

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВІТРООБМІНУ В КВАРТИРІ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МАСОПЕРЕНОСУ CO₂

В. І. Дешко, доктор технічних наук, професор

І. Ю. Білоус, кандидат технічних наук, доцент

Г.О. Гетманчук, аспірантка

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

E-mail: biloys_inna@ukr.net

Анотація. Дослідження кратності повітрообміну в житлових будівлях є важливим з точки зору забезпечення умов мікроклімату в приміщенні для мешканців, а також забезпечення відповідного рівня енергоефективності. Метою цього дослідження є експериментальне визначення концентрації CO₂ у типовій квартирі за допомогою стаціонарних датчиків CO₂ та повітрообміну на основі масових балансів. Об'єктом дослідження є однокімнатна квартира в гуртожитку сімейного типу в м. Києві. У гуртожитку функціонує канална природна вентиляція. У рамках дослідження проводилися фактичні та експериментальні заміри концентрації вуглекислого газу в приміщеннях житлової кімнати, кухні, коридору квартири та у вентиляційному каналі, що виходить на кухню. Експериментальні дослідницькі умови були створені шляхом штучного нагнітання вуглекислого газу. За результатами досліджень кратність повітрообміну в квартирі була на рівні 0,74 год⁻¹ для житлової кімнати, 0,66-0,81 год⁻¹ для коридору, 3,4 год⁻¹ для приміщення кухні, за умов, коли припливне повітря надходить через вікна і входні двері. Результати дослідження можуть бути використані для розробки енергоефективних стратегій підвищення якості повітря в житлових приміщеннях.

Ключові слова: *повітрообмін, концентрація вуглекислого газу, масоперенос, умови мікроклімату*

Актуальність. Вентиляція житлових будинків є важливою областю досліджень, оскільки вона стосується найважливіших питань: забезпечення умов мікроклімату в приміщенні для мешканців, уникнення ризику конденсації та пошкодження будівлі, а також забезпечення відповідного рівня енергоефективності.

У більшості випадків в існуючих будівлях масової забудови на території України при підвищенні рівня енергоефективності після заходів з термомодернізації, підвищенні герметизації будівлі велику увагу приділяють

вентиляційній складовій. У більшості будівель масової забудови передбачена природня вентиляція.

В європейських країнах діоксид вуглецю, нарівні з оксидами азоту, оксидом вуглецю, діоксидом сірки та леткими органічними сполуками є типовим забруднювальним чинником, який необхідно враховувати при проектуванні систем вентиляції та кондиціонування повітря.

Рівень вуглекислого газу має сильний вплив на організм людини і її самопочуття в цілому.

Отже, дослідження повітрообміну з урахуванням концентрації CO₂ в повітрі є важливим кроком для забезпечення здорового середовища проживання людей. Результати дослідження можуть бути використані для розробки енергоефективних стратегій підвищення якості повітря в житлових приміщеннях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання забезпечення достатньої кратності повітрообміну в житлових будівлях викликає все більший інтерес дослідників, оскільки люди проводять значну частину свого життя в закритих приміщеннях, а якість повітря в приміщеннях безпосередньо залежить від кратності повітрообміну [1, с. 2254; 2, с. 657]. Одночасно з цим, важливим є дотриманням вимог до енергоефективності будівель [3, с. 114]. Збільшення повітрообміну підвищує комфортність, але і ускладнюються системи вентиляції і розподілу повітря, збільшуються енергетичні витрати на обробку і транспортування зовнішнього припливного повітря та збільшуються теплові втрати.

В Україні запроваджено стандарт EN-15251 як національний. Тому рекомендовані значення витрат вентиляції збігаються з наведеними в EN 16798. Державні будівельні норми України для житлових будинків (ДБН В 2.2.-15:2019) передбачають вимоги до вентиляції у вигляді мінімального повітрообміну приміщень різного. У таблиці 1 наведено вимоги до повітрообміну для природної системи вентиляції у різних стандартах.

