

ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНОГО ПОВІТРООБМІНУ В БАГАТОКВАРТИРНИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ

Більшість багатоквартирних житлових будинків, побудованих у ХХ столітті в Центральній та Східній Європі, не відповідають сучасним вимогам енергоефективності. Метою даного дослідження є параметричний аналіз впливових факторів на кратність повітрообміну в приміщенні та експериментальне дослідження концентрації CO₂ у типовій квартирі. Об'єктом дослідження є однокімнатна квартира в гуртожитку сімейного типу в м. Київ. У гуртожитку функціонує канална природна вентиляція. В роботі проводились експериментальні заміри концентрації вуглекислого газу в приміщеннях житлової кімнати, кухні, коридору квартири та у вентиляційному каналі в літній період. Для вимірювання швидкості повітрообміну використовувався метод індикаторного газу. При інфільтрації повітря середня кратність повітрообміну у приміщенні житлової кімнати становила 2,41 год⁻¹, у коридорі – 2,34 год⁻¹, на кухні – 0,57 год⁻¹. При умовах ексфільтрації середні значення були нижчими: житлова кімната – 0,24 год⁻¹, коридор – 0,94 год⁻¹, кухня – 0,52 год⁻¹. Тобто масовий баланс CO₂, з врахуванням кількості мешканців, може бути привабливим альтернативним методом прогнозування інтенсивності вентиляції будівлі.

Ключові слова: повітрообмін, природна вентиляція, концентрація вуглекислого газу, масоперенос, параметричний аналіз, умови мікроклімату

Вступ

Велика частка первинної енергії в Європі споживається будівлями. При цьому більшість багатоквартирних житлових будинків, побудованих у ХХ столітті в Центральній та Східній Європі, не відповідають сучасним вимогам енергоефективності. Значна кількість енергозберігаючих заходів, що реалізується, стосується покращення теплофізичних властивостей огорожень та модернізації систем опалення. Частка витрат з вентиляційним повітрям є найбільшою, за умов дотримання вимог щодо повітрообміну. Сучасні результати енергетичного аналізу будівель різного призначення в Україні показують, що 30-50% теплоти, що надходить у будівлі, йде на нагрівання припливного повітря ззовні [1]. Зменшення цієї складової є другим кроком у впровадженні енергозберігаючих заходів.

Вентиляційна система повинна забезпечувати подачу свіжого повітря і видалення забрудненого повітря з приміщень. У наш час люди проводять у приміщенні більше 80% (навіть 90% в промислових країнах) свого часу.

Якість повітря в приміщенні має значний вплив на комфорт людини, здоров'я та працездатність мешканців. В дослідженні [2] була проведена оцінка впливу простої енергетичної реновації на якість повітря в приміщенні, швидкість повітрообміну і задоволеність мешканців у словацьких житлових будинках. Було обстежено три пари однакових багатоквартирних житлових будинків з природною вентиляцією. Одна будівля в кожній парі була щойно відремонтована, інша була в первісному стані. Мешканці заповнили анкету щодо сприйнятої якості повітря, симптомів синдрому хворого будинку та звичок провітрювання. У відремонтованих будівлях концентрації CO₂ були значно вищими, а кратність повітрообміну – нижчими. В загальному, енергетична реконструкція призвела до зниження рівня задоволеності мешканців якістю повітря в приміщеннях. Інші результати досліджень [3], проведених в аудиторіях деяких університетів, підтверджують тісний зв'язок між кратністю повітрообміну та успішністю навчання студентів.

У більшості існуючих будівель України не передбачена або не працює механічна вентиляція. Тому надходження свіжого повітря відбувається шляхом інфільтрації через повітряні канали вентиляційної системи, провітрювання та нещільності чи інші отвори огорожувальних конструкцій будівлі. Але після заміни старих вікон на герметичні металопластикові відбувається порушення повітряного режиму приміщень квартир, оскільки за відсутності механічної припливно-витяжної системи вентиляції інфільтрація зовнішнього повітря є єдиним джерелом надходження свіжого зовнішнього повітря. ASHRAE визначає інфільтрацію повітря як неконтрольований витік зовнішнього повітря всередину будівлі, спричинений наявністю перепаду тиску між різними елементами огороження будівлі [4].

Хоча 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. Огляд можливостей аналізу повітряного потоку виявив, що багато емпіричних моделей інфільтрації, які використовуються базуються на методах розрахунку, розроблених для малоповерхових житлових будинків відповідно до стандарту ASHRAE 62.2 "Вентиляція та допустима якість повітря в малоповерхових житлових будинках" [5]. Стандарти ASHRAE 62.1 і 62.2 є визнаними стандартами для проектування систем вентиляції та прийнятної якості повітря в приміщенні. Розширені та переглянуті у 2022 році обидва стандарти визначають мінімальну швидкість вентиляції та інші заходи з метою мінімізації негативного впливу на здоров'я мешканців.

Згідно з Європейськими нормативами, які були переглянуті у 2018 та 2019 роках ((Directive 2010/31/EU та Directive 2012/27/EU), у країнах Євросоюзу повинні діяти національні вимоги щодо енергоефективності [1]. В Україні запроваджено стандарт EN-15251 як національний. Тому рекомендовані значення витрат вентиляції збігаються з наведеними в EN 16798. В стандарті CEN EN 16798 наведені рекомендації щодо визначення мінімальної витрати повітря, вираженої в л/с на м², л/с на людину або швидкості повітрообміну за годину для різних приміщень. Проте в різних країнах вимоги до вентиляції в житлових будинках відрізняються.

Наприклад в Кореї з 2006 року стала обов'язковою установка вентиляційного пристрою в житлових будинках, що мала забезпечувати кратність повітрообміну в житлі на рівні 0,7 год⁻¹. Однак у 2013 році уряд Кореї змінив мінімальну швидкість повітряного потоку до 0,5 год⁻¹, щоб зменшити споживання енергії.

