

УДК 620.9

ДЕШКО В.І., БІЛОУС І.Ю., ВИНОРАДОВ-САЛТИКОВ В.О.,  
СУХОДУБ І.О., ЯЦЕНКО О.І.

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

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ТА  
ПОВІТРООБМІНУ В ЗАКЛАДАХ ОСВІТИ ТА ЖИТЛОВИХ  
БУДІВЛЯХ**

**Мета.** Застосувати інтеграцію підходів до визначення кратності повітрообміну на основі концентрації  $CO_2$  в освітніх закладах та житлових будівлях України.

**Методика.** Розглядаються експериментально-розрахункове визначення кратності повітрообміну з врахуванням мінливості експлуатаційно-поведінкових особливостей відвідувачів/мешканців будівель. Застосовуються загальнонаукові методи аналізу та синтезу, а також експериментальні методи.

**Результати.** Рекомендації по забезпеченню умов комфорту з точки зору якості повітря в приміщеннях розглянутих об'єктів, надання рекомендацій, щодо умов експлуатації приміщень, графік провітрювання.

**Наукова новизна.** Розвинуто комплексний підхід до поглибленого аналізу енергоспоживання, удосконалено процедури оцінювання якості повітря та рівня повітрообміну в будівлях з урахуванням мінливості умов експлуатації.

**Практична значимість.** Проведено експериментальні дослідження зміни концентрації  $CO_2$  в трьох школах, вищому навчальному закладі та житловій будівлі. Результати проведених досліджень дозволяють встановити фактичний рівень концентрації  $CO_2$  та кратності повітрообміну при різних умовах експлуатації та визначити динаміку зміни досліджуваного фактору в часі під впливом експлуатаційних та поведінкових характеристик будівель в робочі години, при дотриманні комфортних умов, та в години невикористання приміщень. Отримані результати дозволяють надати рекомендації, щодо забезпечення якості повітрообміну в приміщеннях та забезпечення комфортних умов праці/навчання та проживання. Використання експериментально-розрахункових значень кратності повітрообміну для приміщень різного призначення дозволить уникнути при математичному моделюванні завищення рівня енергоспоживання будівель, яке виникає при використанні нормативних значень кратності, а також більш точно наблизити результати моделювання рівня енергетичної ефективності будівель до реальних умов, та підібрати оптимальні графіки керування інженерними мережами будівель для забезпечення умов комфорту з врахуванням переривчастих режимів експлуатації будівель.

**Ключові слова.** заклади освіти, повітрообмін, рівень  $CO_2$ , умови комфорту, якість повітря.

**Вступ.** Ефективне використання енергетичних ресурсів займає одне з основних місць сталого розвитку країни. З огляду на підвищення рівня життя, урбанізацію, частка споживання енергії будівлями зростає. Цей спектр проблем стосується громадського та житлового фонду будівель. Беручи до уваги зношення будівельного фонду житлових та громадських будівель та недофінансованість закладів освіти, питання ефективного використання енергетичних ресурсів займає важливе місце в суспільстві [1]. Забезпечення ефективного використання енергії без втрати комфорту є основними напрямками сьогодення [2, 3]. Експлуатація та технічне обслуговування будівлі, діяльність та поведінка мешканців, якість навколишнього середовища можуть мати значний вплив [4]. Зменшення споживання енергії та забезпечення комфортних умов [3, 5] є важливими синергетичними ефектами при впровадженні енергозберігаючих заходів.

Останнім часом велика увага приділяється вентиляційній складовій тепловтрат будівлі, яка може становити 30-50% загального споживання енергії [6, 7]. Для забезпечення належних умов праці з точки зору вентиляції в стандарті EN 12831: 2003 [8] регламентується нормативні значення кратності повітрообміну повітря. В системах вентиляції будівель швидкість повітрообміну забезпечується двома шляхами: природним і механічним. У більшості існуючих/старих будівель України не передбачене або не працює механічна вентиляція. Таким чином, через зношеність будівельного фонду вентиляція приміщень здійснюється шляхом надходження свіжого повітря через повітряні канали вентиляційної системи, провітрювання та нецільності у вікна, дверях тощо [5].

Особливості впровадження енергозберігаючих заходів в Україні є поліпшення теплофізичних властивостей огорожувальних конструкцій будівлі, що в свою чергу призводить до суттєвого збільшення концентрації CO<sub>2</sub> у приміщеннях з природною вентиляцією [9]. Зменшення цього компонента є другим кроком у впровадженні енергозберігаючих заходів в Україні. Тому в контексті широкого впровадження програм, спрямованих на підвищення теплозахисних властивостей огорожувальної конструкції будівлі, більшу увагу слід приділяти факторам, що впливають на природну вентиляцію. На повітрообмін впливає велика кількість параметрів, які умовно можна розділити на внутрішні та зовнішні (рис.1).