1. Вимоги до повітрообміну в приміщеннях житлових будинків

Приміщення	ДБН В.2.2-15:2019	ДСТУ 9190:2022 та ДБН В.2.5-67:2013 посилаються на ДСТУ Б EN 15251:2011
Загальна кімната, спальня, дитяча, кабінет	0,5	0,6
Кухня, кухня-їдальня	1,5	
Туалет	1,5	
Суміщений санвузол	1,5	

Нині більшість стандартів не передбачають конкретного підходу до визначення мінімального повітрообміну, а лише рекомендують ту чи іншу стратегію розрахунку.

Існують імперичні та експериментальні методи вимірювання швидкості повітрообміну.

Емпіричні методи визначення швидкості повітрообміну, засновані на стандартах ASHRAE і BLAST, враховують три механізми впливу: ефект стека, вітровий ефект та механічну вентиляцію. При цьому вітровий вплив є найбільш складним та залежить від таких факторів, як висота будівлі, її спрямованість, швидкість та напрямок вітру тощо [1, с. 2256].

Існують також різні експериментальні методи вимірювання швидкості повітрообміну, наприклад, випробування на SF₆ [4, с. 1], які є складнішими та дорожчими. Такі дослідження вимагають спеціального обладнання і в них складно врахувати динамічну зміну зовнішніх та внутрішніх умов.

У науковій літературі одним із найбільш поширених методів визначення кратності повітрообміну є метод моніторингу швидкості зміни повітря за допомогою стаціонарних датчиків CO₂ [2, с. 567; 5, с. 528]. Для його застосування вимірюють концентрацію діоксиду вуглецю в повітрі приміщень.

В Україні, відповідно до ДБН В.2.5-67:2013, рівень концентрації CO₂ у приміщеннях для оптимальних умов перебування становить 400-600 ppm понад рівень у зовнішньому повітрі.

У Європейському Союзі рекомендована максимально допустима концентрація вуглекислого газу в повітрі на робочому місці (включаючи житлові будівлі) становить 5000 ppm для 8-годинного робочого дня і 10000 ppm для короткочасних періодів.

Мета дослідження – експериментальне визначення концентрації CO₂ у типовій квартирі та повітрообміну на основі масових балансів.

Матеріали та методи дослідження.

Вимірювальні прилади

Визначення концентрації CO₂ та інших вхідних параметрів для розрахунку природної кратності повітрообміну проводились одночасно в репрезентативних приміщеннях квартири. Дослідження проводилися приладами, зображеними на рис. 1.

Для вимірювань було використано три типи газоаналізаторів: комплексний прилад реєстратор CO₂ "TR-75Ui" (рис. 1, а), аналізатор якості повітря "D91" (рис. 1, б) та детектор-дatalogгер вуглекислого газу з термогігрометром Xintest "HT-501" (рис. 1, в).



Рис. 1. Прилади для вимірювання концентрації CO₂ в приміщеннях квартири

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

Тарування приладів

У дослідницький об'ємом $0,3 \text{ м}^3$ (кубічної форми) з невеликою щільною було поміщено прилади. Було проведено штучне нагнітання вуглекислого газу шляхом спалювання сухого спирту в розглянутому об'ємі. Враховуючи меншу інерційність приладу "НТ-501" відповідно до паспортних даних і результатів експерименту, його було обраний як еталонний. Максимальне відхилення під час тарування приладів становить 56 ppm, мінімальне – 36 ppm, середнє – 47 ppm. Ця розбіжність між приладами може вносити похибку, яка не перевищує 3 %.

