

В.І. Дешко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933
І.Ю. Білоус, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6640-103X
І.О. Суходуб, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-5895-1306
О.І. Яценко, ORCID 0000-0002-8001-5987

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

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗПОДІЛЕННЯ ПОВІТРООБМІНУ МІЖ КІМНАТАМИ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ КВАРТИРИ

Сучасні результати енергетичного аналізу будівель різного призначення в Україні показують, що 30-50% теплоти, що надходить у будівлі, йде на нагрівання припливного повітря ззовні, що складає найбільшу частку в енергетичному балансі будівель. З точки зору енергоспоживання ефективність режиму вентиляції приміщення значною мірою залежить від експлуатаційного графіку та встановлених вимог до повітрообміну в приміщеннях різного призначення. Врахування графіку повітрообміну в першу чергу має сенс при наявності індивідуального регулювання опалення. В такому випадку, при використанні приміщень можна забезпечити комфортний рівень повітрообміну, а при відсутності мешканців знизити його до мінімального рівня. Відповідно до результатів дослідження, застосування переривчастого режиму повітрообміну в досліджуваній квартирі в робочі дні, призводить до зменшення енергоспоживання порівняно з постійним повітрообміном на рівні верхніх значень змінного графіка. З точки зору енергоефективності найбільш ефективним виявилось використання постійного значення кратності повітрообміну за ASHRAE Std 62. Що стосується якості повітря та концентрації CO₂ всередині, то більш ефективним є підхід до вентиляції з збільшеним повітрообміном протягом годин використання приміщень за EN 16798. Таким чином використання нормативних та експериментальних значень кратності повітрообміну для формування погодинних графіків дозволяє більш точно визначити енергетичні показники будівель та вибрати оптимальний графік експлуатації технічних систем для забезпечення якості повітря всередині та теплового комфорту в години присутності людей.

Ключові слова: повітрообмін, природня вентиляція, переривчастий режим опалення, EnergyPlus, енергозбереження.

Вступ

Значна частина житлових будинків в країнах Центральної та Східної Європи не відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності [1]. Програми державної підтримки енергозбереження орієнтовані в першу чергу на утеплення огорожувальних конструкцій та модернізацію систем опалення. Найменша увага приділяється питанням якості повітря в приміщеннях. Сучасні результати енергетичного аналізу будівель різного призначення в Україні показують, що 30-50% теплоти, що надходить у будівлі, йде на нагрівання припливного повітря ззовні, що складає найбільшу частку в енергетичному балансі будівель.

На енергоспоживання будівлі впливають шість основних факторів: зовнішні кліматичні умови, оболонка будівлі, обладнання та енергетичні джерела і системи, експлуатація та технічне обслуговування, діяльність та поведінка мешканців, комфортні умови середовища всередині будівлі [2]. Причому останні три фактори залежать від мешканців та можуть впливати більше ніж три попередні при підвищенні рівня енергоефективності. Щоденна взаємодія людей із інженерними будівельними системами є основою режиму експлуатації будівлі. Режим експлуатації впливає на рівень внутрішніх теплонаходжень, на регулювання налаштувань термостата, провітрювання приміщень, використання електричного та освітлювального обладнання, використання віконних жалюзі та споживання гарячої води для побутових потреб [3].

Більшість досліджень в області вентиляції сфокусована окремо на тепловому комфорті, або на якості внутрішнього повітря, або на енергоспоживанні [4-6]. Значна частка досліджень включає перші два аспекти [7-11]. В роботі [11], на основі річних спостережень, поведінка мешканців названа ключовим фактором який, впливає на кратність повітрообміну, якість внутрішнього повітря та тепловий комфорт в житлових будівлях. Але для найбільш оптимальної оцінки впливу повітрообміну доцільно враховувати всі три аспекти. Взимку робота вентиляційної системи пов'язана з додатковими втратами теплової енергії на нагрівання зовнішнього повітряного потоку, що надходить до приміщень. Тож питання повітрообміну необхідно розглядати комплексно, враховуючи не лише тепловий комфорт та якість внутрішнього повітря, © В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, І.О. Суходуб, О.І. Яценко, 2021

а й вплив на енергетичні показники будівлі. З точки зору енергоефективності зменшення швидкості повітрообміну сприяє економії енергоресурсів. Зважаючи на ці принципово важливі критерії, визначення оптимального рівня повітрообміну є важливим завданням при проектуванні будівель та вентиляційних систем, а вивчення якості повітря в приміщенні та параметрів повітрообміну вимагає значної уваги при експлуатації та при термомодернізації для підвищення енергетичних стандартів як у низькоефективних, так і в енергетично ефективних будівлях.