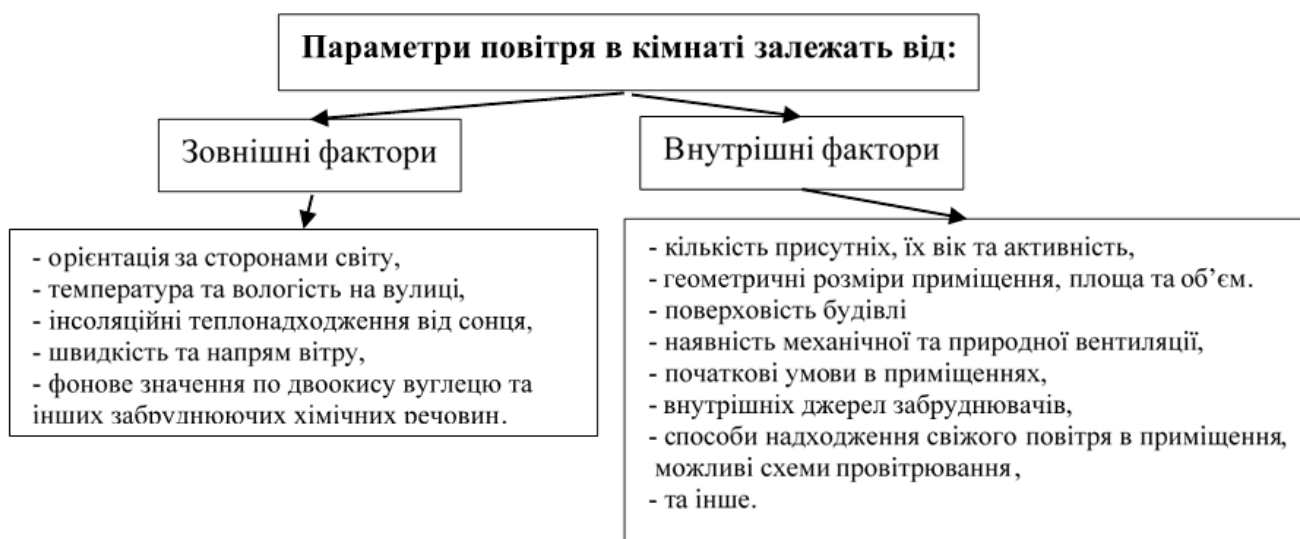


Рис.1 Параметри, що впливають на якість повітря в приміщенні

Інтенсивне використання навчальних будівель призводить до значного збільшення концентрації CO<sub>2</sub> у приміщенні, що потребує додаткового вивчення. В житлових будівлях зростання концентрації CO<sub>2</sub> пов'язано з покращеними характеристиками повітропроникності огорожень та рідким провітрюванням приміщень шляхом відкриття вікон та дверей.

**Метою дослідження** є застосування інтеграцію підходів до визначення кратності повітрообміну на основі концентрації CO<sub>2</sub> в освітніх закладах та житлових будівлях України.

**Постановка завдання.** Завдання дослідження полягає у:

- 1) проведенні натурних експериментів в будівлях житлово-комунальної сфери;

- 2) створення математичної моделі приміщень для обробки експериментальних даних;
- 3) дослідженні використання даних про концентрацію CO<sub>2</sub> для визначення швидкості обміну повітря.

**Методи дослідження.** Існують різні методи вимірювання швидкості обміну повітря, наприклад тести на SF<sub>6</sub> [10], але зазвичай вони досить складні та дорогі. На основі польового експерименту з метою визначення природного повітрообміну для будівель у Південному Китаї та Європі було проведено ряд досліджень [11, 12]; дослідження вимагають спеціального обладнання та забезпечують середнє уявлення про повітрообмін з урахуванням мінливості внутрішніх та зовнішніх параметрів, що впливають на повітрообмін з часом. Зручний метод моніторингу швидкості обміну повітря за допомогою безперервних датчиків CO<sub>2</sub> був розроблений як в лабораторних експериментах, так і на польових дослідженнях у класах в Китаї [13]. Подібні підходи використовувались у статтях [14, 15].

У статті [9] зазначається, що житлові будинки в Центральній та Східній Європі не відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності. Крім того, якості повітря в приміщеннях не приділяється належна увага. Автори [9] провели дослідження концентрації CO<sub>2</sub> у житловому будинку в Словаччині до та після реконструкції. Було встановлено, що після реконструкції повітрообмін значно зменшується, а рівень CO<sub>2</sub> в приміщенні підвищується, тобто реалізація заходів щодо поліпшення теплозахисних властивостей огорожувальної конструкції будівлі повинна йти разом із заходами по належному забезпеченню якості повітря в приміщеннях (механічною вентиляцією).

Для шкіл в Центральній Іспанії з природним повітрообміном [16], що відбувається через відкривання вікон, було проведено дослідження щодо концентрації CO<sub>2</sub> у класах на період опалення та кондиціонування, що містить рекомендації щодо провітрювання класів, які можуть варіюються від 5 до 20 хвилин, залежно від ряду внутрішніх та зовнішніх факторів. Подібні проблеми з високим рівнем CO<sub>2</sub> характерні для шкіл в Україні.

Імітаційне моделювання на основі фізичних та емпіричних методів розрахунку широко використовується для аналізу природного повітрообміну. Фізичні моделі для визначення природного повітрообміну досить складні і вимагають великої кількості вихідних параметрів, що значно ускладнює розрахунки для будівель з багатьма зонами. У цих підходах використовуються алгебраїчні рівняння, що співвідносять особливості будівлі, такі як висота, орієнтація, повітропроникність огороження будівлі та погодні умови. Один з перших підходів був розроблений Шоу та Тамурою [17], який базувався на єдиному рівнянні, яке поєднувало ефект стека та вітру для розрахунку природного обміну повітря.

З огляду підходів впливає, що вивчення якості повітря в приміщенні та параметрів повітрообміну вимагає значної уваги як у низькоефективних будівлях, так і в ефективних будівлях.

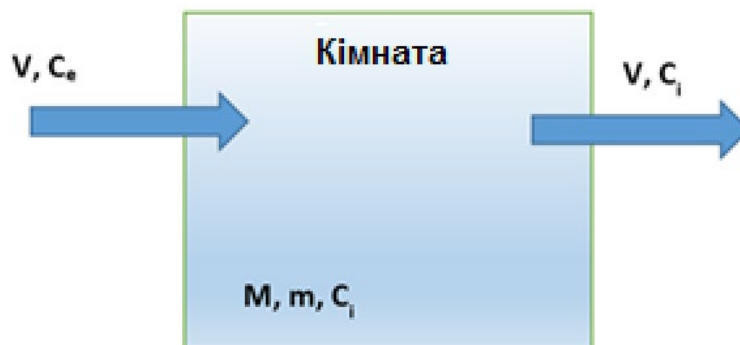
**Об'єкти дослідження.** Дослідження проводились послідовно та набули розвитку в трьох школах, ВНЗ та житловому будинку. Всі школи типові, побудовані за в роки масової забудови, Н-типу. На основі школи 1 проводилось обґрунтування визначення репрезентативних приміщень, досліджувалось локальне місце встановлення датчиків в приміщеннях для визначення концентрації CO<sub>2</sub> та інших вхідних параметрів для розрахунку природної кратності повітрообміну. В школі 2 було проведено виміри концентрації CO<sub>2</sub> в

репрезентативних приміщеннях на початку та в кінці занять. В школі 3 було проведено виміри концентрації CO<sub>2</sub> для двох варіантів: 1) заміри концентрації CO<sub>2</sub> в репрезентативних приміщеннях на початку та в кінці занять; 2) фіксування динаміки зміни концентрації CO<sub>2</sub> в репрезентативних приміщеннях з 10 хв. кроком з врахуванням зміни кількості студентів, фізичної активності та графіку зайнятості аудиторії. В навчальному корпусі КПП ім. Ігоря Сікорського проводились експериментальні визначення зміни концентрації в репрезентативних приміщеннях в часі. Для житлової будівлі проводилось дослідження для двох варіантів: 1) без провітрювання; 2) з провітрюванням (відкрите вікно на мікропровітрювання). Крім цього, проводилось локальне дослідження фонові зовнішньої концентрації CO<sub>2</sub> біля розглянутих об'єктів впродовж доби з різною віддаленістю від них.