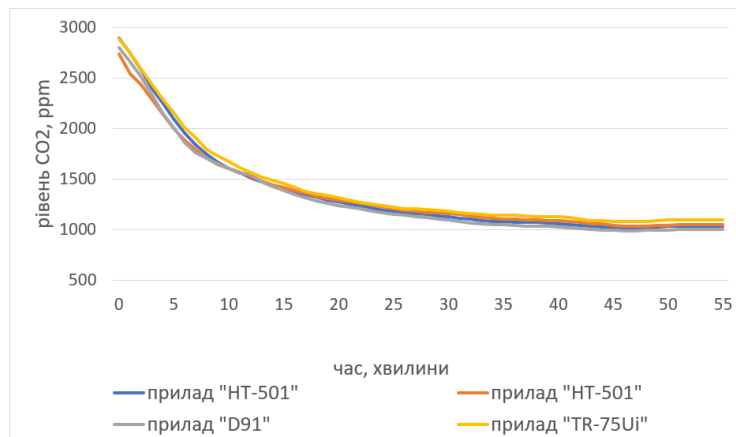


Рис. 2. Тарування приладів

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є однокімнатна квартира в гуртожитку сімейного типу в м. Києві. Репрезентативна однокімнатна квартира загальною площею 37 м^2 знаходиться на 9 поверсі 9-ти поверхової будівлі. Площа житлової кімнати – $17,4 \text{ м}^2$, кухні – $6,3 \text{ м}^2$, коридору – $4,9 \text{ м}^2$. 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.

Проведення досліджень

Серія досліджень зміни концентрації вуглекислого газу в приміщеннях проводилася в зимовий період. У рамках дослідження проводилися експериментальні заміри концентрації вуглекислого газу в приміщеннях житлової кімнати, кухні, коридору квартири та у вентиляційному каналі, що виходить на кухню з кроком 1 хв. План проведення експерименту наведено на рис. 3. Також

фіксувались кліматичні данні. Для міста Києва в період проведення досліджень характерним був південний та південно-західний напрямки вітру. Середньодобова температура зовнішнього повітря становила (+4,1 °C) - (+6 °C), добові коливання становили (+6 °C), (-3 °C). Також на початку та вкінці експерименту фіксувались значення рівня CO₂ в коридорі гуртожитку, який тримався в межах 547-570 ppm. Рівень вуглекислого газу в зовнішньому повітрі під час експериментів був в межах 390-430 ppm.



Рис. 3. План проведення експерименту

Результати досліджень та їх обговорення. Першим кроком в проведенні досліджень було виміряно зміну концентрації CO₂ у кожній кімнаті для звичайних/фактичних умов експлуатації приміщень (рис. 4).

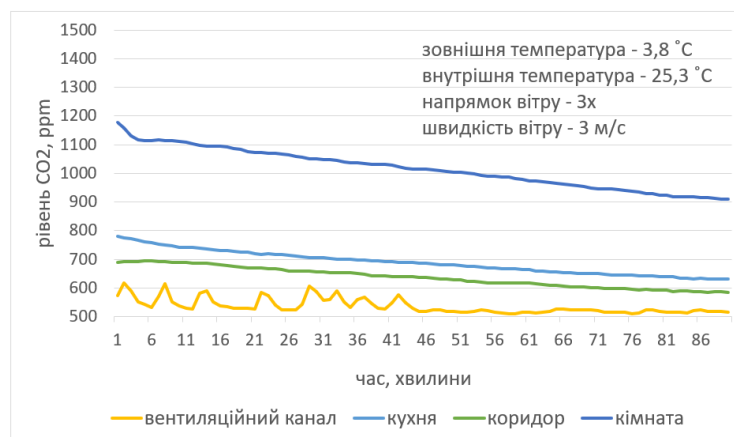


Рис. 4. Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири за фактичних умов

До проведення експерименту деякий час двоє людей знаходились в приміщенні кімнати. Як видно, рівень вуглекислого газу в приміщеннях знаходився на не дуже невисокому рівні, що обумовлене не значним рівнем виділення CO₂ внутрішніми джерелами/мешканцями тощо. Чутливість приладів не дозволяла одразу з достатньою точністю визначити з балансів зміни концентрації CO₂ рівень переносу повітря між кімнатами квартири. Тому створювалось накопичення CO₂, для того, щоб більший період часу можна було фіксувати зміни концентрації вуглекислого газу і провести більш якісний аналіз.

