

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 697.12:628.854

Оцінка енергоспоживання будівель на основі енергетичного моделювання з врахуванням мінливості природного повітрообміну

І. Ю. Білоус^{1✉}, Г. О. Гетманчук², М. В. Гурсьєв³¹⁻³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр-т Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна✉ e-mail: ¹bilouys_inna@ukr.netORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1655-8642>;³<https://orcid.org/0000-0003-0420-3609>

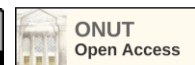
Стаття присвячена оцінці енергоспоживання житлової будівлі з урахуванням фактичних показників природного повітрообміну, отриманих експериментальним шляхом. У роботі досліджується вплив змінної кратності повітрообміну на теплове навантаження та загальне енергоспоживання на опалення. Для цього розроблено 3D-модель квартири в програмному забезпеченні DesignBuilder та виконано динамічне моделювання енергетичних потоків у середовищі EnergyPlus. Об'єктом дослідження стала однокімнатна квартира в гуртожитку сімейного типу КПІ ім. Ігоря Сікорського в Києві. Основою розрахунків стали натурні дані про рівень вуглекислого газу, що дозволило врахувати фактичні умови інфільтрації і ексфільтрації повітря. В ході дослідження встановлено, що вплив природного повітрообміну значною мірою залежить від зовнішніх кліматичних умов, таких як температура, швидкість і напрям вітру, що формують динамічний характер інфільтрації та ексфільтрації. Під час моделювання було враховано механізми руху повітря між приміщеннями квартири, включаючи зміну напрямку потоків залежно від напрямку вітру. У дослідженні було порівняно результати моделювання для різних сценаріїв повітрообміну: за нормативними значеннями та фактичними даними, що дозволило оцінити потенціал економії енергії. В статті наведено результати моделювання з нормативними показниками відповідно до стандартів ДБН В.2.2-15:2019, ДСТУ 9190:2022, EN 15251:2011 та ASHRAE 62.2-2022. Різниця у річному тепловому споживанні між українськими та міжнародними стандартами досягала 18%. Результати показують, що за умов фактичного повітрообміну економія енергії на опалення може становити 5,4% (3,7 млн Гкал) порівняно зі стандартом ДСТУ Б EN 15251:2011 та 7,7% (5,2 млн Гкал) порівняно зі стандартом ДБН В.2.2-15:2019 за опалювальний сезон. Висновки статті підтверджують доцільність врахування фактичних параметрів повітрообміну в процесі енергетичного моделювання будівель для забезпечення більш точних прогнозів енергоспоживання.

Ключові слова: Повітрообмін; Природна вентиляція; Енергоспоживання; Енергетичне моделювання; Економія енергії

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.2950>

© The Author(s) 2024. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Сучасні тенденції енергоефективності в будівельній галузі висувають жорсткі вимоги до

зниження енергоспоживання будівель та оптимізації теплових втрат. Одним із ключових факторів енергоефективності є забезпечення ефективного повітрообміну, який необхідний як для

підтримання якості повітря в приміщеннях, так і для контролю теплового балансу будівлі. Звичай, кратність повітрообміну визначається за нормативами, проте фактичні умови, такі як природний повітрообмін, можуть суттєво відрізнятись від розрахункових, що впливає на точність прогнозів енергоспоживання.

Особливу увагу привертає проблема оцінки впливу змінної кратності повітрообміну на енергетичні характеристики будівлі, зокрема в умовах природного повітрообміну, який має складну природу та є мінливим в часі.

Забезпечення нормативної кратності повітрообміну дозволяє підтримувати необхідний рівень комфорту та якість повітря в приміщеннях, проте, фактичні показники повітрообміну часто відрізняються від розрахункових через природні процеси інфільтрації та ексфільтрації [1]. Урахування цих природних процесів у моделюванні енергетичних потоків дозволяє отримати більш точні прогнози енергоспоживання та підвищити ефективність проектних рішень.

Енергетичне моделювання є основним інструментом для оцінки енергоспоживання будівель, що дозволяє враховувати численні фактори, які впливають на теплообмін і використання енергії в приміщеннях. Серед сучасних підходів до моделювання енергетичних процесів значна увага приділяється 3D-моделям будівель, розробленим в динамічному програмному забезпеченні Design-Builder, яке забезпечує високий рівень деталізації архітектурних елементів, а також дозволяє моделювати внутрішні і зовнішні джерела тепла, взаємодію між зонами, тощо. Використання Design-Builder у поєднанні з програмним середовищем EnergyPlus показало високу ефективність такого підходу для динамічного моделювання енергетичних потоків у будівлях [2].

Важливим аспектом роботи EnergyPlus є його здатність моделювати динамічні зміни у системах повітрообміну, зокрема враховувати параметри вентиляції, опалення та кондиціонування, що відображає реальні умови експлуатації будівлі. Дослідження [3] вказують на те, що моделювання інфільтрації та ексфільтрації в EnergyPlus дозволяє більш точно оцінити енерговитрати, зважаючи на природні зміни у повітрообміні, які залежать від температурних та вітрових факторів.