Наразі більшість стандартів не передбачають конкретного підходу до визначення мінімального повітрообміну, а лише рекомендують ту чи іншу стратегію розрахунку. Тому, спеціалісти, опираючись на національні стандарти, приймають власні рішення щодо методу визначення нормативного повітрообміну.

Державні будівельні норми України для житлових будинків (ДБН В 2.2.-15:2019) передбачають вимоги до вентиляції у вигляді мінімального повітрообміну приміщень різного призначення (вітальня, спальня, кабінет, кухня, санвузол). Цей стандарт застосовується при розробці проектів, реконструкції та капітальному ремонті. При оцінці енергетичної ефективності будівель, часто приймають значення постійної кратності повітрообміну для будівлі в цілому. В Україні кратність повітрообміну в житлових будівлях з природною вентиляцією приймають згідно з ДСТУ 9091:2022 "Енергетична ефективність будівель". У розрахунках енергетичного сертифіката будівель ця величина враховується як інфільтраційна. Національні стандарти також враховують можливість визначення кратності повітрообміну всередині будівлі шляхом проведення випробувань.

Визначення кратності повітрообміну, з врахуванням впливових факторів для умов експлуатації є складним завданням. Емпіричні методи визначення швидкості повітрообміну, опираються на стандарти ASHRAE і 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 [6]. Для більш ефективного повітряного потоку та забезпечення необхідної якості повітря в приміщеннях використовують чисельне моделювання для моделювання розподілу повітря за допомогою програмного забезпечення: eQuest, EnergyPlus, TRNSYS, CONTAM, DOE2, DesignBuilder.

В свою чергу експериментальні вимірювання швидкості інфільтрації все ще є актуальними через можливість отримання фактичних даних у реальному часі. Експериментально кратність повітрообміну можна визначити за допомогою методів індикаторного газу. Індикаторний газ — це 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 вентиляційному приміщенні.

Серед трьох методів спад концентрації є найбільш прийнятним, оскільки його реалізація найлегша. 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. Газу, які зазвичай використовуються як індикатори в процедурі розпаду, включають гексафторид сірки (SF_6) [7], [8] і вуглекислий газ (CO_2) [9]. Перфторвуглецеві сполуки також є поширеними індикаторами, які використовуються для вимірювання кратності повітрообміну, але в рамках методу розшифрувати PFT (Perfluorocarbon Tracer gas - перфторвуглець в якості індикаторного газу) [10]. 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 заважають мешканцям. Однак вчені [11] 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 (SF_6) був широко використовуваним газом [12], але він є потужним парниковим газом. Завдяки цьому вуглекислий газ (CO_2) став популярним вибором. CO_2 є нетоксичним індикаторним газом, який зазвичай використовується як важливий параметр у приміщенні, з фоновою 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.

У дослідженні [13] 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 експериментальними вимірюваними значеннями.

Більшість цитованих досліджень використовували методи пасивного індикаторного газу (виділення від людей) для оцінки інтенсивності вентиляції в будівлях. У дослідженні [14] було виявлено, що ця методика занижує середню вентиляцію на 30%. Масовий баланс CO_2 , створюваного мешканцями, може бути привабливим альтернативним методом прогнозування інтенсивності вентиляції будівлі. В роботі [15] 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%.

Вуглекислий газ є одним з головних забруднювачів повітря в житлових приміщеннях. Він виділяється при диханні людей, використанні побутової техніки, спаленні палива та інших джерел. У таблиці 1 наведена залежність самопочуття від концентрації газу в повітрі приміщення [16].

Таблиця 1 – Вплив вуглекислого газу на людину

| 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 [17] слідє, 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. В іншій праці [18] 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.

Дослідження інфільтрації повітря в будівлях є актуальними, оскільки вони допомагають вивчити вплив кратності повітрообміну на здоров'я людини та енерговитрати будівель. Адже з однієї сторони, забезпечення вимог кратності повітрообміну приміщень є необхідними для підтримання умов мікроклімату, а з іншого боку, надмірна вентиляція впливає на споживання енергії будівлями особливо під час сезону опалення та охолодження.

Мета та завдання

Метою роботи є параметричний аналіз впливових факторів на кратність повітрообміну в приміщенні та експериментальне дослідження концентрації CO₂ у типовій квартирі.

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні *завдання*:

- 1) аналіз впливових параметрів на повітрообмін в приміщеннях;
- 2) проведення експериментального дослідження концентрації CO₂ у приміщеннях типової квартири в літній період;
- 3) визначення фактичного повітрообміну на основі масових балансів;
- 4) порівняння отриманих фактичних значень кратності повітрообміну із нормативними значеннями із діючих стандартів.

Матеріал і результати досліджень

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження обрано існуючу однокімнатну квартиру в гуртожитку сімейного типу в м. Київ. Репрезентативна однокімнатна квартира загальною площею 37 м² розміщена на дев'ятому поверсі дев'ятиповерхової будівлі, я показано на рис.1. Будівля відповідає характеристикам масової забудови 80-х років. Площа житлової кімнати – 17,4 м², кухні – 6,3 м², коридору – 4,9 м², висота приміщень 2,5 м. Квартира має одну зовнішню стіну. Вікна і балкон репрезентативної квартири орієнтовані на південь. Вікна в квартирі з подвійним заскленням у дерев'яних спарених плетіннях, балконні двері – подвійні з частковим заскленням. У гуртожитку функціонує канална природна вентиляція. Надходження свіжого повітря в приміщення відповідно до проєкту відбувається шляхом інфільтрації, тобто через нещільності у вікнах та дверях.



Рисунок 1 – план об'єкту дослідження

Проведення досліджень

Якість повітря в квартирі залежить від цілого спектру параметрів, які поділяються на внутрішні та зовнішні, деякі з них є постійними, а деякі динамічно змінюються, основні з них наведені в таблиці 2. Експериментальне визначення кратності повітрообміну ускладнюються впливом динамічних параметрів. Тому важливо провести параметричний аналіз впливових факторів.