Наступна серія досліджень проводилась за умов нагнітання CO₂ в приміщенні кухні шляхом спалювання сухого спирту (рис. 5 а, б). Під час проведення експериментів переважав південний та західний напрямки вітру. Аналізуючи графіки, можна зробити висновок про залежність руху повітря у вентканалі від напрямку вітру. При південному і південно-західному напрямку вітру повітря з приміщення кухні надходило до вентканалу (рис. 5, а), адже зміна концентрації вуглекислого газу в приміщенні кухні і вентканалу мають подібні тенденції. При західному напрямку вітру та за відсутності вітру (рис. 5, б) навпаки, припливне повітря надходило до квартири через вентканал, тому що рівень вуглекислого газу у вентканалі під час всього експерименту залишався відносно незмінним і на рівні зовнішнього середовища.

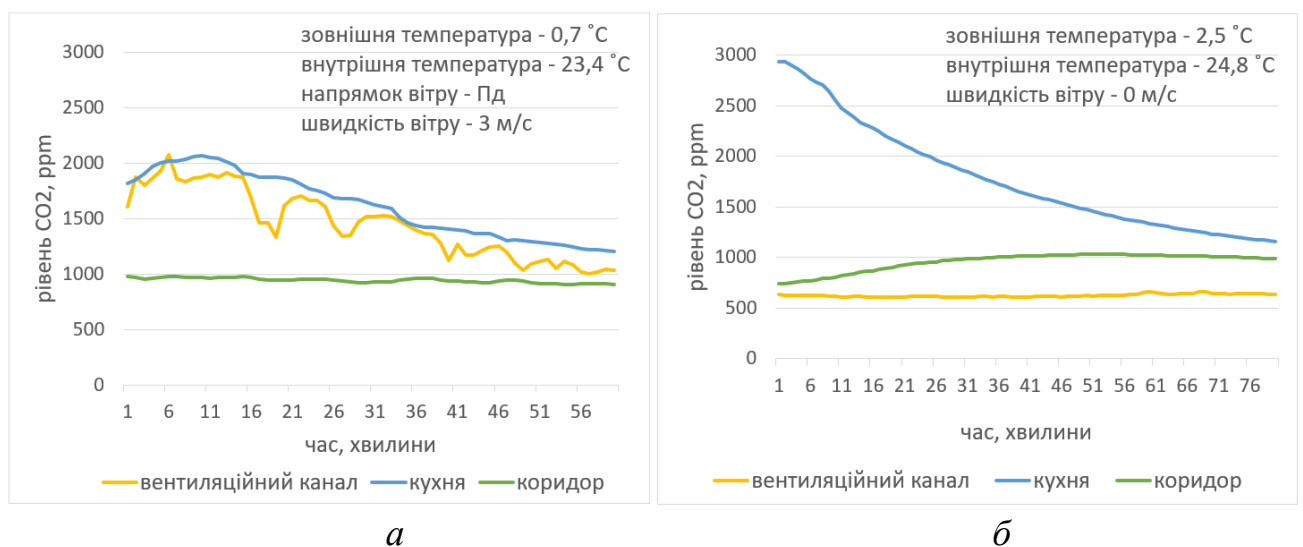


Рис. 5. Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири при нагнітанні CO₂ в приміщенні кухні за різних кліматичних умовах

У результаті проведених досліджень були виділені два напрями повітрообміну в квартирі. У першому випадку повітря надходило через вікна і входні двері квартири і викидалось через вентиляційний канал (рис. 6, а). У другому випадку припливне повітря надходило з вентиляції і через входні двері, а виходило через вікна на кухні і в кімнаті (рис. 6, б).