Природний повітрообмін, обумовлений інфільтрацією та ексфільтрацією повітря, є важливим фактором, що впливає на енергоспоживання

будівлі, особливо у холодний період року, коли тепловтрати через інфільтрацію можуть суттєво підвищити витрати на опалення. Інфільтрація є процесом, при якому холодне повітря проникає в приміщення через нещільності будівельної оболонки, вікна або двері, що створює додаткове навантаження на систему опалення. Ексфільтрація, навпаки, є витоком теплого повітря з приміщення, що також веде до підвищення енергоспоживання.

У дослідженнях встановлено, що врахування цих процесів у моделях дозволяє знизити похибку прогнозів енергоспоживання, особливо для житлових будівель, де інфільтрація має суттєвий вплив на теплові потоки [4]. У дослідженнях [5] також зазначається, що точність оцінки енергоспоживання значно зростає при врахуванні змінної інфільтрації, яка залежить від багатьох факторів, таких як температурна різниця між внутрішнім і зовнішнім середовищем, рівень герметичності огорожувальних конструкцій, напрям і швидкість вітру.

Виконання натурних експериментів для визначення кратності повітрообміну, зокрема шляхом вимірювання рівня CO₂ у приміщеннях як індикатора повітрообміну, дозволяє враховувати фактичні умови інфільтрації, що підвищує надійність моделювання [3,6,7].

Натурні дослідження рівня CO₂ у приміщеннях показали, що фактичні показники кратності повітрообміну можуть значно відрізнятись від нормативних, що вимагає коригування моделей для підвищення точності прогнозів енергоспоживання [8].

Енергетичне моделювання на основі даних натурних експериментів дозволяє оцінити, яким чином варіації у рівнях повітрообміну впливають на загальне енергоспоживання будівлі. Це забезпечує більш точне врахування реальних умов експлуатації будівель, знижуючи похибку та підвищуючи ефективність проектних рішень для систем вентиляції та опалення [9, 10].

Таким чином, оцінка енергоспоживання будівель з врахуванням мінливості природного повітрообміну є складним, але надзвичайно важливим завданням для сучасного енергетичного моделювання. Використання 3D-моделей в Design-Builder та динамічних симуляцій в EnergyPlus створює основу для комплексної оцінки енергоефективності будівель. Інфільтрація та ексфільтрація як складові повітрообміну суттєво впли-

вають на енергетичний баланс, особливо у холодні сезони. Дані натурних експериментів, отримані на основі вимірювань рівня CO₂, є надійним джерелом для налаштування моделей і підвищення точності оцінок енерго-споживання.

2. Мета та завдання

Метою роботи є оцінка енергоспоживання типової квартири на основі динамічного енергетичного моделювання з використанням даних натурних вимірювань.

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні завдання:

- 1) розробка 3D-моделі будівлі в DesignBuilder з урахуванням планування та конструкційних особливостей;
- 2) введення даних натурального експерименту в EnergyPlus для динамічного моделювання енергетичних потоків;
- 3) оцінка енергоспоживання типової квартири при фактичних значеннях повітрообміну;
- 4) порівняння результатів моделювання з нормативними значеннями.

3. Матеріал і результати досліджень

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'ятиповерхової будівлі. Будівля відповідає характеристикам масової забудови 80-х років. Квартира має одну зовнішню стіну орієнтовану на південь. У житловому будинку наявний тех-нічний поверх. Вікна в квартирі з подвійним застлінням у дерев'яних спарених плетіннях, балконні двері – подвійні з частковим застлінням. В квартирі функціонує канална природна вентиляція, отже свіже повітря надходить в приміщення квартири через нещільності в огорожу-ючих конструкціях (вікна та двері).

Для моделювання енергетичних потоків було створено 3D-модель квартири в програмному середовищі DesignBuilder [12] (рис. 1). Важливою частиною моделювання є точне відображення розмірів приміщень, типів матеріалів, конструкцій та їх теплофізичних характеристик. При побудові 3D геометрії внутрішній об'єм будівлі було роз-

ділено на основні зони: 1 – житлова кімната, 2 – кухня, 3 – коридор, 4 – санвузол, 5 – кладова. Виконання динамічного моделювання енергетичних потоків проводилось на основі програмного продукту EnergyPlus [12].

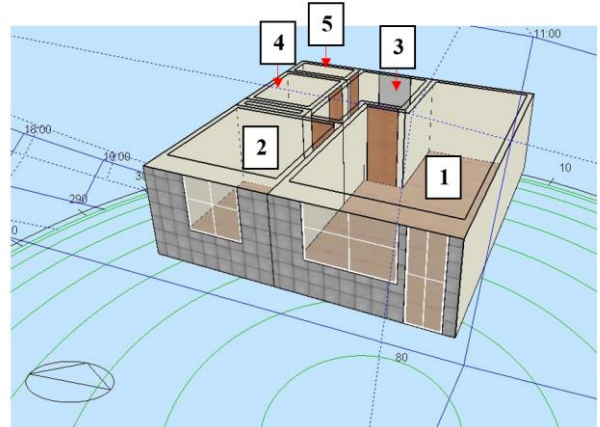


Рисунок 1 – 3D-модель будівлі, створена в DesignBuilder

В таблиці 1 наведені дані про основні розмірні параметри квартири в цілому та основних досліджуваних приміщень.