Вимірюється: зовнішня та внутрішня температура та відносна вологість повітря; швидкість та напрямок вітру на вулиці; концентрація CO<sub>2</sub> на вулиці/фонова; графік перебування людей та їх кількість у приміщенні; вид фізичної активності людей.

Для дослідження використовувався комплексний прилад регістратор CO<sub>2</sub> TR-75U1 з діапазоном вимірювань CO<sub>2</sub>: 0...9999 ppm, температури: 0...55°C, відносної вологості: 10...95%.

**Методика аналізу взаємозв'язку даних по концентрації CO<sub>2</sub> з повітрообміном, а також обробки експериментальних даних.** На основі балансів повітряних потоків та концентрацій CO<sub>2</sub> в приміщенні (рис. 2) були отримані наступні співвідношення (1-5).



$V_r$  – об'єм кімнати, м<sup>3</sup>;  $V$  – повітрообмін, м<sup>3</sup>/год;  $m$  – виділення CO<sub>2</sub> в приміщенні, г/год;

$M$  – маса CO<sub>2</sub> в приміщенні, г;  $M_0$  – початкова маса CO<sub>2</sub> в приміщенні, г;

$C_e, C_i, C_{i0}$  – концентрація CO<sub>2</sub> в припливному повітрі, у кімнаті в заданий момент часу та початкова відповідно, г/м<sup>3</sup>

Рис. 2. Схема зміни концентрацій CO<sub>2</sub> в приміщеннях

Концентрація CO<sub>2</sub> в приміщенні визначається:

$$C_i = \frac{M}{V_r}, \quad (1)$$

Зміна кількості CO<sub>2</sub> у часі:

$$\frac{dM}{d\tau} = m + V \cdot C_e - \frac{V}{V_r} M, \quad (2)$$

Кількість CO<sub>2</sub> через інтервал часу  $\Delta\tau_j$ :

$$M_j = M_{j-1} + \overline{m}_j \Delta \tau_j + \overline{V}_j \cdot \overline{C}_{e,j} \Delta \tau_j - \frac{\overline{V}_j}{V_r} \cdot \frac{M_{j-1} + M_j}{2} \Delta \tau_j, \quad (3)$$

Інтегрування рівняння (2) при сталих значеннях  $C_e$ ,  $V$  and  $m$  дає вираз для маси  $\text{CO}_2$  в внутрішньому повітрі в будь-який момент часу  $\tau$ :

$$M = \frac{V_r}{V} \left\{ m + V \cdot C_e + \left[ \frac{V}{V_r} \cdot M_0 - (m + V \cdot C_e) \right] \cdot e^{-\frac{V}{V_r} \tau} \right\}, \quad (4)$$

З формули (4) слідує, що внутрішня концентрація  $\text{CO}_2$  при сталих значеннях  $C_e$ ,  $V$  і  $m$  визначається:

$$C_i = \frac{m}{V} + C_e + \left[ C_{i0} - \left( \frac{m}{V} + C_e \right) \right] \cdot e^{-\frac{V}{V_r} \tau}, \quad (5)$$

Експериментальні дані зміни концентрації  $\text{CO}_2$  в приміщенні в часі оброблялися рівнянням (5).

**Результати дослідження.** Експериментальне визначення фонові концентрації  $\text{CO}_2$  впродовж доби локально біля розглянутих об'єктів показало, що фонові концентрації  $\text{CO}_2$  знаходяться в діапазоні 400-420 ppm. На прикладі школи 1 проводилось експериментальне дослідження визначення локальних вимірів концентрації  $\text{CO}_2$  в приміщеннях в період та після закінчення занять. Були проведені вимірювання розподілу концентрації  $\text{CO}_2$  після занять по площі класу, за яким розбіжність між значеннями на рівні парт складала 30...180 ppm. Дослідження показали, що прийнятним є використання інтегральної характеристики концентрації  $\text{CO}_2$  в репрезентативному приміщенні в центрі кімнати на висоті біля одного метру (область робочої зони).

Виміри внутрішньої концентрації  $\text{CO}_2$  в школі 2 в період канікул були досить близькими до фонові концентрації, виключенням стали класи, де працювали гуртки. Період навчання проводились контрольні заміри концентрації  $\text{CO}_2$  в приміщеннях на початку занять, після занять та після перерви.

Встановлено концентрація  $\text{CO}_2$  змінюється впродовж заняття на 700-1100 ppm та суттєво перевищує норму. За перерву концентрація  $\text{CO}_2$  знижується на 500-1000 ppm, залежно від виду провітрювання. В школі 3 проводились 10 хв. виміри концентрації  $\text{CO}_2$  в репрезентативних класах. На рис. 3 наведено визначення кратності повітрообміну на прикладі старших класів протягом трьох занять та двох перерв.