Таблиця 2 – Параметри, що впливають на якість повітря в приміщенні

| Параметри повітря в приміщенні | | |
|--------------------------------|--|---|
| | Зовнішні фактори | Внутрішні фактори |
| Постійні | -орієнтація за сторонами світу | -геометричні розміри приміщень, площа та об'єм -поверховість будівлі -наявність механічної та природної вентиляції |
| Змінні | -температура та вологість на вулиці -інсоляційні теплонадходження від сонця -швидкість та напрям вітру -фонове значення вуглекислого газу та інших забруднюючих речовин | -кількість присутніх, їх вік, стать та активність -початкові умови в приміщеннях -наявність внутрішніх джерел забруднення -механізми надходження свіжого повітря в приміщення, можливі схеми провітрювання -температура повітря та регулювання опалення |

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 [19] та стандарт ASTM D6245-18 [20] 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:

$$V_{CO_2} = RQ \cdot \frac{0,0055887W^{0,425}H^{0,725}M}{0,23RQ + 0,77}, \quad (1)$$

де: RQ - являє собою дихальний коефіцієнт, об'ємне співвідношення утвореного CO₂ до спожитого кисню (O₂), 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 CO₂ становить 0,006 л/с, що в перерахунку становить 42,57 г/год. Саме такі параметри середньостатистичної людини використовувались в розрахунках для даного дослідження.

Концентрація вуглекислого газу визначалась на прикладі масового балансу репрезентативних приміщень в залежності від ряду параметрів, таких як: природний повітрообмін; фонові концентрації CO₂ (зовнішня концентрація CO₂); початкова концентрація CO₂ в приміщенні; наявність людей; геометричні розміри приміщення. Методика обробки експериментальних результатів концентрації CO₂ наведена в статті [21] була використана для знаходження кратності повітрообміну.

Нижче, як приклад, наведена система рівнянь для розрахунку внутрішньої концентрації CO₂ 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:

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

Вхідні параметри: $CO_{2 \text{ кім } 0}$, $CO_{2 \text{ кор } 0}$, $CO_{2 \text{ кух } 0}$ - концентрація CO₂ початкова в приміщеннях кімнати, коридору та кухні відповідно, г/м³; $CO_{2 \text{ кім } i}$, $CO_{2 \text{ кор } i}$, $CO_{2 \text{ кух } i}$ - концентрація CO₂ в поточний момент часу в приміщеннях кімнати, коридору та кухні відповідно, г/м³;

$V_{\text{кім}}$, $V_{\text{кор}}$, $V_{\text{кух}}$ - об'єм приміщень кімнати, коридору і кухні відповідно, м³; $CO_{2 \text{ кім}}$, $CO_{2 \text{ кор}}$, $CO_{2 \text{ кух}}$, $CO_{2 \text{ вк}}$, $CO_{2 \text{ зов}}$, $CO_{2 \text{ буд}}$ - концентрація CO₂ в приміщеннях кімнати, коридору, кухні, вентканалу, фонові та на коридорі будинку відповідно, г/м³.

Визначалися: $V_{\text{пр.кім}}$, $V_{\text{пр.кор}}$, $V_{\text{пр.кух}}$, $V_{\text{пр.буд}}$ - об'єм припливного свіжого повітря до кімнати, коридору, кухні та з коридору будинку відповідно, м³/год;

Для випадку, коли спостерігалось явище ексфільтрації були виведені аналогічні рівняння.

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

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

$$n = \frac{V_{\text{пр.і}}}{V_i}, \quad (3)$$

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

Репрезентативним приміщенням для аналізу впливових факторів було обрано приміщення житлової кімнати. На рис. 2 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 рис. 2(а) – 10 м³/год, кратність повітрообміну в кімнаті в даному випадку становить 0,23 год⁻¹, на рис. 2(б) - об'єм припливного повітря 30 м³/год (кратність повітрообміну 0,69 год⁻¹), на рис. 2(в) - об'єм припливного повітря 50 м³/год (кратність повітрообміну 1,15 год⁻¹). Складова надходжень від людей відсутня.

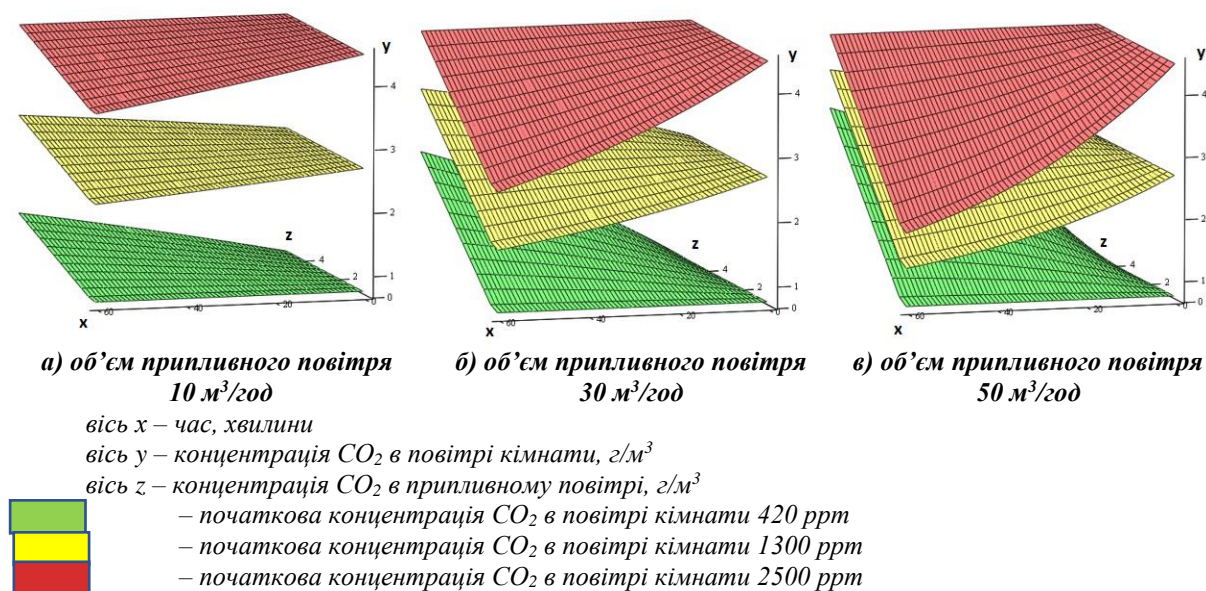


Рисунок 2 – Зміна концентрації вуглекислого газу в залежності від концентрації CO₂ в припливному повітрі