Таблиця 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

В моделі в DesignBuilder [11] було проведено верифікацію та налаштування параметрів, що визначають внутрішній мікроклімат, такі як температура повітря, вологість, рівень освітлення, а також графіки присутності людей та роботи електричного обладнання.

Теплонадходження від людей та системи освітлення визначаються відповідно до графіку, наведеного на рис. 2. Під час моделювання, було враховано, що протягом опалювального періоду, температура в приміщеннях квартири підтримується на рівні 20°C [13].

У квартирі постійно проживає дві особи. Режим експлуатації приміщень впливає на графік використання теплової енергії, та залежить від періодів присутності людей, роботи освітлення, а також електричних пристроїв та обладнання. Основою режиму є графік перебування мешканців

у квартирі, який визначає періоди, коли споживається найбільше енергії. Алгоритм розрахунку теплонадходжень від людей, який застосовується в програмі EnergyPlus [12], включає енергетичний баланс, що враховує три основні механізми теплообміну: променеве тепло, конвективне тепло та приховане тепло від вологи, що випаровується з поверхні тіла людини. В рамках моделі було задано, що метаболічна теплота, яку виділяють люди, що проживають в квартирі, складає 117 Вт/людину.

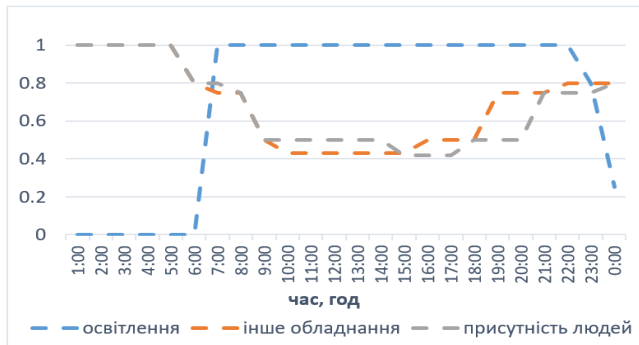


Рисунок 2 – Графік активності людей та роботи системи освітлення та використання електричного обладнання протягом доби

В години максимального навантаження система освітлення та електричні пристрої працюють на рівні 2 Вт/м², що є стандартним значенням для багатоквартирних будинків та гуртожитків [13].

Для відображення природного повітрообміну для досліджуваної квартири налаштування моделі здійснювалось у відповідності до отриманих під час натурного експерименту рівнів природного повітрообміну [6, 7]. Вимірювання рівня CO₂, яке проводилося для оцінки фактичної кратності повітрообміну в приміщеннях, дало змогу оцінити величину повітрообміну. Кратність повітрообміну, визначена на основі вимірних значень CO₂, була введена в параметри вентиляції EnergyPlus [12]. 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 вхідні двері. Для умов коли припливне повітря надходить через вентиляційний канал і вхідні 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 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 [6].

Для детального моделювання енергетичних потоків було враховано погодинні кліматичні дані для опалювального періоду, що були отримані з міжнародної кліматологічної бази даних IWEC для міста Києва [13]. Ці дані дозволили врахувати сезонні коливання та специфіку клімату регіону.

На рис. 3 представлені погодинні показники зовнішньої температури повітря та швидкості вітру. Загалом для зимового періоду міста Києва міждобові зміни температури становлять 3-4°C [14, 15]. Швидкість вітру для опалювального періоду в середньому становила 3,6 м/с з переважним західним та південним та південно-східним напрямками вітру.

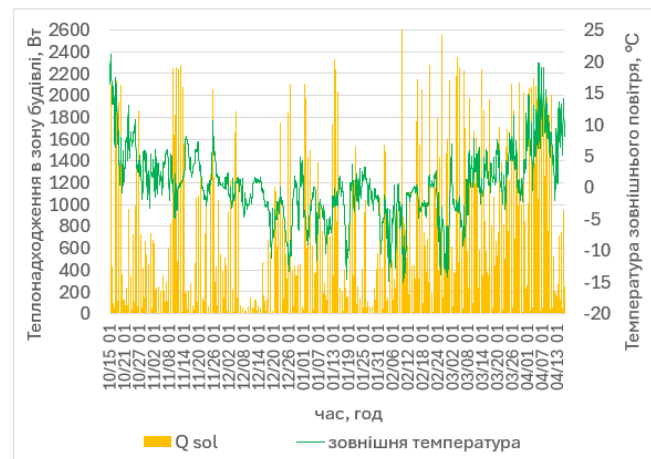


Рисунок 4 – Температура зовнішнього повітря та сонячні теплонадходження в репрезентативну квартиру протягом опалювального періоду

За стандартом ДБН В.2.2-15:2019 [17], який застосовують для умов проектування, реконструкції та капітального ремонту мінімальна кратність повітрообміну в будинках з природною вентиляцією для загальних кімнат, спальень, дитячих та кабінетів становить 0,5 год⁻¹, для кухонь ця величина становить 1,5 год⁻¹. При енергетичній сертифікації будівель, енергоаудиторами приймається, що кратність повітрообміну в житлових будівлях з природною вентиляцією становить 0,6 год⁻¹ відповідно до ДСТУ 9190:2022 [13]. Та в розрахунках енергетичного сертифікату будівель ця величина приймається як інфільтраційна.