$V_{\text{кім}}, V_{\text{кор}}, V_{\text{кух}}, V_{\text{вк}}$ - об'єм приміщень кімнати, коридору, кухні і вентканалу відповідно, м^3 ; $\text{CO}_2 \text{ кім}, \text{CO}_2 \text{ кор}, \text{CO}_2 \text{ кух}, \text{CO}_2 \text{ вк}, \text{CO}_2 \text{ зов}, \text{CO}_2 \text{ буд}$ – концентрація CO_2 в приміщеннях кімнати, коридору, кухні, вентканалу, фонові та на коридорі будинку відповідно, г/м^3 ;

Рис. 6 - Механізми повітрообміну в квартирі:

а – припливне повітря надходить через вікна і входні двері

б – припливне повітря надходить через вентиляційний канал і входні двері

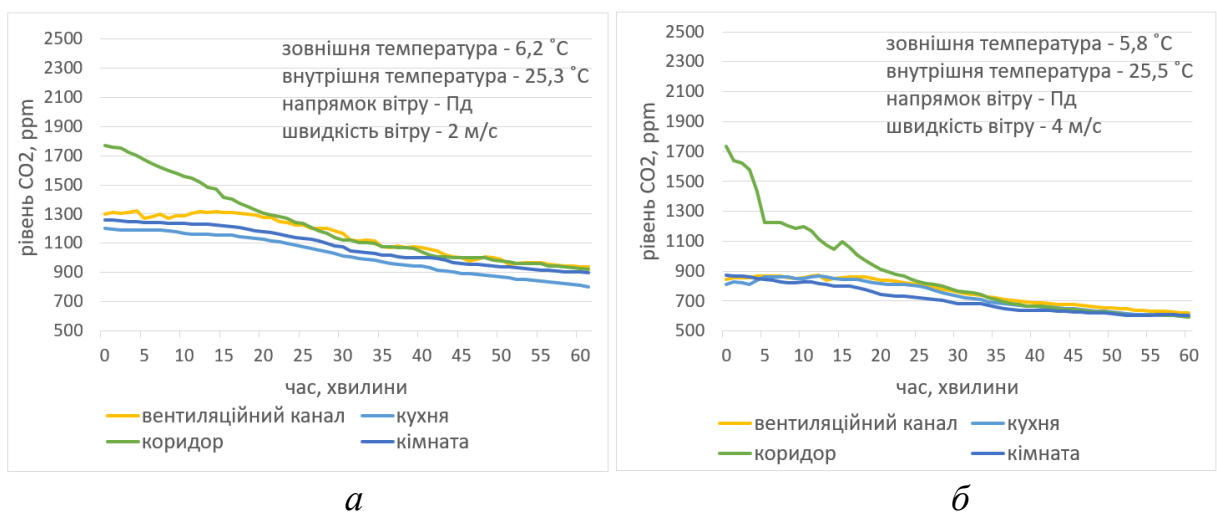


Рис. 7. Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири при нагнітанні CO_2 в приміщенні кухні за різних кліматичних умовах

На рис. 7 (а, б) наведено результати вимірювань рівня вуглекислого газу в приміщеннях кухні, коридору квартири, житлової кімнати та вентиляційному каналі за умов нагнітання рівня CO_2 в приміщенні коридору.

З рис. 7 слідує, що рівень CO_2 у вентиляційному значно вищий за фонову концентрацію CO_2 в зовнішньому повітрі. Крива зміни рівня CO_2 у вентиляційному каналі подібна до кривої зміни рівня CO_2 на кухні, що свідчить про те, що повітря з приміщення кухні виходить через вентиляційний канал. Тобто на основі декількох серій вимірювань було встановлено, що характерним є підсмоктування свіжого повітря до приміщень квартири через вікна.

На прикладі масового балансу репрезентативних приміщень було визначено кінцеву концентрацію CO_2 в залежності від ряду параметрів, таких як природний повітрообмін; зовнішня концентрація CO_2 ; геометричні розміри приміщення. Методика обробки отриманих результатів наведена в статті [6, с. 89-90] була використана для знаходження кратності повітрообміну.