Аналізуючи результати розрахунків представлені на рис. 2 можна зробити висновок, що зі збільшенням об'єму припливного повітря що надходить до приміщення збільшується швидкість зміни концентрації CO₂ в приміщенні. При цьому, чим більша різниця між стартовою концентрацією CO₂ в приміщенні і концентрацією CO₂ в припливному повітрі, тим більший діапазон зміни концентрації CO₂.

На рис. 3 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.

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 (рис. 3а (випадки II)), рівень CO₂ в приміщенні спочатку зростає, але через деякий час досягнув свого піку і також почав зменшуватись. Для умов наведених на рис. 3а (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 рис. 3б.

Додатковим джерелом CO₂ в приміщенні є виділення від людей. Як зазначалось вище, виділення вуглекислого газу середньостатистичним чоловіком становлять близько 42,57 г/год. Присутність людей змінює тенденцію зміни концентрації CO₂ в приміщенні, що відображено на рис. 4.

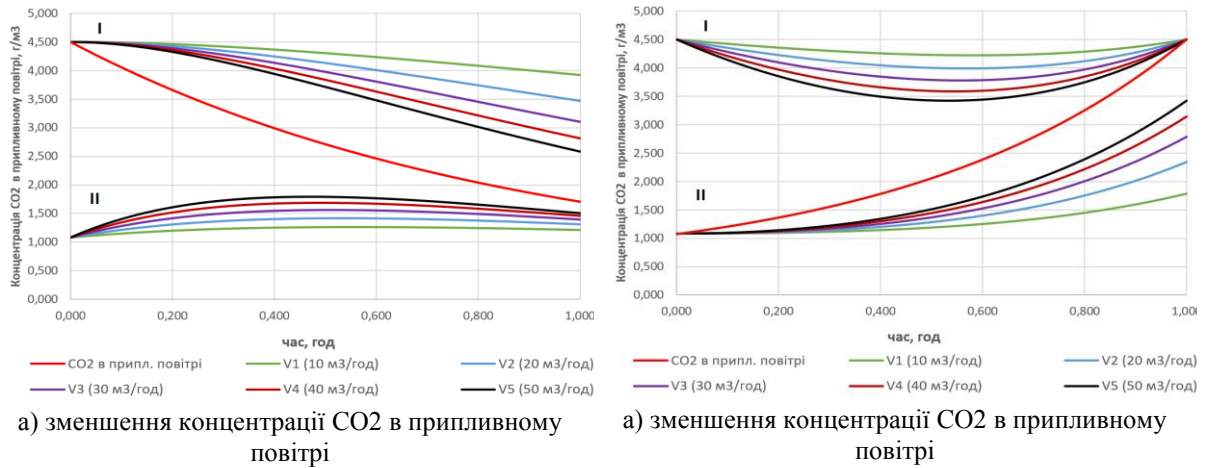
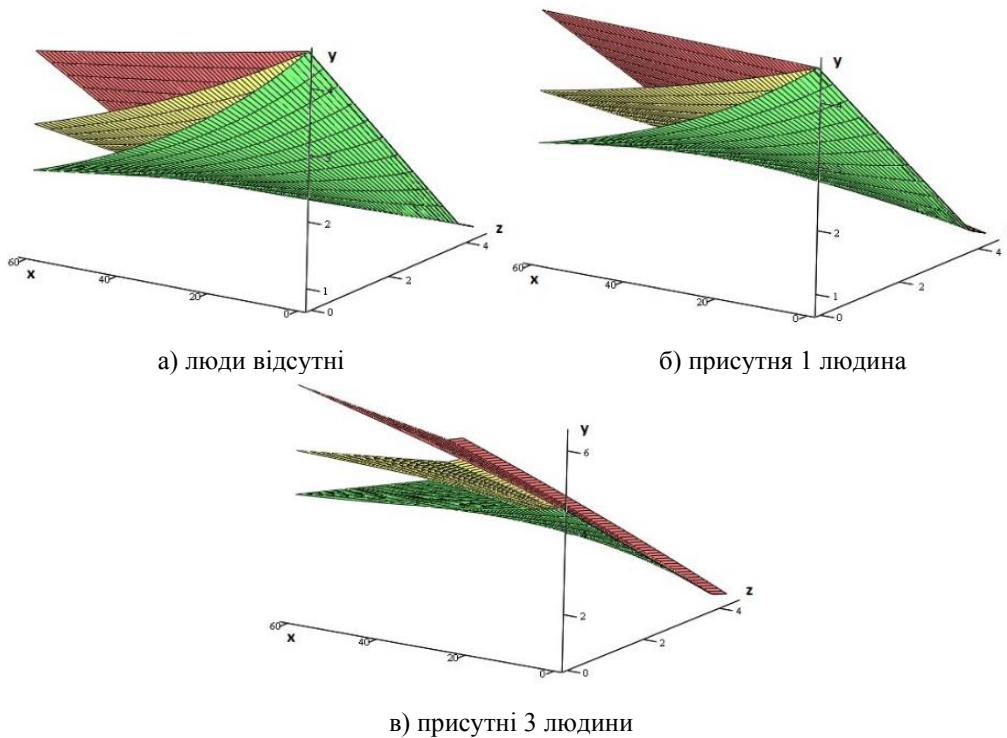


Рисунок 3 – Зміна концентрації вуглекислого газу в часі за умов динамічної зміни концентрації CO₂ в припливному повітрі



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

- об'єм припливного повітря 50 м³/год
- об'єм припливного повітря 30 м³/год
- об'єм припливного повітря 10 м³/год

Рисунок 4 – Динамічна зміна концентрації вуглекислого газу в приміщенні житлової кімнати в присутності людей

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 CO₂, 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).

Відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 [22] та ДСТУ Б EN 15251:2011 [23], рекомендований рівень вуглекислого газу в приміщеннях існуючих будівель не повинен перевищувати 800 ppm вище зовнішньої, тобто типового значення 1200 ppm. Тобто для кімнати площею 17,4 м² в якій 3 дорослі людини займаються

сидячою роботою, необхідно забезпечувати кратність повітрообміну на рівні $2,01 \text{ год}^{-1}$ щоб рівень CO_2 в повітрі не перевищував максимально допустимий рівень.

Також проводилась серія експериментальних досліджень зміни концентрації CO_2 в репрезентативних приміщеннях квартири в літній період. Підвищення рівня вуглекислого газу відбувалось шляхом спалювання сухого спирту. Вимірювання проводились в приміщеннях житлової кімнати, кухні, коридору квартири та у вентиляційному каналі, що виходить на кухню з кроком 1 хв. Заміри проводились відповідно плану експерименту наведеному в [24]. В рамках експерименту фіксувались кліматичні данні, а саме температура в приміщеннях квартири, зовнішня температура, напрямок та сила вітру. Для літнього періоду у місті Київ характерними є західний, північно-західний та північний напрямки вітру [25]. В період проведення досліджень переважаючим був північно-західний напрямок вітру. Заміри проводились в денний період, коли зовнішня температура була $(+21^\circ\text{C})$ - $(+30^\circ\text{C})$. Також на початку та вкінці експерименту фіксувались значення рівня CO_2 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.

Як і у попередніх дослідженнях [24] за результатами вимірювань чітко прослідковується залежність явищ інфільтрації та ексфільтрації від напрямку вітру. При північно-західному напрямку вітру свіже повітря надходило через вентиляційний канал (рис. 5а). При південному, південно-західному, південно-східному напрямках повітря надходило через вікна і двері, а виходить через вентиляційний канал (рис. 5б), адже тенденції зміни концентрації вуглекислого газу в приміщенні кухні і вентканалу подібні.

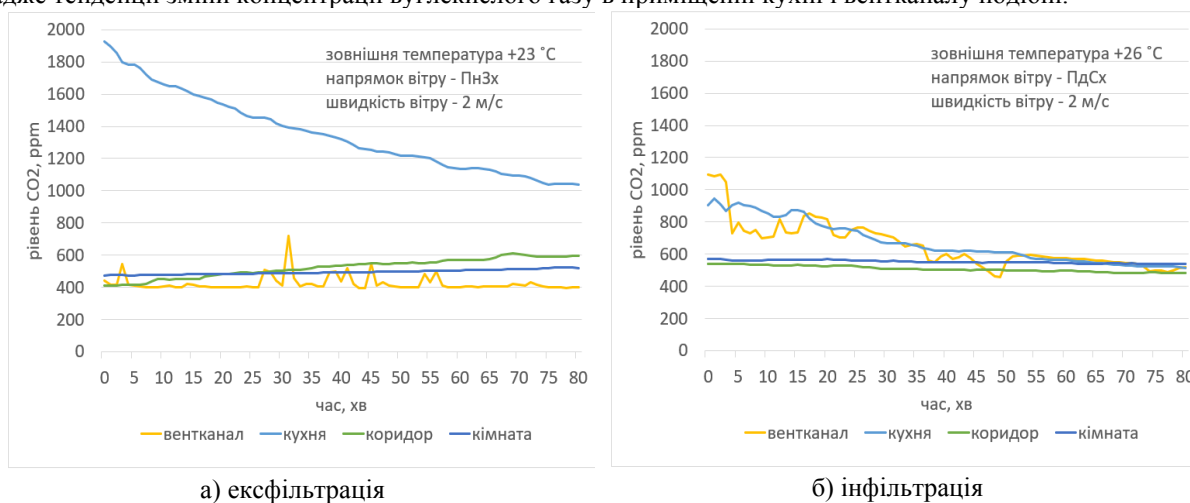


Рисунок 5 – Фактична зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири

Після обробки усіх серій досліджень, було встановлено, що виведена система рівнянь (2) достатньо точно описує фактичні зміни CO_2 в приміщеннях для обох механізмів переносу повітря. На рисунку 6 наведені графіки результатів обрахунку типових дослідів за умов підвищення рівня вуглекислого газу в різних приміщеннях квартири. Максимальна розбіжність між фактичним та розрахованим значенням становила $\pm 50 \text{ ppm}$ і пов'язана з похибкою вимірювальних приладів, а також перепадами концентрації CO_2 у вентканалі, який є спільним для усього стояка.

Згідно дослідження [24] для зимового періоду характерним є 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 Пд, відповідно при вітрі Пд, Пд-Сх, Пд-Зх напрямком, величина кратності повітрообміну більша.

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. У відповідності до стандарту ДБН В.2.2-15:2019 "Житлові будинки. Основні положення", мінімальна кратність повітрообміну при проектуванні становить $0,5 \text{ год}^{-1}$, а для кухонь - $1,5 \text{ год}^{-1}$. При проведенні енергетичної сертифікації будівель енергоаудиторами приймається, що обсяг повітрообміну в житлових будинках з природною вентиляцією становить $0,6 \text{ год}^{-1}$ відповідно до ДСТУ 9091:2022 "Енергетична ефективність будівель", що збігається із рекомендованими значеннями витрат вентиляції у стандарті EN 16798-1:2019. Відповідно стандарту ASHRAE 62.2-2022 [5] можна використовувати загальні табличні значення кратності повітрообміну (л/с) для всієї квартири які залежать від площі житла та кількості спалень, або визначити за формулою:

$$Q_{tot} = 0,15A_{floor} + 3,5(N_{br} + 1), \quad (4)$$

де:

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

A_{floor} – площа житла, м²;

N_{br} – кількість спалень.