На сьогоднішній день, більшість діючих стан-

дартів 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 [18] кратність повітрообміну для всієї квартири визначається за формулою (1):

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

де Q_{tot} – загальний необхідний рівень повітрообміну, л/с; A_{floor} – площа житла, м²; N_{br} – кількість спальень.

Об'єм повітря, який обчислений за формулою (1) для квартири із однією спальнею та загальною площею 32,8 м², становить 11,92 літрів на секунду. Це відповідає кратності повітрообміну 0,52 год⁻¹.

Відповідно до стандарту EN 15251:2011 [19] 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 [19], яке еквівалентно кратності повітрообміну 0,6 год⁻¹ при внутрішній висоті 2,5 м, що співпадає з табличними значеннями цього стандарту.

Результати енергоспоживання на потреби опалення та теплового навантаження для квартири за умов нормативного повітрообміну відповідно до національних та міжнародних стандартів наведені в річному (рис. 5) та погодинному (рис. 6) розрізі.

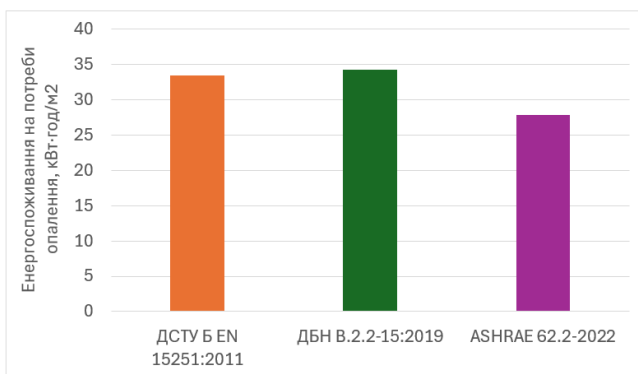


Рисунок 5 – Річне енергоспоживання на потреби опалення

Для варіанту моделювання відповідно до стандарту ASHRAE 62.2-2022 [18] приймалось розрахункове значення кратності повітрообміну на рівні 0,52 год⁻¹.

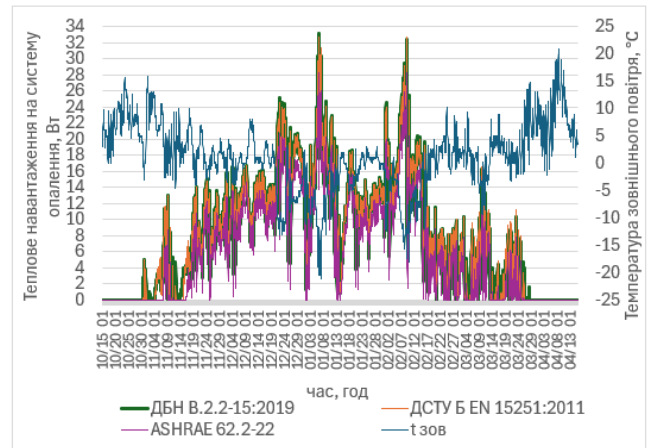


Рисунок 6 – Теплове навантаження на систему опалення

Аналіз динамічного моделювання показав, що різниця в енергоспоживанні між різними стандартами кратності повітрообміну є суттєвою. 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, використання стандарту ДБН В.2.2-15:2019 порівняно зі стандартом ASHRAE 62.2-2022 призводить до збільшення річного теплового споживання на 18%, що вказує на значні відмінності у вимогах до енергоефективності в залежності від стандарту. Це підтверджує важливість вибору стандарту, на основі якого проводиться енергетичне моделювання, оскільки це впливає на загальну енергоефективність об'єкта.

На базі експерименту були визначені основні механізми руху повітря в приміщеннях типової квартири в залежності від мінливості зовнішніх умов. 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 нагрівається в приміщенні кухні. 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 (рис. 7). Напрямок вітру заданий в градусах. На рис. 8 наведено особливість визначення напрямку вітру відповідно до кута.

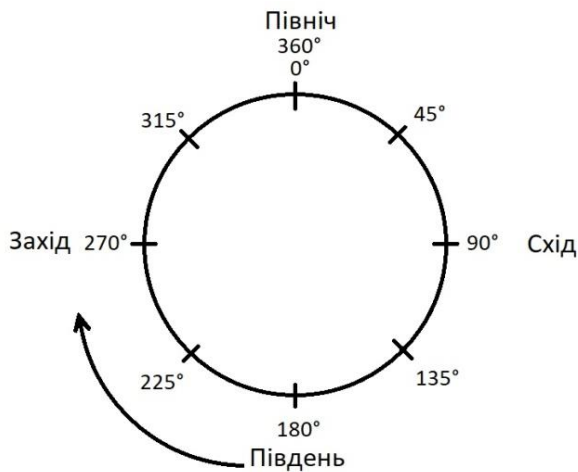


Рисунок 7 – Визначення напрямку вітру заданого кутом відповідно до файлу типового року IWEC [4]

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.