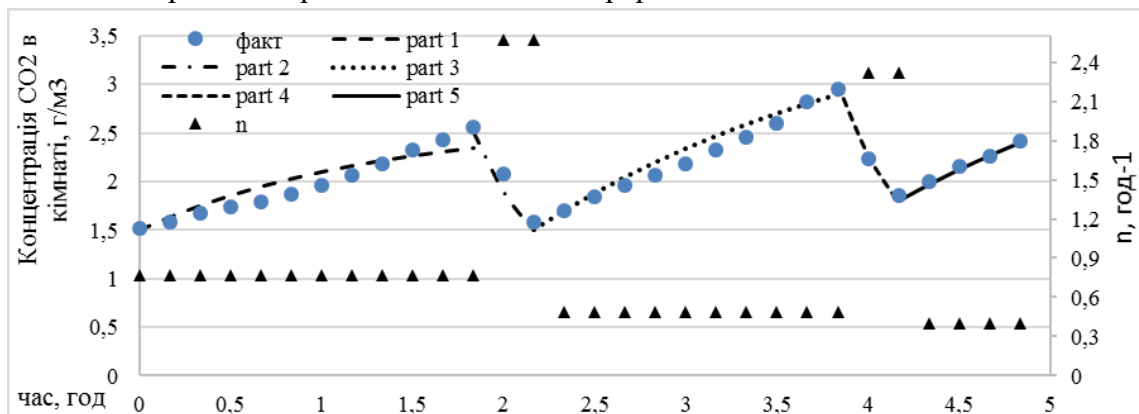


Рис. 3 Зміна внутрішньої концентрації  $\text{CO}_2$  та кратності повітрообміну в навчальному класі школи 3

Кратність повітрообміну в період занять (part 1,3,5) знаходиться в діапазоні  $0,5 \dots 0,75 \text{ год}^{-1}$  (закриті вікна та двері). На перервах учні залишають приміщення та відбувається провітрювання класів через відкриття вікон та дверей, в цей період (part 2,4) кратність повітрообміну збільшується до  $2,9-3,5 \text{ год}^{-1}$ . Для розглянутого діапазону середньозважена кратність повітрообміну становить  $0,93 \text{ год}^{-1}$  та навіть при примусовому провітрюванні класів є недостатньою з точки зору забезпечення належного рівня повітрообміну та допустимої концентрації  $\text{CO}_2$ .

Аналогічні дослідження зміни концентрації  $\text{CO}_2$  проводилось для навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського. Будівля протяжна 7 поверхова з технічним поверхом, основна частина навчальних аудиторій та лабораторій має одне зовнішнє огороження орієнтоване на Пд чи Пн. В корпусі провітрювання навчальних аудиторій здійснюється шляхом відкриття дверей на коридори, механічна вентиляція не працює. Дослідження проводились з кроком 15 хв. На прикладі обробки експериментальних даних по зміні концентрації  $\text{CO}_2$  в навчальних аудиторіях проведено розрахунок природної кратності повітрообміну (рис. 4).

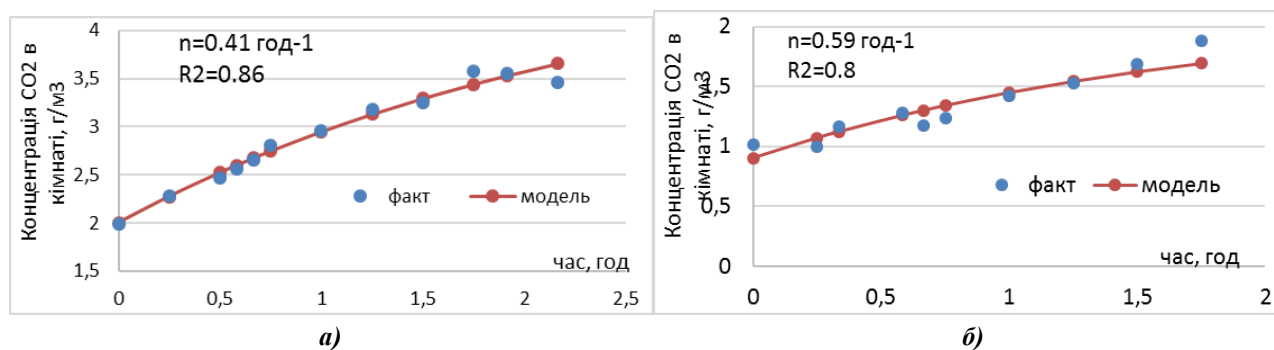


Рис. 4. Повітрообмін для приміщень розташованих на 3 поверсі (а) і 1 поверсі (б) південної орієнтації

Зменшення кратності повітрообміну на 3 поверсі пояснюється зменшенням стак ефекту, відповідно до складових механізму повітрообміну.

Аналогічні дослідження проводились для великих лекційних аудиторій, де вплив провітрювання під час перерви виявився більш вираженим. З аналізу слідує, що значення середнього повітрообміну в таких аудиторіях становить  $0,48 \text{ год}^{-1}$  (оброблення графіку середнім значеннями  $V$ ), при окремій обробці частових інтервалів з провітрюванням та встановлено, що кратність повітрообміну в періоди закритих дверей становить  $0,4-0,6 \text{ год}^{-1}$ , при відкритих дверях може сягати  $0,95 \text{ год}^{-1}$ . Середньозважена кратність повітрообміну для розглянутого проміжку часу при кусковому аналізі становить  $0.43 \text{ год}^{-1}$ , на відміну від  $0.48 \text{ год}^{-1}$  для усередненого рівняння.

Житлова будівля суттєво відрізняється за експлуатаційними показниками від закладів освіти, що були розглянуті вище. Дослідження проводились в 2-кімнатній квартирі, яка відповідає сучасним тепло-фізичним вимогам, яка розташована на 4 поверсі 5-поверхової будівлі. Виміри концентрації  $\text{CO}_2$  фіксувалися з кроком 1 хв. Проводились наступні натурні експерименти замірів концентрації  $\text{CO}_2$  в кімнатах та кухні: 1) з та без додаткових внутрішніх виділень  $\text{CO}_2$ ; 2) з та без мікропровітрювання в кімнатах. Будівля відповідає теплоізоляційним сучасним вимогам, а отже для такого типу будівель вентиляційна складова є найбільшою в загальному енергобалансі втрат будівлі.

Враховуючи, що виділення CO<sub>2</sub> в житлових приміщеннях нижчі ніж в освітніх закладах. Попередньо перед проведенням експерименту штучно збільшувалася концентрація CO<sub>2</sub> шляхом спалювання таблеток сухого спирту в досліджуваних приміщеннях. Це дозволить більш якісно відстежувати динаміку зміни концентрації CO<sub>2</sub> в приміщеннях.

На початку дослідження при закритому вікні і дверях в кімнаті 1 концентрація CO<sub>2</sub> знаходиться на рівні 2000 ppm, після години з відкритими дверима на коридор концентрація CO<sub>2</sub> зменшилася 1700 ppm, тобто на 300 ppm. При закритих дверях та вікні в кімнаті 1 аналогічна зміна концентрації CO<sub>2</sub> на 300 ppm відбувається за 3 год. Якщо вікно відкрите на мікропровітрювання та зачинені двері за 2 години концентрація CO<sub>2</sub> в кімнаті 1 змінюється від 3000 ppm до 580 ppm.