Об'єм повітря, який обчислений за формулою (4) для квартири із однією спальнею та загальною площею 37 м², становить 12,55 літрів на секунду. Це відповідає кратності повітрообміну 0,49 год⁻¹.

Порівнюючи розраховані фактичні значення кратності повітрообміну в досліджуваній квартирі із величинами в діючих стандартах для умов експлуатації можна зробити висновок про те, що фактичні значення кратності повітрообміну перевищують нормативні.

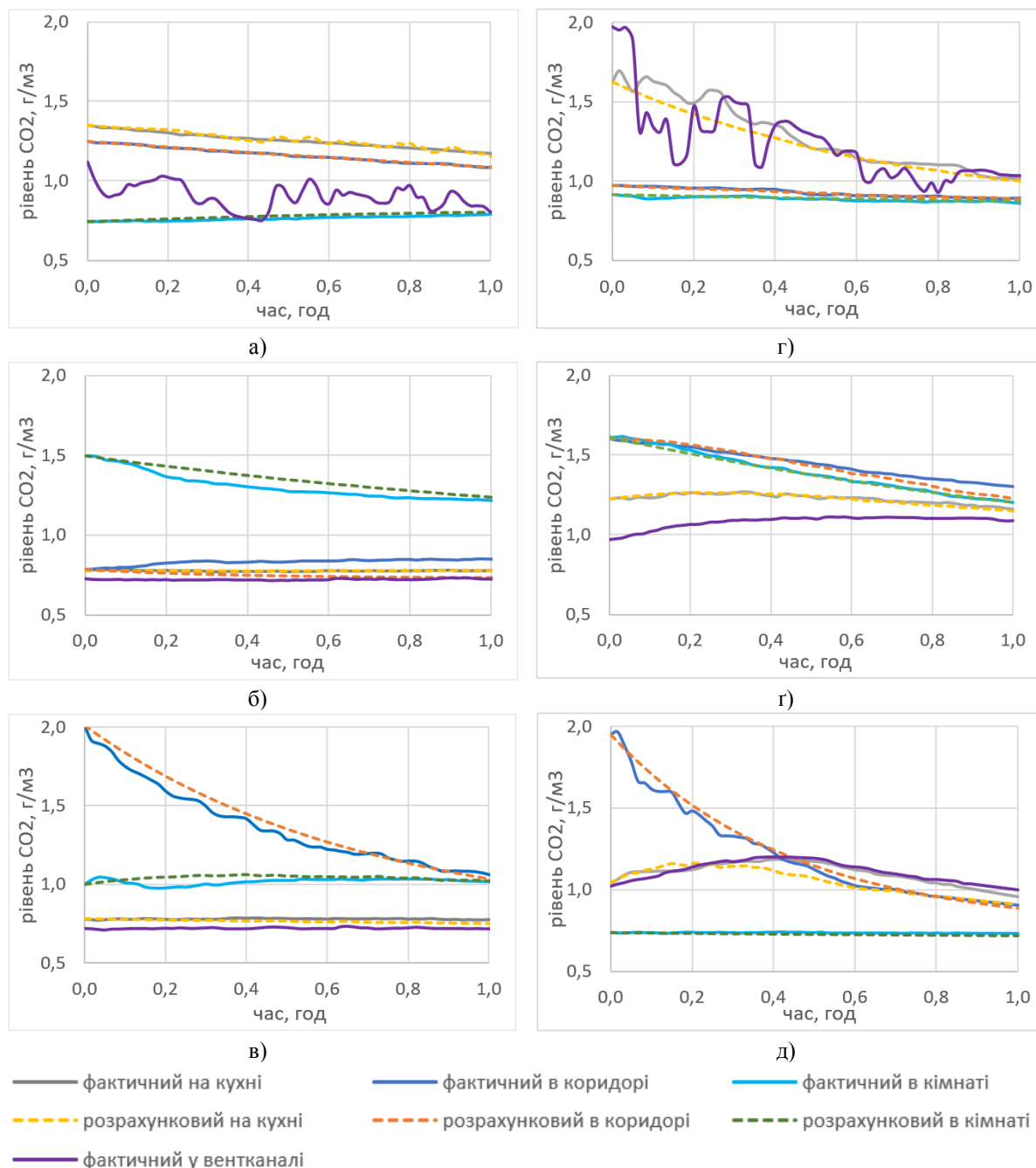


Рисунок 6 – Фактична та розрахована концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири за умов ексфільтрації (а, б, в) та інфільтрації (г, р, д) при підвищенні рівня вуглекислого газу в різних приміщеннях репрезентативної квартири а), г) - збільшення рівня CO₂ в приміщенні кухні; б), р) - збільшення рівня CO₂ в приміщенні кімнати; в), д) - збільшення рівня CO₂ в приміщенні коридору

Висновки:

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 фактично на якість повітря в приміщенні впливає не лише величина кратності повітрообміну, а і інші впливові фактори. Одним з яких є рівень вуглекислого газу. В результаті досліджень встановлено, що найбільший впливовим параметром зміни концентрації CO₂ 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 CO₂ не вище 1200 ppm необхідно дотримуватись повітрообміну в розглянутому приміщенні не нижче рівня 2,01 год⁻¹ для умов, коли в кімнаті постійно перебуває 3 людини. Тобто масовий баланс CO₂, з врахуванням кількості мешканців, може бути привабливим альтернативним методом прогнозування інтенсивності вентиляції будівлі. Співвідношення кількісних даних кратності повітрообміну, що спостерігалось для літнього та зимового періоду показує, що влітку природня концентрація відбувається переважно під впливом винд- ефекту, а взимку – комбінації переважно стак- та винд-ефекту.