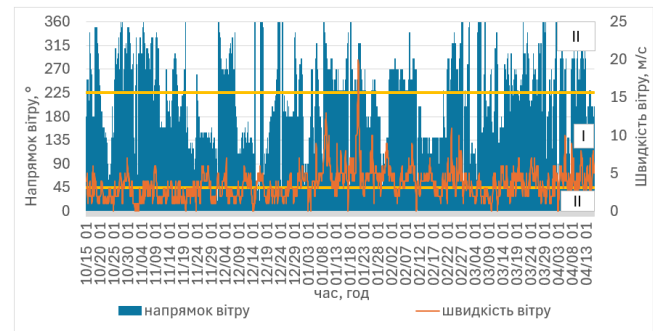
В діючих стандартах України [17, 19] напрямок руху повітря не враховується. Тому, були проведені розрахунки експериментально встановлених рівнів природного повітрообміну за умови, що напрямок/механізм руху припливного повітря в квартирі не враховується.

Для порівняння граничних випадків споживання енергії на потреби опалення були розгля-

нуті наступні варіанти:

1) Механізм I – повітря надходить в зону кімнати шляхом інфільтрації незмінно протягом всього опалювального періоду (рис. 10, I(a)) – 78,8 (кВт·год)/м²;

2) Механізм II – повітря надходить в зону кімнати шляхом ексфільтрації незмінно протягом всього опалювального періоду (рис.10, II(a)) – 23,3 (кВт·год)/м².

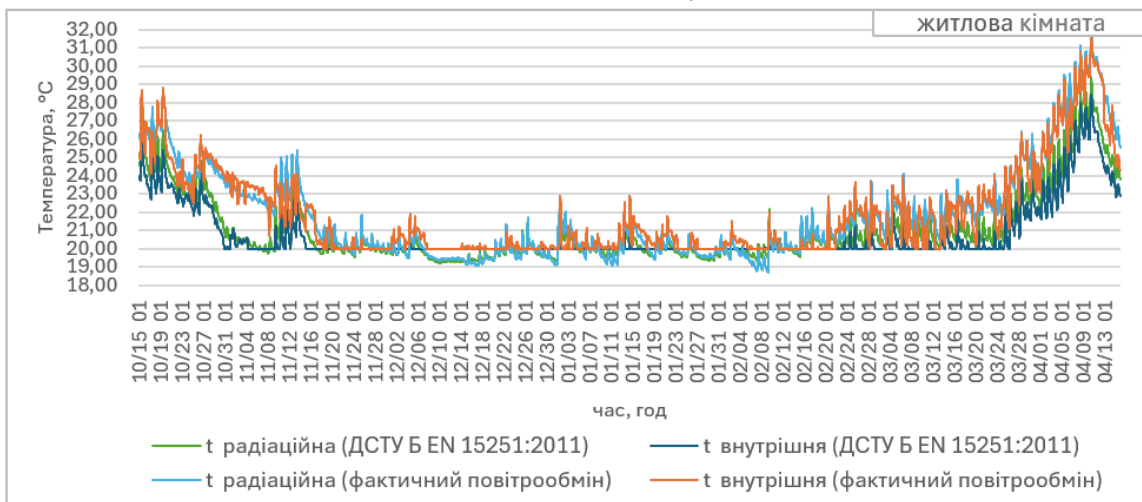


I – інфільтрація, II – ексфільтрація

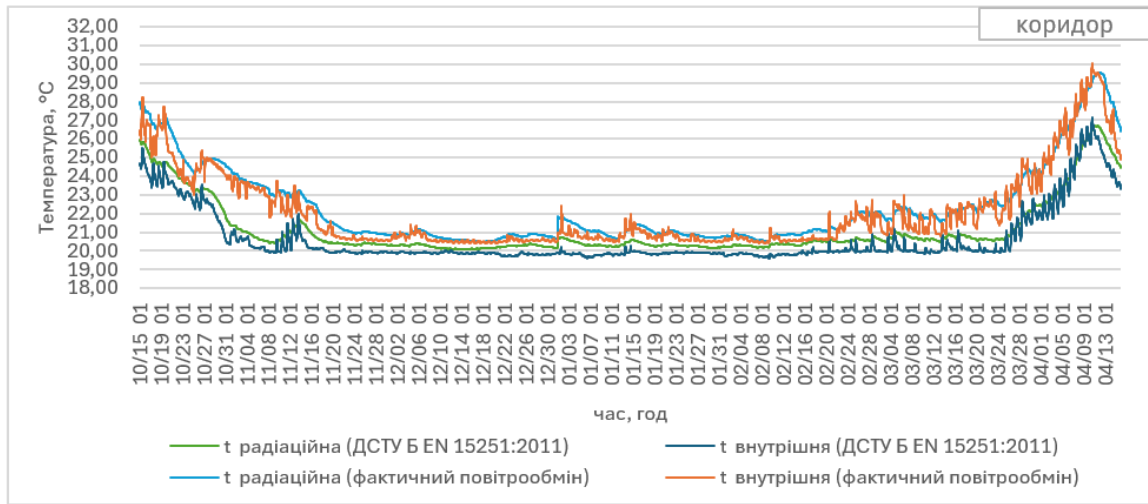
Рисунок 8 – Зміна швидкості та напрямку вітру