В кімнаті 2 при закритих вікнах та дверях за відсутності людей концентрація CO<sub>2</sub> змінюється від 1950 ppm до 1250 ppm за 6 годин. За умови відкритого вікна на мікропровітрювання та відкритих внутрішніх міжкімнатних дверях за 2 год. концентрація CO<sub>2</sub> зменшується від 2850 ppm до 1050 ppm, тобто на 1800 ppm. Концентрація CO<sub>2</sub> в кімнаті 2 повільніше зменшується порівняно з кімнатою 1, що пояснюється тим, що вікно з кімнати 2 відкривається на застелений балкон на відміну від кімнати 1. Потрібно відмітити, що високі концентрації CO<sub>2</sub> в приміщенні створені штучно для дослідження динаміки зміни CO<sub>2</sub> різними механізмами провітрювання.

На кухні встановлена витяжка потужності 200 м<sup>3</sup>/год. Проведено вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> з та без працюючої витяжки. Під час приготування їжі на газовій плиті протягом 30 хв. концентрація CO<sub>2</sub> збільшується від 1500 ppm до 2200 ppm, тобто на 700 ppm без працюючої витяжки та зачиненому вікні. За умови інтервальної роботи витяжки в період приготування їжі концентрація CO<sub>2</sub> мала зростаючу і спадаючу тенденцію та знаходилася в діапазоні 2200...1300 ppm. Спочатку спостерігається зменшення на 910 ppm за 1 год, далі зростання на 300 ppm за 15 хв. (вимкнена витяжка), подальші 30 хв. концентрація CO<sub>2</sub> зменшується на 200 ppm.

Використовуючи формулу (5) було оброблено експериментальні дані, що дозволили визначити фактичну кратність повітрообміну. Кратність повітрообміну при закритих вікнах та дверях становить кімнаті 1 – 0,14 год<sup>-1</sup>, в кімнаті 2 – 0,1 год<sup>-1</sup>, в кухні – 0,3 год<sup>-1</sup> (рис. 5). З проведеного аналізу балансів повітрообміну в квартирі слідує, що для житлових кімнат характерним є інфільтрація повітря, а на кухні – ексфільтрація.

За умови мікропровітрювання в кімнатах створюється наступна кратність повітрообміну в: кімнаті 1 – 1,4 год<sup>-1</sup>, кімнаті 2 – 0,73 год<sup>-1</sup> (вікна виходять на застелений балкон) (рис. 6), кухня – 1,4...1,5 год<sup>-1</sup> (працює витяжка) (рис. 7).

На рис. 5 наведено зміну концентрації CO<sub>2</sub> в житлових приміщеннях (в кімнаті 1 рис. 2,а, в кімнаті 2 - рис. 2.,б) без провітрювання та відсутності людей.

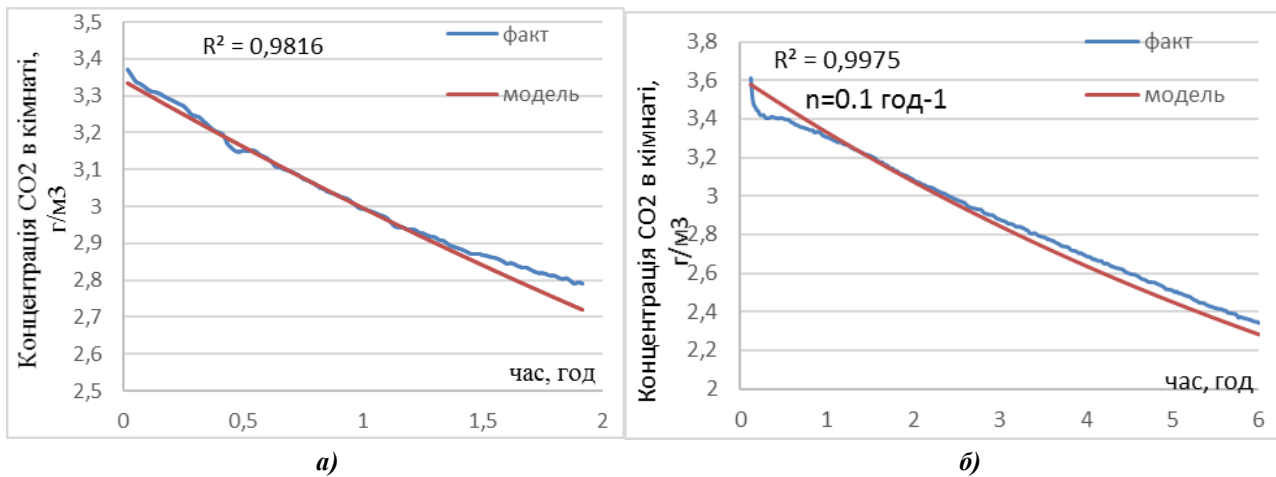


Рис. 5. Повітрообмін в кімнаті 1 (а) та кімнаті 2 (б) без провітрювання

На рис. 6 наведено зміну концентрації  $\text{CO}_2$  в житлових приміщеннях (кімната 1 - рис. 3,а, кімната 2 - рис. 3,б) з мікропровітрюванням. На відміну від рис. 5 на рис. 6 спостерігається більша кривизна, що пояснюється збільшенням кількості свіжого повітря, яке надходить кімнати.

