ukraine DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting, and hot water supply]. Introduced for the first time; effective from 03.2023. Kyiv, State Enterprise "UkrNDNC," 2022. 156 p. [in Ukrainian].
12. DBN V.2.5-67:2013. Opalennia ventyliatsiia ta kondytsonuvannia [State Building Code of Ukraine DBN V.2.5-67:2013. Heating, Ventilation, and Air Conditioning]. Introduced for the first time; effective from 01.01.2014. Kyiv, State Enterprise "UkrNDNC," 2013. 147 p. [in Ukrainian].
13. Deshko, V., Bilous, I., Vynogradov-Saltykov, V., Shovkaliuk, M., Hetmanchuk, H. (2020). Integrated approaches to determination of co2 concentration and air rate exchange in educational institution. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, Vol. 22(1), P. 82–104. URL: https://ros.edu.pl/images/roczniki/2020/007_ROS_V22_R2020.pdf.
14. Michalak, P. (2022). Thermal-Airflow Coupling in Hourly Energy Simulation of a Building with Natural Stack Ventilation. *Energies*, Vol. 15 (11), Art. 4175. <https://doi.org/10.3390/en15114175>.
9. ДСТУ-НБ В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. К., 2011. 127 с.
10. Deshko V., Bilous I., Sukhodub I., Yatsenko O. Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 42. Art. 103020. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103020>.
11. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. Уведений вперше; чинний від 03.2023. К.: ДП "УкрНДНС", 2022. 156 с.
12. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення вентиляція та кондионування. Уведений вперше; чинний від 01.01.2014. К.: ДП "УкрНДНС", 2013. 147 с.
13. Deshko V., Bilous I., Vynogradov-Saltykov V., Shovkaliuk M., Hetmanchuk H. Integrated approaches to determination of co2 concentration and air rate exchange in educational institution. *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2020. Vol. 22 (1). P. 82–104. URL: https://ros.edu.pl/images/roczniki/2020/007_ROS_V22_R2020.pdf.
14. Michalak P. Thermal-Airflow Coupling in Hourly Energy Simulation of a Building with Natural Stack Ventilation. *Energies*. 2022. Vol. 15 (11). Art. 4175. <https://doi.org/10.3390/en15114175>.

BILOUS INNA

Candidate of Technical Sciences, Docent
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>
Scopus Author ID: 57194104035
ResearcherID: J-7070-2017
E-mail: bilous_inna@ukr.net

DESHKO VALERII

Doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>
Scopus Author ID: 6506189670
ResearcherID: J-6517-2017
E-mail: te@kpi.ua

MAKSYM HURIEIEV

PhD Student, Educational and Scientific Institute
of Thermal and Nuclear Power Engineering,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0420-3609>
E-mail: mksm2901@gmail.com

^{1,2}DESHKO V. I., ^{1,3}BILOUS I. Y., ¹HURIEIEV M. V.

¹ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine

² Institute of Technical Thermophysicists of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

³ Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

VENTILATION AS A COMPONENT OF THE ENERGY DYNAMIC BALANCE IN BUILDING

Purpose. The research aims to analyze dynamic energy modeling of buildings using EnergyPlus and DesignBuilder software. The primary goal is to assess the energy efficiency, indoor air quality, and energy balance of buildings, taking into account various aspects such as ventilation and dynamic changes in temperature and humidity.

Methodology. EnergyPlus and DesignBuilder software were utilized to create detailed dynamic models of buildings. Special attention was given to modeling ventilation and studying the energy balance. Various ventilation modeling algorithms were compared to determine their impact on energy efficiency.

Findings. Energy flows in buildings based on dynamic energy balances for the heating period were investigated. A detailed analysis of the influence of ventilation on dynamic energy balances in the studied residential building room was conducted.

Originality. This research offers a new perspective on dynamic energy modeling of buildings, expanding knowledge in this field by focusing on ventilation and energy balance aspects. The results contribute significantly to the development of approaches to improve energy efficiency, creating new opportunities for practical applications in engineering design and building operation.

Practical value. The obtained results are an important contribution for engineers and designers developing strategies to reduce energy consumption and optimize energy use in buildings. The research can serve as a guide for the practical implementation of dynamic modeling in the planning and operation of buildings to achieve optimal energy efficiency.

Keywords: dynamic building modeling; ventilation; thermal balance; energy efficiency; energy consumption.