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

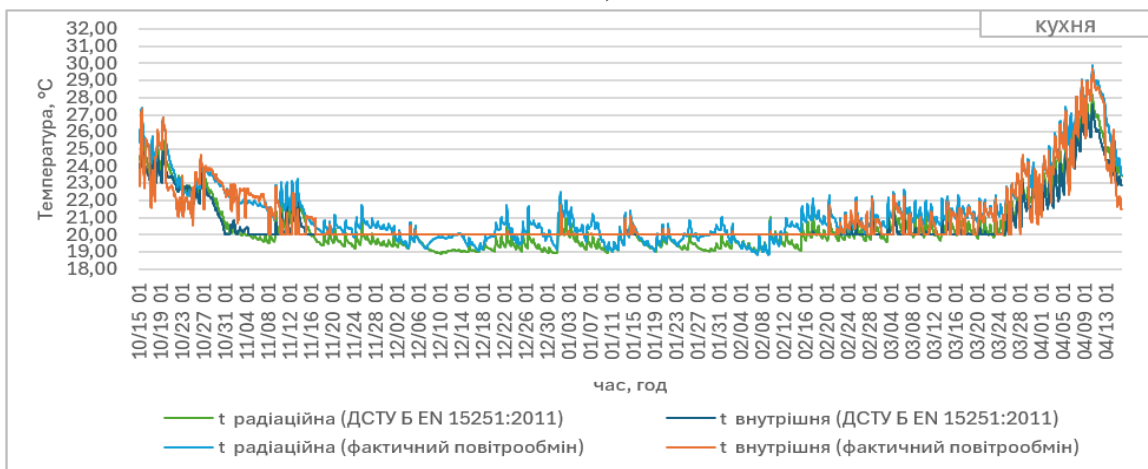
Динаміка внутрішньої та радіаційної температури в репрезентативних кімнатах квартири при використанні постійного значення кратності повітрообміну відповідно ДСТУ Б EN 15251:2011 та фактичного повітрообміну приведена на рис. 9. З На рис. 6 видно, що в періоди міжсезоння були періоди коли опалення вимикалось, але за рахунок високої сонячної активності та високої зовнішньої температури, температура в приміщеннях квартири в цей період зростала, та перевищувала нормативну в 20°C [19].



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Погодинна зміна внутрішньої та радіаційної температури в приміщеннях житлової кімнати (а), коридору квартири (б) та кухні (в)

В розглянутих граничних випадках рух 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.10, ряд даних (б)). І випадок, коли енергія на нагрів повітря витрачається в кожній зоні квартири (рис.10, 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 рис. 10 (III) наведено величину річного споживання на потреби опалення 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 (кВт·год)/м².

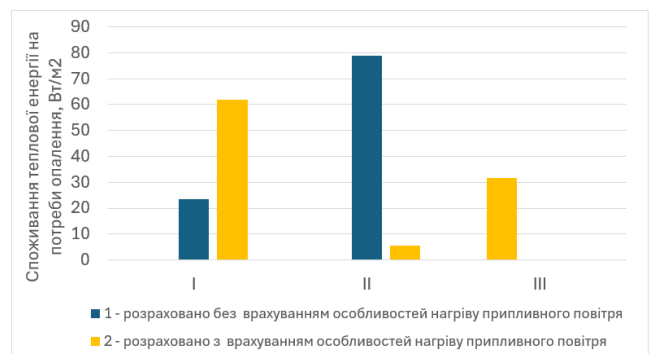


Рисунок 10 – Річне споживання енергії на опалення

I – механізм інфільтрації незмінно протягом всього опалювального періоду; II – механізм ексфільтрації незмінно протягом всього опалювального періоду; III – з врахуванням погодинної зміни природно-го повітрообміну

На рис. 11 наведено результати моделювання енергоспоживання на потреби опалення для репрезентативної квартири з врахуванням рівня природної кратності повітрообміну відповідно до нормативних документів та експериментальних даних.

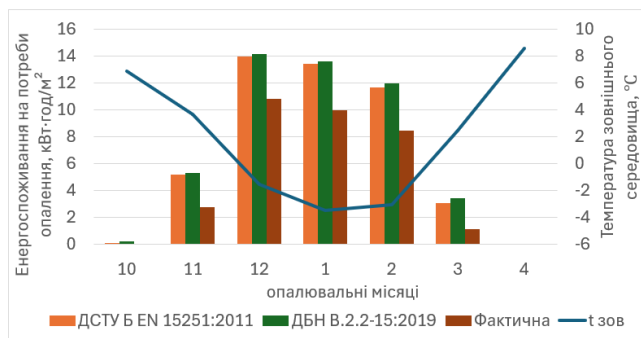


Рисунок 11 – Помісячне енергоспоживання на потреби опалення

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 визначені 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.

4. Висновки

Забезпечення нормативної кратності повітрообміну є одним із ключових аспектів енергоефективності будівель, оскільки правильний повітрообмін забезпечує не тільки оптимальні умови для підтримки мікроклімату, але й знижує енергетичні витрати на опалення. Однак, важливо враховувати не лише встановлені нормативи, а й фактичні умови експлуатації будівель, зокрема рівень вуглекислого газу, який прямо впливає на якість повітря в приміщенні, а також механізми

надходження свіжого повітря.