На графіках (рис. 8) наведено результати типових дослідів, де стартова концентрація була різною при відносно однакових внутрішніх і зовнішніх умовах. При цьому, визначена кратність повітрообміну залишалась приблизно на тому ж рівні: $0,74 \text{ год}^{-1}$ для житлової кімнати, $0,66\text{-}0,81 \text{ год}^{-1}$ для коридору, $3,4 \text{ год}^{-1}$ для приміщення кухні.

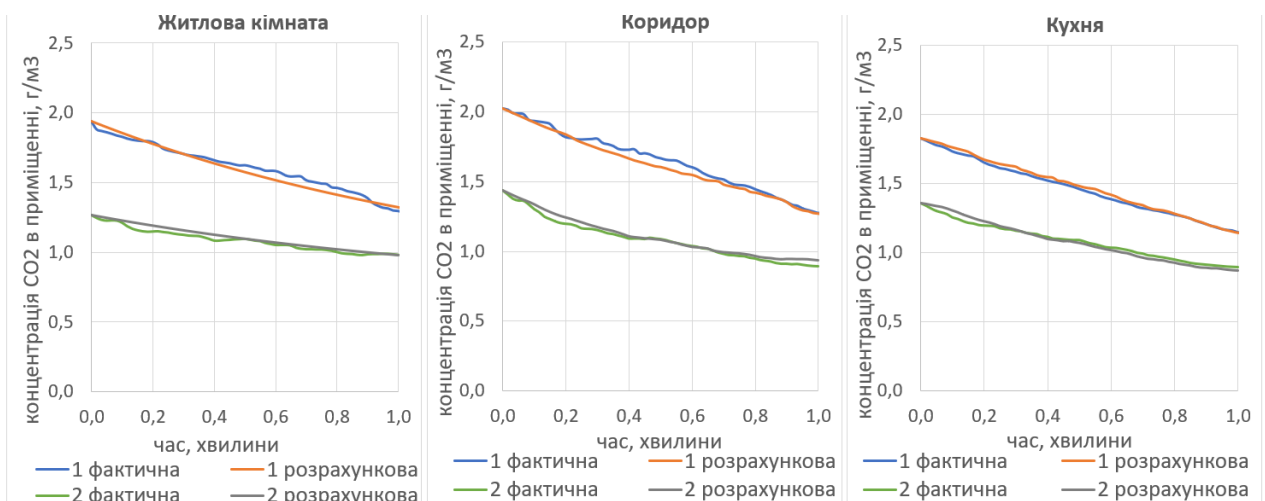


Рис. 8. Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири при умовах, коли припливне повітря надходить через вікна і вхідні двері (індекси 1, 2 – відповідають номеру дослідів)

У класичних розрахунках [6, с. 82-104] завжди приймається, що свіже повітря надходить до кімнат шляхом інфільтрації, тобто через нещільності у вікнах і дверях, і покидає через вентканал. Результати досліджень показали, що є два напрямки руху повітря. На рис 9 наведені результати обробки типового дослідження при умовах, коли припливне повітря надходить через вентиляційний канал і вхідні двері. Враховуючи, що напрямок руху повітря в цьому досліді відповідає рис. 6 (б), ми маємо відмінності у величинах кратності повітрообміну в порівнянні з напрямком руху повітря, що наведений на рис. 6 (б). Для наведених умов кратність повітрообміну для житлової кімнати була на рівні $0,37 \text{ год}^{-1}$, $1,06$ для коридору, $0,57 \text{ год}^{-1}$ для приміщення кухні. Це пов'язано з іншим перепадом густин та температур.