Список використаної літератури.

1. Аналіз впливу розподілення повітрообміну між кімнатами на енергоспоживання квартири / В. І. Дешко та ін. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 1. С. 39–50.
2. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia / V. Földváry et al. *Building and environment*. 2017. No. 122. P. 363–372.
3. Indoor environmental quality of classrooms and occupants' comfort in a special education school in Slovak Republic / S. Vilcekova et al. *Building and environment*. No. 120. P. 29–40.
4. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2010. Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. Replaces ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007. Official edition. ASHRAE, 2012.
5. ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2022. Ventilation and acceptable indoor air quality in residential buildings. Replaces ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019. Official edition. Atlanta, Georgia : ASHRAE, 2022.
6. Bilous I., Dешко V., Sukhodub I. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of civil engineering*. 2020. Vol. 96(4). P. 27–41. URL: https://www.academia.edu/76773042/Building_energy_modeling_using_hourly_infiltration_rate (date of access: 27.09.2023).
7. Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou / A. Sfakianaki et al. *Building and Environment*. 2008. Vol. 43, no. 4. P. 398–405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.006> (date of access: 27.09.2023).
8. Shi S., Chen C., Zhao B. Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. *Building and environment*. 2015. Vol. 92. P. 528–537. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.027> (date of access: 27.09.2023).
9. Assessment of indoor environmental quality in existing multi-family buildings in North-East Europe / L. Du et al. *Environment international*. 2015. Vol. 79. P. 74–84. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.03.001> (date of access: 27.09.2023).
10. Comparing methods of modeling air infiltration through building entrances and their impact on building energy simulations / S. Goubran et al. *Energy and buildings*. 2017. Vol. 138. P. 579–590. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.071> (date of access: 27.09.2023).
11. Sherman M. H., Walker I. S., Lunden M. Uncertainties in Air Exchange using Continuous-Injection, Long-Term Sampling Tracer-Gas Methods. *International journal of ventilation*. 2014. Vol. 13(1):13-27. URL: <https://doi.org/10.1080/14733315.2014.11684034> (date of access: 27.09.2023).
12. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia / V. Földváry et al. *Building and environment*. 2017. Vol. 122. P. 363–372. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.009> (date of access: 27.09.2023).
13. Determining the ventilation and aerosol deposition rates from routine indoor-air measurements / C. H. Halios et al. *Environmental monitoring and assessment*. 2013. Vol. 186(1). URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3362-5> (date of access: 27.09.2023).
14. Sherman M. Analysis of errors associated with passive ventilation measurement techniques. *Building and environment*. 1989. Vol. 24, no. 2. P. 131–139. URL: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90002-4) (date of access: 27.09.2023).
15. Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children / G. Bekö et al. *Building and environment*. 2010. Vol. 45, no. 10. P. 2289–2295. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.014> (date of access: 27.09.2023).

16. ДСТУ Б EN 15251:2011. 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). На заміну уведено вперше ; чинний від 2023-01-01. Вид. офіц. Київ : Держ. підприємство "Укрархбудінформ", 2012. 71 с.

17. Przekop R. Oxygen transport in human alveolar sacs. Chemical engineering transactions. 2011. Vol. 24. P. 565–570. URL: <https://doi.org/10.3303/CET1124095> (date of access: 27.09.2023).

18. Kapalo P., Voznyak O. 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. 2016. Vol. 62 (4/15). P. 201–210. URL: <https://doi.org/10.7862/rb.2015.189> (date of access: 27.09.2023).

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

20. ASTM D6245-18. 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.

21. Integrated approaches to determination of CO2 concentration and air rate exchange in educational institution / V. Deshko et al. Rocznik ochrona środowiska. 2020. Vol. 22. P. 82–104.

22. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. На заміну СНиП 2.04.05-91 Опалення, вентиляція и кондиціонування. Крім розділу 5 та додатка 22 ; чинний від 2014-01-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. 147 с.

23. ДСТУ Б EN 15251:2011. 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). Чинний від 2013-07-01. Вид. офіц. Київ : М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України, 2012. 65 с.

24. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Гетманчук Г. О. Дослідження повітрообміну в квартирі на основі експериментального визначення масопереносу со2. Енергетика і автоматика. 2023. Т. 3.

25. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. На заміну СНиП 2.01.01-82 і таблицю 2 ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 ; чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Київ : Укрархбудінформ, 2011. 123 с.

V. Deshko^{1,2}, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

Bilous^{1,3}, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6640-103X

Н. Hetmanchuk¹, Ph.D. student, ORCID 0000-0003-1655-8642

¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

³General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine

PARAMETRIC ANALYSIS OF NATURAL AIR EXCHANGE IN MULTI-APARTMENT RESIDENTIAL BUILDINGS

Most multi-apartment residential buildings built in the 20th century in Central and Eastern Europe do not meet modern energy efficiency requirements. The main part of the thermal energy consumed by buildings is used to heat the supply air from outside, which is the largest share in the energy balance of buildings. The purpose of this research is a parametric analysis of influencing factors on the frequency of air exchange in the room and an experimental study of the concentration of CO₂ in a typical apartment. The object of the study is a one-room apartment in a family-type dormitory in the city of Kyiv. The dormitory has ducted natural ventilation. In the work, experimental measurements of the concentration of carbon dioxide were carried out in the premises of the living room, kitchen, corridor of the apartment and in the ventilation channel in the summer period. The indicator gas method was used to measure the air exchange rate. During air infiltration, the average rate of air exchange in the absence of people in the apartment in the living room was 2.41 h⁻¹, in the corridor - 2.34 h⁻¹, in the kitchen - 0.57 h⁻¹. Under exfiltration conditions, the average values were lower: living room – 0.24 h⁻¹, corridor – 0.94 h⁻¹, kitchen – 0.52 h⁻¹. The dependence between wind directions and the phenomena of infiltration and exfiltration in the premises of the apartment was recorded. As a result of the research, it was established that the most influential parameter of the change in the concentration of CO₂ in the room is the release from people's breath. It follows from the simulation results that to ensure the regulatory level of CO₂ concentration is not higher 1500 ppm, it is necessary to observe the air exchange in the considered room not lower than the level of 1.51 h⁻¹ for conditions when 2 people are constantly in the room. That is, the mass balance of CO₂, which takes into account the number of inhabitants, can be an attractive alternative method for predicting the intensity of ventilation of a building.