Дослідження, проведене на основі 3D-моделі та енергетичного моделювання за допомогою програмних продуктів DesignBuilder та EnergyPlus, дозволило оцінити енергоспоживання об'єкта за різних режимів природного повітрообміну. Результати показали, що реальні значення кратності повітрообміну, визначені експериментально, мають значний вплив на енергоспоживання будівель.

У порівнянні з нормативними значеннями, енергетичне моделювання показало, що за умов фактичного природного повітрообміну річна економія енергії на опалення становить 5,4% за стандартом ДСТУ Б EN 15251:2011 та 7,7% за стандартом ДБН В.2.2-15:2019. Для житлового сектору України потенційна економія енергії може досягти значних обсягів, зокрема до 3,7 млн Гкал тепла за опалювальний сезон, що є суттєвим внеском у зниження енергетичних витрат та підвищення енергоефективності.

Особистий внесок авторів CRediT

Білоус І.Ю.: концептуалізація, методологія, налаштування математичної моделі. **Гетманчук Г.О.:** методичне забезпечення, постановка задачі, програмне моделювання, обробка даних. **Гурєєв М.В.:** аналіз та узагальнення даних, обробка результатів імітаційного моделювання, інформаційний пошук.

Література

- Fang X., Zhang J., Chen Q.** Impact of infiltration on the energy consumption of residential buildings in cold climates // *Energy and Buildings*. –2014. – Vol. 82. – P. 506-514. doi:10.1016/j.enbuild. 2014.07.065
- Maile T., Bazjanac V., Fischer M.** A method to compare simulated and measured data to assess building energy performance // *Energy and Buildings*. – 2017. – Vol. 39(2). – P. 276-283.
- Heiselberg P., Sandberg M., Svedberg U.** Natural ventilation in buildings: Measurement in field and test facilities // *Energy and Buildings*. – 2002. – Vol. 34(8). – P. 889-896. doi:10.1016/S0378-7788(02)00071-6.
- Fang X., Zhang J., Chen Q.** Impacts of infiltration on energy consumption of residential buildings // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 82. – P. 113-123.
- Zhai Z. J., Previtali J. M.** Ancient vernacular architecture: Characteristics categorization and energy performance evaluation // *Energy and Buildings*. –

2010. – Vol. 42(3). – P. 357-365. doi:10.1016/j.enbuild.2009.10.002
6. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Гетманчук Г. О. Дослідження повітрообміну в квартирі на основі експериментального визначення масопереносу CO₂ // Енергетика і автоматика. – 2023. – № 3. – С. 28-40.
7. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Гетманчук Г. О. Параметричний аналіз природного повітрообміну в багатоквартирних житлових будівлях // Енергетика: Економіка, технології, екологія. – 2023. – № 4. – С. 57-68.
8. Ouyang J., Long E., Xu W. Influence of air infiltration on energy consumption in urban buildings // Energy Conversion and Management. – 2019. – Vol. 200. – P. 112103. doi:10.1016/j.enconman.2019.112103.
9. Dutton S. M., Chan W. R., Fisk W. J. Energy savings and indoor air quality impacts of ventilation in residential high-performance buildings. Energy Efficiency. – 2013. – Vol. 6(3). – P. 611-622. doi:10.1007/s12053-013-9208-8.
10. Zhao X., Wang X., Chen Y. (2020). Energy simulation of building energy performance with consideration of air infiltration // Journal of Building Performance. – 2020. – Vol. 12(4). – P. 457-467.
11. DesignBuilder. URL: <https://designbuilder.co.uk/> (дата звернення: 01.09.2024).
12. EnergyPlus. URL: <https://energyplus.net/> (дата звернення: 01.09.2024).
13. International Weather for Energy Calculations URL: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR (дата звернення: 01.09.2024).
14. Білоус І. Ю. Оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища. – дис. канд. техн. наук, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2019.
15. Тимофєєв М. В., Дешко В. І., Білоус І. Ю., Гетманчук Г. О. Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівель в динамічних сіткових моделях // Наука та будівництво. – 2019. – № 2 (20). – С. 62-69.
16. Житлові будинки. Основні положення, ДБН В.2.2-15:2019. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, Київ, 2019.
17. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. ДСТУ 9190:2022, ДП НДІБК, Київ, 2022.
18. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, ASHRAE 62.2-2022, ANSI/ASHRAE, Atlanta, Georgia, 2022.
19. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики (EN 15251:2007, ІДТ), ДСТУ Б EN 15251:2011. Держ. підприємство «Укрархбудінформ», Київ, 2012.