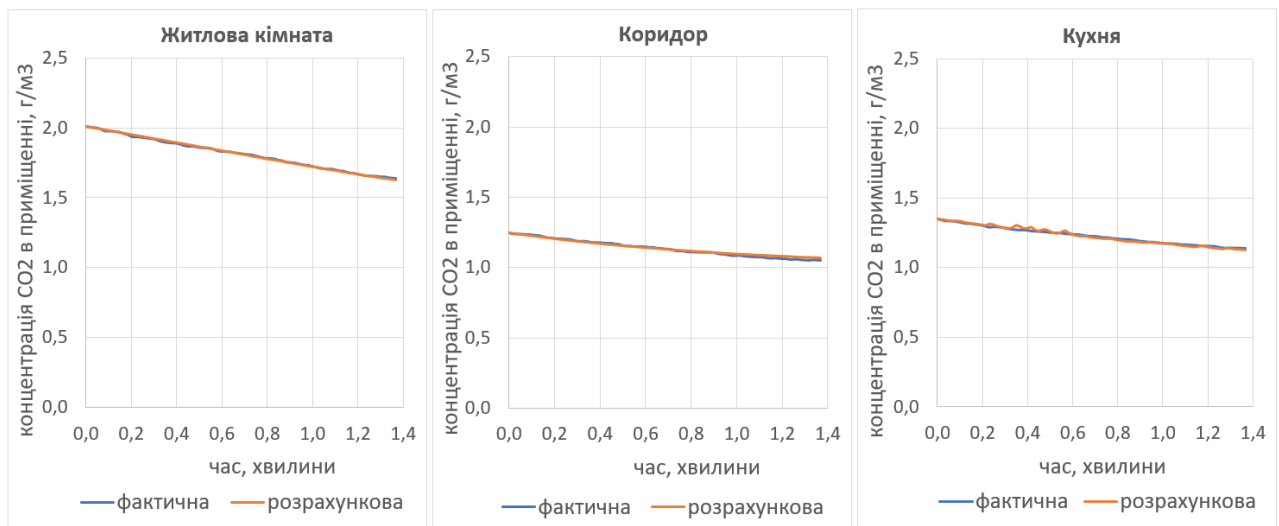


Рис. 9. Зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири при умовах, коли припливне повітря надходить через вентиляційний канал і вхідні двері

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

Експериментальні дослідження показали, що фактична кратність повітрообміну за умов надходження свіжого повітря через вікна й двері, перевищує мінімальні норми, а при зворотному русі повітря – не відповідає нормам щодо рівня повітрообміну. При врахуванні напрямку руху повітря, яке надходить в квартиру, фактично, енергія, яка затрачається на нагрівання припливного повітря, буде пропорційна кратності повітрообміну повітря, яке надходить зовні. Однак, у такому випадку не враховується енергія нагріву припливного повітря із суміжних приміщень.

Висновки і перспективи.

У цьому дослідженні було проведено серію вимірювань рівня концентрації CO₂ в квартирі. Згідно з наведеними в тексті вимірюваннями, фактичний рівень CO₂ в однокімнатній квартирі становить 1200-1500 ppm.

Враховуючи незначну зміну концентрації CO₂ при фактичних умовах експлуатації, були створені експериментальні дослідницькі умови шляхом штучного нагнітання вуглекислого газу.

На базі досліджених рівнів концентрації вуглекислого газу було визначено кратність повітрообміну, яка залежить від мінливості зовнішніх та внутрішніх умов. За результатами досліджень кратність повітрообміну в квартирі була однаковою і трималась на рівні 0,74 год⁻¹ для житлової кімнати, 0,66-0,81 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, ¹ для приміщення кухні – 0,57 год⁻¹.

За результатами дослідження встановлено, що якість повітря в досліджуваній квартирі не відповідає комфортним умовам мікроклімату через високий рівень концентрації CO₂ та, в певні періоди, невелику кратність повітрообміну. Внаслідок цього, будь-які заходи для зниження рівня вуглекислого газу в житлових приміщеннях можуть привести до збільшення енергоспоживання будівлі. Тому

важливо розглядати інтегрований підхід до зменшення енергоспоживання, який враховує як зменшення втрат енергії, так і комфортність проживання.