Keywords: air exchange, natural ventilation, carbon dioxide concentration, mass transfer, parametric analysis, microclimate conditions

References

1. V. I. Deshko, I. Yu. Bilous, I. O. Sukhodub, and O. I. Yatsenko, "Analiz vplyvu rozpodilennia povitroobminu mizh kimmnatamy na enerhospozhyvannia kvartyry", *Enerhetyka: Ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, no. 1, pp. 39–50, 2021.
2. V. Földváry, A. Aaa, A. Aaa, and A. Aaa, "Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia", *Building Environ.*, no. 122, pp. 363–372, 2017.
3. S. Vilcekova, L. Meciarova, E. Burdova, and D. Kosicanova, "Indoor environmental quality of classrooms and occupants' comfort in a special education school in Slovak Republic", *Building Environ.*, no. 120, pp. 29–40.
4. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2010, ANSI/ASHRAE, 2012.
5. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2022, ASHRAE, Atlanta, Georgia, 2022.
6. I. Bilous, V. Deshko, and I. Sukhodub, "Building energy modeling using hourly infiltration rate", *Mag. Civil Eng.*, vol. 96(4), pp. 27–41, 2020. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: https://www.academia.edu/76773042/Building_energy_modeling_using_hourly_infiltration_rate
7. A. Sfakianaki, K. Pavlou, M. Santamouris, and I. Livada, "Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou", *Building Environ.*, vol. 43, no. 4, pp. 398–405, 2008. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.006>
8. S. Shi, C. Chen, and B. Zhao, "Air infiltration rate distributions of residences in Beijing", *Building Environ.*, vol. 92, pp. 528–537, 2015. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.027>
9. L. Du, T. Prasauskas, V. Leivo, and M. Turunen, "Assessment of indoor environmental quality in existing multi-family buildings in North-East Europe", *Environ. Int.*, vol. 79, pp. 74–84, 2015. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.03.001>
10. S. Goubran, D. Qi, W. F. Saleh, and L. (. Wang, "Comparing methods of modeling air infiltration through building entrances and their impact on building energy simulations", *Energy Build.*, vol. 138, pp. 579–590, 2017. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.071>
11. M. H. Sherman, I. S. Walker, and M. Lunden, "Uncertainties in Air Exchange using Continuous-Injection, Long-Term Sampling Tracer-Gas Methods", *Int. J. Ventilation*, vol. 13(1):13-27, 2014. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14733315.2014.11684034>
12. V. Földváry, G. B. Bekö, S. Langer, K. Arrhenius, and D. Petráš, "Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia", *Building Environ.*, vol. 122, pp. 363–372, 2017. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.009>
13. C. H. Halios, C. G. Helmis, K. Deligianni, and S. Vratolis, "Determining the ventilation and aerosol deposition rates from routine indoor-air measurements", *Environmental Monit. Assessment*, vol. 186(1), 2013. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3362-5>
14. M. Sherman, "Analysis of errors associated with passive ventilation measurement techniques", *Building Environ.*, vol. 24, no. 2, pp. 131–139, 1989. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90002-4)
15. G. Bekö, T. Lund, F. Nors, and J. Toftum, "Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children", *Building Environ.*, vol. 45, no. 10, pp. 2289–2295, 2010. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.014>
16. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen dlia proektuvannia ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel po vidnoshenniu do yakosti povitria, teplovoho komfortu, osvittlennia ta akustyky (en 15251:2007, idt), DSTU B EN 15251:2011, Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, Kyiv, 2012.
17. R. Przekop, "Oxygen transport in human alveolar sacs", *Chem. Eng. Trans.*, vol. 24, pp. 565–570, 2011. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3303/CET1124095>
18. P. Kapalo and O. Voznyak, "Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode", *J. Civil Engineering, Environ. Architecture*, vol. 62 (4/15), pp. 201–210, 2016. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7862/rb.2015.189>
19. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013 ASHRAE Handbook : Fundamentals. Atlanta, GA: ASHRAE, 2013.
20. Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilatio, ASTM D6245-18, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
21. V. Deshko, I. Bilous, V. Vynogradov-Saltykov, M. Shovkaliuk, and H. Hetmanchuk, "Integrated approaches to determination of CO2 concentration and air rate exchange in educational institution", *Rocz. Ochr. Srodowiska*, vol. 22, pp. 82–104, 2020.
22. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia, DBN V.2.5-67:2013, Instytut «UkrNDIspetsbud», Kyiv, 2013.
23. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen dlia proektuvannia ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel po vidnoshenniu do yakosti povitria, teplovoho komfortu, osvittlennia ta akustyky (EN 15251:2007, IDT), DSTU B EN 15251:2011, DP «Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivnykh konstruktiv» (NDIBK), Kyiv, 2012.
24. V. I. Deshko, I. Yu. Bilous, and H. O. Hetmanchuk, "Doslidzhennia povitroobminu v kvartyri na osnovi eksperymentalnoho vyznachennia masoperenosu so2", *Enerhetyka i avtomatyka*, vol. 3, 2023.
25. Budivselna klimatolohiia, DSTU-N B V.1.1-27:2010, Minrehionbud Ukrainy, Kyiv, 2011.

Надійшла: 17.10.2023

Reviewed: 17.10.2023