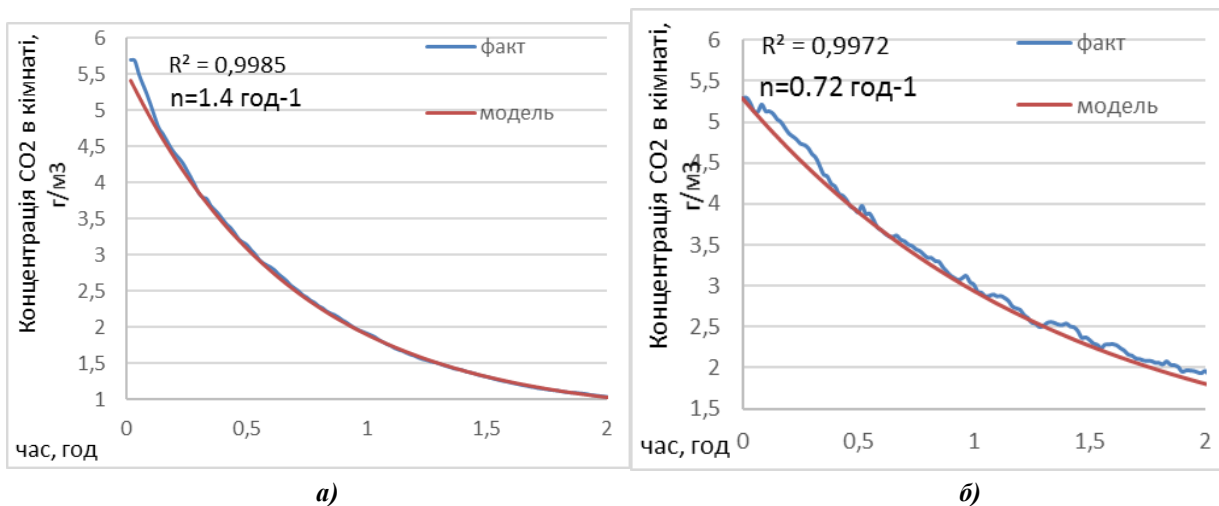


Рис. 6. Повітрообмін в кімнаті 1 (а) і кімнаті 2 (б) з мікропровітрюванням

На рис. 7 наведено зміну концентрації  $\text{CO}_2$  в часі для переривчастих режимів роботи витяжки. З рис. 7 видно, що в період відсутності роботи витяжки та закритому вікні кратність повітрообміну становить  $0,15 \text{ год}^{-1}$ .

Експериментальні дослідження показують, що в розглянутій квартирі за умови відсутності штучного провітрювання або механічної вентиляції кратність повітрообміну знаходиться на рівні  $0,1 \dots 0,155 \text{ год}^{-1}$ , що пояснюється високим опором повітропроникності огорожувальних конструкцій. Отримані результати досліджень відповідають аналогічним результатам інших досліджень [5]. Потрібно відмітити, що нормативне значення рівня концентрації  $\text{CO}_2$  для житлових та громадських будівель знаходиться в діапазоні  $750 \dots 1000 \text{ ppm}$ , кратність повітрообміну: в житлових будівлях –  $0,8 \text{ год}^{-1}$ , школи, ВНЗ –  $1 \text{ год}^{-1}$ .



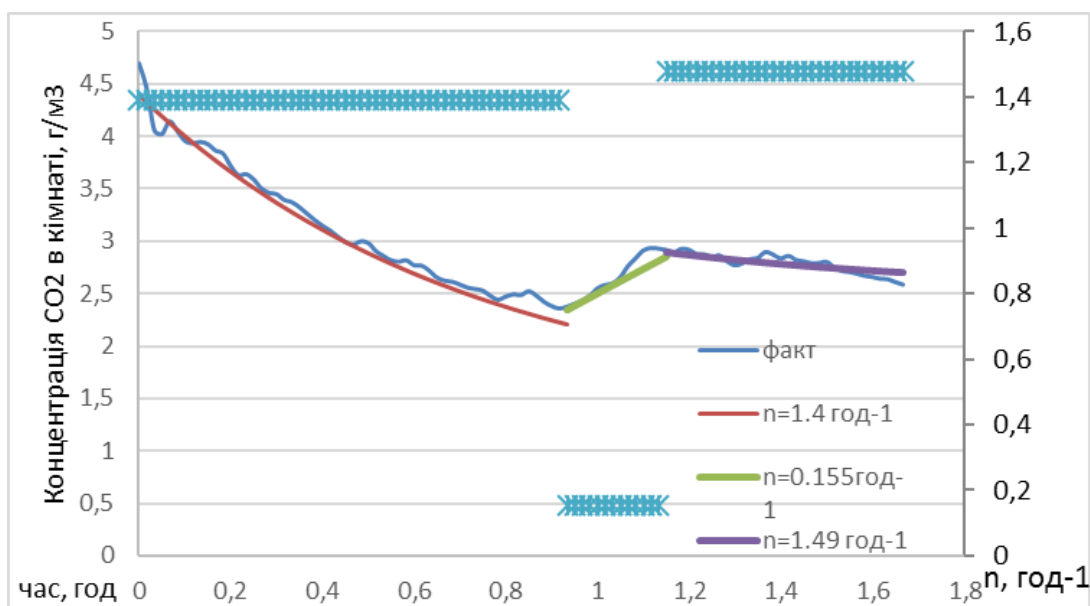


Рис. 7. Зміна концентрації CO<sub>2</sub> на кухні для різних експлуатаційних режимів витяжної системи

**Висновки.** Для чотирьох закладів освіти (3 школи та навчальний корпус КПІ ім. Ігоря Сікорського) та житлових будинків проведено дослідження зміни концентрації CO<sub>2</sub> для різних часових інтервалів, графіків експлуатації, тощо. В роботі показано, що виміри концентрації CO<sub>2</sub> важливі не тільки для контролю забезпечення та регулювання умов комфортності, але й можуть слугувати для визначення фактичних значень кратності повітрообміну в окремих приміщеннях.

I. На прикладі дослідження трьох шкіл міста Києва встановлено, що:

- 1) Експериментальне дослідження локальної фонові концентрації CO<sub>2</sub> біля досліджуваних будівель є майже постійним в часі та становить біля 450 ppm.
- 2) Концентрація CO<sub>2</sub> в класах протягом занять зростає майже в 2 рази та перевищує норму на 700-1100 ppm. В період канікул концентрація CO<sub>2</sub> в класах близька до фонові.
- 3) Експеримент показав, що концентрація CO<sub>2</sub> в приміщеннях суттєво збільшується в період проведення занять, тому необхідне провітрювання, але наявний рівень його не завжди є достатнім. Кратність повітрообміну в період занять знаходиться в діапазоні 0,5...0,75 год<sup>-1</sup> (закриті вікна та двері), під час провітрювання класів через відкриття вікон та дверей кратність повітрообміну збільшується до 2,9-3,5 год<sup>-1</sup>, середньозважена кратність повітрообміну становить 0,93 год<sup>-1</sup> та навіть при примусовому провітрюванні класів є недостатньою з точки зору забезпечення належного рівня повітрообміну та допустимої концентрації CO<sub>2</sub>.