Отримана в редакції 02.09.2024, прийнята до друку 16.09.2024

Estimation of energy consumption of buildings on the base of energy modeling taking into account the variability of natural air exchange

Inna Bilous¹✉, Hanna Hetmanchuk², Maksym Hurieiev³

¹⁻³National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine

✉ e-mail: ¹bilous_inna@ukr.net

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1655-8642>;

³<https://orcid.org/0000-0003-0420-3609>

The article is dedicated to assessing the energy consumption of a residential building, considering actual natural air exchange rates obtained through experimental measurements. The study investigates the impact of variable air exchange rates on heating loads and overall heating energy consumption. For this purpose, a 3D model of an apartment was developed using DesignBuilder software, and dynamic modeling of energy flows was performed in the EnergyPlus environment. The object of the study was a one-room apartment in a family dormitory of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute in Kyiv. The calculations were based on field data on carbon dioxide levels, which allowed for the consideration of actual conditions of air infiltration and exfiltration. The research established that the influence of natural air exchange significantly depends on external climatic conditions, such as temperature, wind speed, and direction, which shape the dynamic nature of infiltration and exfiltration. During the modeling, mechanisms of air movement between the apartment's rooms were accounted for, including the changes in air-

flow directions depending on wind direction. The study compared the modeling results for different air exchange scenarios: using normative values and actual data, allowing for an evaluation of energy-saving potential. The article presents modeling results alongside normative indicators in accordance with standards such as DBN V.2.2-15:2019, DSTU 9190:2022, EN 15251:2011, and ASHRAE 62.2-2022. The difference in annual heating energy consumption between Ukrainian and international standards reached 18%. The findings demonstrate that under actual air exchange conditions, heating energy savings could amount to 5.4% (3.7 million Gcal) compared to DSTU B EN 15251:2011 standards and 7.7% (5.2 million Gcal) compared to DBN V.2.2-15:2019 standards during the heating season. The article's conclusions confirm the feasibility of considering actual air exchange parameters in the process of building energy modeling to ensure more accurate energy consumption forecasts.

Keywords: Air exchange; Natural ventilation; Energy consumption; Energy modeling; Energy saving

References

1. Fang, X., Zhang, J., & Chen, Q. (2014) Impact of infiltration on the energy consumption of residential buildings in cold climates. *Energy and Buildings*, 82, 506-514.
2. Maile, T., Bazjanac, V., & Fischer, M. (2017) A method to compare simulated and measured data to assess building energy performance. *Energy and Buildings*, 39(2), 276-283.
3. Heiselberg, P., Sandberg, M., & Svedberg, U. (2002) Natural ventilation in buildings: Measurement in field and test facilities. *Energy and Buildings*, 34(8), 889-896.
4. Fang, X., Zhang, J., & Chen, Q. (2014) Impacts of infiltration on energy consumption of residential buildings. *Energy and Buildings*, 82, 113-123.
5. Zhai, Z. J., & Previtali, J. M. (2010) Ancient vernacular architecture: Characteristics categorization and energy performance evaluation. *Energy and Buildings*, 42(3), 357-365.
6. Deshko, V. I., Bilous, I. Yu., Hetmanchuk, H. O. (2023) Investigation of air exchange in an apartment based on experimental determination of CO₂ mass transfer. *Energy and Automation*, 3, 28-40.
7. Deshko, V. I., Bilous, I. Yu., Hetmanchuk, H. O. (2023) Parametric analysis of natural air exchange in multi-apartment residential buildings. *Energy: Economics, Technology, Ecology*, 4, 57-68.
8. Ouyang, J., Long, E., & Xu, W. (2019) Influence of air infiltration on energy consumption in urban buildings. *Energy Conversion and Management*, 200, 112103.
9. Dutton, S. M., Chan, W. R., & Fisk, W. J. (2013) Energy savings and indoor air quality impacts of ventilation in residential high-performance buildings. *Energy Efficiency*, 6(3), 611-622.
10. Zhao, X., Wang, X., & Chen, Y. (2020). Energy simulation of building energy performance with consideration of air infiltration. *Journal of Building Performance*, 12(4), 457-467.
11. DesignBuilder. Retrived 01 September 2024 from <https://designbuilder.co.uk/>.
12. EnergyPlus. Retrived 01 September 2024 from <https://energyplus.net/>.
13. International Weather for Energy Calculations Retrived 01 September 2024 from https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR.
14. Bilous, I. Yu. (2019) Evaluation of building energy efficiency under dynamic changes in environmental characteristics. *Ph.D. dissertation, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,"* Kyiv.
15. Tymofieiev M. V., Deshko, V. I. Bilous, I. Yu. Hetmanchuk, H. O. (2019) Calculation of hourly natural air exchange rate and its impact on building energy demand in dynamic grid models. *Science and Construction*, 2 (20), 62-69.
16. (2019) Residential Buildings. General Provisions, DBN V.2.2-15:2019. *Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine, Kyiv.*
17. (2022) Energy Efficiency of Buildings. Method for Calculating Energy Consumption for Heating, Cooling, Ventilation, Lighting, and Hot Water Supply, DSTU 9190:2022. *State Research Institute of Building Constructions, Kyiv.*
18. (2022) Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, ASHRAE 62.2-2022. *ANSI/ASHRAE, Atlanta, Georgia.*
19. (2012) Design Parameters of Indoor Microclimate for Building Design and Energy Performance Evaluation Regarding Air Quality, Thermal Com-fort, Lighting, and Acoustics (EN 15251:2007, IDT), DSTU B EN 15251:2011. *State Enterprise Ukrarchbudinform.*

Received 02 September 2024

Approved 16 September 2024

Available in Internet 30 September 2024