Список використаних джерел

1. Air change rates in residential buildings in Tianjin [Електронний ресурс] / Jing Hou [та ін.]. *Procedia engineering*. 2017. Т. 205. С. 2254–2258. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.069> (дата звернення: 25.04.2023).
2. Yan You [та ін.] Measurement of air exchange rates in different indoor environments using continuous CO₂ sensors [Електронний ресурс]. *Journal of Environmental Sciences*. 2012. Т. 24, № 4. С. 657–664. – Режим доступу: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60812-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60812-7) (дата звернення: 25.04.2023).
3. Belmonte J., Barbosa R., Almeida M. G. CO₂ concentrations in a multifamily building in Porto, Portugal: occupants' exposure and differential performance of mechanical ventilation control strategies [Електронний ресурс]. *Journal of building engineering*. 2019. Т. 23. С. 114–126. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.008> (дата звернення: 25.04.2023).
4. Johnson T., Myers J., Kelly T. A pilot study using scripted ventilation conditions to identify key factors affecting indoor pollutant concentration and air exchange rate in a residence [Електронний ресурс]. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*. 2004. Т.14. С. 1–22. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500294> (дата звернення: 25.04.2023).
5. Shi S., Chen, C., & Zhao, B. Air infiltration rate distributions of residences in Beijing [Електронний ресурс]. *Building and environment*. 2015. Т. 92. С. 528–537. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.027> (дата звернення: 25.04.2023).
6. Deshko, V., Bilous, I., Sukhodub, I., Yatsenko, O. Integrated approaches to determination of co₂ concentration and air rate exchange in educational institution. *Rocznik ochrona srodowiska*. 2020. Т. 22(1). С. 82–104.

Referenses

1. Hou, J., Zhang, Y., Sun, Y., Wang, P., Zhang, Q., Kong, X., Sundell, J. (2017). Air change rates in residential buildings in Tianjin. *Procedia Engineering*, 205, 2254–2258. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.069>
2. You, Y., Niu, C., Zhou, J., Liu, Y., Bai, Z., Zhang, J., He, F., Zhang, N. (2012). Measurement of air exchange rates in different indoor environments using continuous CO₂ sensors. *Journal of Environmental Sciences*, 24(4), 657–664. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60812-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60812-7)
3. Belmonte, J., Barbosa, R., Almeida, M. G. (2019). CO₂ concentrations in a multifamily building in Porto, Portugal: Occupants' exposure and differential performance of mechanical ventilation control strategies. *Journal of Building Engineering*, 23, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.008>
4. Johnson, T., Myers, J., Kelly, T. (2004). 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 Science & Environmental Epidemiology*, 14, 1–22. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500294>

5. Shi, S., Chen, C., Zhao, B. (2015). Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. *Building and Environment*, 92, 528–537. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.027>
6. Deshko, V., Bilous, I., Sukhodub, I., Yatsenko, O. (2021). Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes. *Journal of Building Engineering*, 42, Stattia 103020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103020>

RESEARCH OF AIR EXCHANGE IN THE APARTMENT ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CO₂ MASS TRANSFER

V. Deshko, I. Bilous, H. Hetmanchuk

Abstract. *Studying the frequency of air exchange in residential buildings is important from the point of view of ensuring microclimate conditions in the room for residents, as well as ensuring an appropriate level of energy efficiency. The purpose of this study is to experimentally study the concentration of CO₂ in a typical apartment using stationary CO₂ sensors and determine air exchange based on mass balances. 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. As part of the study, actual and 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 duct leading to the kitchen. Experimental research conditions were created by artificial injection of carbon dioxide. According to the research results, the air exchange rate in the apartment was at the level of 0.74 h⁻¹ for the living room, 0.66-0.81 h⁻¹ for the corridor, 3.4 h⁻¹ for the kitchen, under conditions when the supply air enters through windows and entrance doors. The results of the research can be used to develop energy-efficient strategies for improving air quality in residential premises.*

Kay words: *air exchange, carbon dioxide concentration, mass transfer, microclimate conditions*