II. Аналогічні дослідження проведені для навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського. Встановлено на основі експериментальних даних, кратність повітрообміну для навчального корпусу ВНЗ знаходиться в діапазоні 0,35 – 0,7 год<sup>-1</sup> залежно від розташування аудиторій. В періоди провітрювання (відкриття дверей на коридор) повітрообмін може збільшуватися на 0,45 год<sup>-1</sup>, але це не дозволяє досягти нормативного значення.

III. Дослідження проведені у житловій будівлі показують, що за умов відсутності штучного провітрювання або механічної вентиляції кратність повітрообміну знаходиться на рівні 0,1...0,155 год<sup>-1</sup>, що пояснюється високим опором повітропроникності огорожувальних

конструкцій. За умови мікропровітрювання в кімнатах створюється кратність повітрообміну на рівні  $0,73 \dots 1,4 \text{ год}^{-1}$ .

IV. Зазвичай, для розрахунку рівня енергетичної ефективності будівель використовують нормативне значення кратності повітрообміну, що суттєво завищує рівень енергоспоживання будівлі. Використання експериментально-розрахункових значень кратності повітрообміну дозволить більш точно наблизити результати математичного моделювання енергетичних характеристик будівель до реальних умов та підібрати оптимальний графік управління інженерними мережами будівлі, в тому числі підібрати оптимальні переривчасті режими опалення з забезпечення комфортних умов в робочі години.

### Література

1. Шовкалюк М.М., Білоус І.Ю. Аналіз енергетичних і математичних показників і балансів навчального закладу з розробкою енергетичних заходів. *Науково-практичний журнал "Екологічні науки"*. 2014. Вип. №1(5). С. 108-115.
2. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Буяк Н.А. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. *Вісник КНУТД*. 2015. Вип. №5(90). С 71-80.
3. Deshko V., Buyak N., Bilous I., Voloshchuk V. Reference state and exergy based dynamics analysis of energy performance of the "heat source - human - building envelope". *Energy*. 2020. Vol. 200.
4. Yoshino H., Hongb T., Nord N. IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings – Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 152. Pp. 124–136.
5. Deshko V.I., Bilous I.Yu., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 6(4). Pp. 27–41.
6. Younes, C., Shdid, C., Bitsuamlak, G. Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics*. 2012. Vol. 35 (3). Vol. 267–302.
7. Jokisalo, J., Kalamees, T., Kurnitski, J., Eskola, L., Jokiranta, K., Vinha, J. A comparison of measured and simulated air pressure conditions of a detached house in a cold climate. *Journal of Building Physics*. 2008. Vol. 32 (1). Pp. 67–89.
8. EN 12831: 2003 Heating of systems in buildings - Method of for calculation of the design heat load. (The heating systems in building are Calculation of the thermal loading). CEN, 2003. P. 76.

### References

1. Shovkaliuk M.M, Bilous I.Y. (2014) Analiz enerhetychnykh i matematychnykh pokaznykiv i balansiv navchalnoho zakladu z rozrobkoiu enerhetychnykh zakhodiv [The analysis of energy and material balances performance and the school with the development of energy saving measures]. *Ekolohichni nauky*, 1(5), 108-115 [in Ukrainian].
2. Deshko V.I., Bilous I.Y., Buyak N.A. (2015) Vybir teplovoho zakhystu ta dzherela tepla iz vrakhuvanniam komfortnykh umov u budivli [Comprehensive choice of building envelope and the heat sources, taking into account the comfort conditions in buildings]. *Visnyk KNTUTD*, 5(90), 71-80 [in Ukrainian].
3. Deshko V., Buyak N., Bilous I., Voloshchuk V. Reference state and exergy based dynamics analysis of energy performance of the "heat source - human - building envelope". *Energy*, Vol. 200, 2020.
4. Yoshino H., Hongb T., Nord N. (2017) IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 152. Pp. 124–136.
5. Deshko V.I., Bilous I.Yu., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 6(4). Pp. 27–41.
6. Younes, C., Shdid, C., Bitsuamlak, G. Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics*. 2012. Vol. 35(3). Vol. 267–302.
7. Jokisalo, J., Kalamees, T., Kurnitski, J., Eskola, L., Jokiranta, K., Vinha, J. A comparison of measured and simulated air pressure conditions of a detached house in a cold climate. *Journal of Building Physics*. 2008. Vol. 32(1). Pp. 67–89.
8. EN 12831:2003 Heating of systems in buildings - Method of for calculation of the design heat load. (The

9. Földváry, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., Petráš, D. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*. 2017. Vol. 122. Pp. 363–372.
10. Johnson, T, Myers, J, Kelly, T, Wisbith, A, Ollisonc, W. A pilot study using scripted ventilation conditions to identify key factors affecting indoor pollutant concentration and air exchange rate in a residence. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2004. Vol. 14(1). Pp. 1–22.
11. Yongming, J., Duanmu, L., Li, X. Building air leakage analysis for individual apartments in North China. *Building and Environment*. 2017. Vol. 122. Pp. 105-115.
12. Almeida R., Ramos N., Pereira P. A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 139. Pp. 174–185
13. You, Y., Niu, C., Zhou, J., Liu, Y., Bai, Z., Zhang, J., He, F., Zhang, N. Measurement of air exchange rates in different indoor environments using continuous CO<sub>2</sub> sensors. *Journal of Environmental Sciences*. 2012. Vol. 24(4). Pp. 657–664
14. Salthammer, T. Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. *Building and Environment*. 2019. Vol. 150. Pp. 219–232.
15. Shi, S., Chen, C., Zhao, B. Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. *Building and Environment*. 2015. Vol. 92. Pp. 528–537.
16. Stabile, L., Dell'Isola, M., Russi, A., Massimo, A., Buonanno, G. The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 595. Pp. 894–902.
17. Ng, L., Persily, A., Emmerich, S. Improving infiltration modeling in commercial building energy models. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 88. Pp. 316–323.
- heating systems in building are Calculation of the thermal loading). CEN, 2003. P. 76.
9. Földváry, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., Petráš, D. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*. 2017. Vol. 122. Pp. 363–372.
10. Johnson, T, Myers, J, Kelly, T, Wisbith, A, Ollisonc, W. A pilot study using scripted ventilation conditions to identify key factors affecting indoor pollutant concentration and air exchange rate in a residence. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2004. Vol. 14(1). Pp. 1–22.
11. Yongming, J., Duanmu, L., Li, X. Building air leakage analysis for individual apartments in North China. *Building and Environment*. 2017. Vol. 122. Pp. 105-115.
12. Almeida R., Ramos N., Pereira P. A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 139. Pp. 174–185
13. You, Y., Niu, C., Zhou, J., Liu, Y., Bai, Z., Zhang, J., He, F., Zhang, N. Measurement of air exchange rates in different indoor environments using continuous CO<sub>2</sub> sensors. *Journal of Environmental Sciences*. 2012. Vol. 24(4). Pp. 657–664
14. Salthammer, T. Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. *Building and Environment*. 2019. Vol. 150. Pp. 219–232.
15. Shi, S., Chen, C., Zhao, B. Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. *Building and Environment*. 2015. Vol. 92. Pp. 528–537.
16. Stabile, L., Dell'Isola, M., Russi, A., Massimo, A., Buonanno, G. The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 595. Pp. 894–902.
17. Ng, L., Persily, A., Emmerich, S. Improving infiltration modeling in commercial building energy models. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 88. Pp. 316–323.

**DESHKO VALERII**

te@kpi.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>

ResearcherID: J-6517-2017

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**BILOUS INNA**

bilous\_inna@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6640-103x>

ResearcherID: J-7070-2017

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

VOLODYMYR VYNOGRADOV-SALTYKOV  
bcbactn@ukr.net  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3612-8386>  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SUKHODUB IRYNA  
ira\_krot@ukr.net  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5895-1306>  
ResearcherID: I-9788-2017  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
YATSENKO OLENA  
loco-motion@ukr.net  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8001-5987>  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА И ВОЗДУХООБМЕНА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ И ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ

ДЕШКО В.И., БЕЛОУС И.Ю., ВИНОРАДОВ-САЛТЫКОВ В.А., СУХОДУБ И.О.,  
ЯЦЕНКО Е.И.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря  
Сикорского»

**Цель.** Применить интеграцию подходов к определению кратности воздухообмена на основе концентрации  $CO_2$  в образовательных учреждениях и жилых зданиях Украины.

**Методика.** Рассматривается экспериментально-расчетное определение кратности воздухообмена с учетом динамики эксплуатационно-поведенческих особенностей посетителей / жителей зданий. Применяются общенаучные методы анализа и синтеза, экспериментальные методы.

**Результаты.** Рекомендации по обеспечению условий комфорта с точки зрения качества воздуха в помещениях рассматриваемых объектов, предоставление рекомендаций относительно условий эксплуатации помещений, график проветривания.

**Научная новизна.** Развито комплексный подход к углубленному анализу энергопотребления, усовершенствовано процедуры оценки качества воздуха и уровня воздухообмена в зданиях с учетом изменчивости условий эксплуатации.

**Практическая значимость.** Проведено экспериментальные исследования изменения уровня концентрации  $CO_2$  в трех школах, высшем учебном заведении и жилом здании. Результаты проведенных исследований позволяют установить фактический уровень концентрации  $CO_2$  и кратности воздухообмена при различных условиях эксплуатации и определить динамику изменения исследуемого фактора во времени под влиянием эксплуатационных и поведенческих характеристик зданий в рабочие часы, при соблюдении комфортных условий, и в часы неиспользования помещений. Полученные результаты позволяют дать рекомендации по обеспечению качества воздухообмена в помещениях и обеспечению комфортных условий труда / учебы и проживания.

Использование экспериментально-расчетных значений кратности воздухообмена для помещений различного назначения позволит избежать при математическом моделировании завышения уровня энергопотребления зданий, которое возникает при использовании нормативных значений кратности, а также позволит более точно приблизить результаты математического моделирования уровня энергетической эффективности зданий к реальным условиям и подобрать оптимальный график управления инженерными сетями здания для обеспечения условий комфорта с учетом прерывистых режимов эксплуатации здания.

**Ключевые слова.** учебные заведения, воздухообмен, уровень  $CO_2$ , условия комфорта, качество воздуха.

---

---

## EXPERIMENTAL STUDY OF AIR QUALITY AND AIR EXCHANGE IN EDUCATIONAL AND RESIDENTIAL BUILDINGS

DESHKO V.I., BILOUS I.YU., VYNOGRADOV-SALTYKOV V.O., SUKHODUB I.O.,  
YATSENKO O.I.

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

**Purpose.** Apply integrated approaches for the air exchange rate determination based on CO<sub>2</sub> concentration in educational and residential buildings of Ukraine.

**Methods.** Taking into account variability of building's visitors and occupants operational and behavioral features experimental and calculated determination of the air exchange rate are considered.

**Results.** Recommendations for providing comfort conditions in terms of air quality in the considered objects premises, recommendations on the premises operating conditions, ventilation schedule.

**Scientific novelty.** The comprehensive approach to in-depth analysis of energy consumption has been developed, procedures for assessing the air quality and the level of air exchange in buildings have been improved taking into account the variability of operating conditions.

**The practical significance.** Experimental studies of changes in CO<sub>2</sub> concentration were conducted in three schools, in higher education institution and in residential building. The research results allowed to establish the actual level of CO<sub>2</sub> concentration and air change rate under different operational and behavioral conditions in buildings during working hours, subject to comfortable conditions, and during non-use hours. The research results also help to determine the dynamics of changes in the studied factor over time under the building performance indicators influence. The obtained results allow to provide recommendations on ensuring the quality of indoor air exchange and on providing comfort working, studying and living conditions.

The use of experimental and calculated air exchange rate values for various premises would allow to avoid in mathematical modeling the overestimation of the level of buildings energy consumption, which arises when standard air change rate values is using. So the obtained results allow to approximate more accurately the mathematical modeling results of buildings energy efficiency to the actual conditions and help to choose the optimal schedule for the building engineering networks managing considering comfort conditions with intermittent operation.

**Keywords:** educational institutions, air exchange, CO<sub>2</sub> level, comfort conditions, air quality.