Нормативні документи, що стосуються вентиляції житлових приміщень, відрізняються в залежності від країни де вони застосовуються. Багато країн, в тому числі європейські, використовують вимоги щодо повітрообміну житлових приміщень, подібні до тих, що зазначені у Стандарті ASHRAE 62.2 “Вентиляція та допустима якість повітря в малоповерхових житлових будинках” [12]. На сьогоднішній день даний стандарт містить обґрунтування основних вимог до швидкості повітрообміну та розрахунків вимог до зовнішнього повітря, що надходить в приміщення, для мультизонних систем. ASHRAE також розробила супутнє керівництво до цього стандарту для підтвердження високої якості внутрішнього повітря.

Відповідно до європейських нормативних актів Directive 2010/31/EU та Directive 2012/27/EU, оновлених в 2018 та 2019 роках відповідно, країни Європейського Союзу повинні використовувати національні вимоги щодо енергоефективності, які дозволяють проводити міжнародне порівняння [13]. Національні стандарти країн ЄС не визначають конкретного підходу до вентиляції житлових будівель. В більшості країн може застосовуватися як природня система вентиляції, так і механічна чи гібридна. Норма повітрообміну у більшості стандартів країн ЄС визначена за одним або декількома методами, описаними в EN 16798 [14] (раніше EN-15251), де повітряний потік визначається в л/с на м², л/с на особу або через кратність повітрообміну в год⁻¹. При цьому майже кожна країна визначає власне положення з точки зору місцевого витяжного потоку повітря (л/с або год⁻¹). В Україні цей стандарт введений в якості національного.

Більшість стандартів не дають чіткого підходу для встановлення нормативного повітрообміну, а лише рекомендують ту чи іншу стратегію для розрахунку. Тож проектувальники мають приймати власне рішення, обґрунтовуючи його на основі національних стандартів. Для енергетичних розрахунків зазвичай використовуються значення кратності повітрообміну, рекомендовані національними стандартами. В Україні та в деяких країнах центральної і східної Європи, при проведенні енергетичних аудитів будівель, існує практика застосування значень постійної кратності повітрообміну для будівлі в цілому. При цьому в національних стандартах також передбачено, що кратність повітрообміну всередині будівлі може бути визначена в ході випробувань.

Експериментальне визначення кратності повітрообміну, при врахуванні організованого повітрообміну та неконтрольованих потоків повітря, для зміни умов експлуатації є складним завданням. На точність вимірювань також впливають динамічні параметри, такі як різниця температур всередині-зовні, зовнішній тиск, а також напрям і швидкість вітру [10]. В статті [15] описано підхід до визначення кратності повітрообміну на базі ряду експериментів за методом вимірювання концентрації CO₂ в житловому приміщенні, яке є об'єктом дослідження в даній роботі.

Альтернативний метод визначення рівня повітрообміну полягає у використанні емпіричних методів визначення швидкості повітрообміну на основі стандартів ASHRAE та BLAST. Вентиляція створюється на основі трьох механізмів: стак ефект, вітровий ефект та робота механічної системи, при цьому перші два стосуються природної складової. Серед цих механізмів ефект вітру має найскладніший характер і залежить від поверховості, орієнтації швидкості руху та напрямку вітру та іншого [16]. Емпіричні підходи знайшли відображення в програмному забезпеченні для розрахунку енергетичних показників будівель, найбільш поширені: eQuest, EnergyPlus, TRNSYS, DOE2, DesignBuilder та Ecotect Analysis. Наприклад, в [17] запропоновано метод оцінки інфільтрації в комерційних будівлях за допомогою EnergyPlus, який враховує величину швидкості вітру, різницю температур (більшість емпіричних методів враховує лише температурний ефект), але не враховує напрямок вітру.

Зважаючи на обмежену кількість досліджень повітрообміну при експлуатації будівель в Україні і країнах Центральної та Східної Європи актуальним є поєднання аналізу якості повітря з рівнем повітрообміну і потребою на опалення для житлових приміщень будівель. У даній роботі вплив розподілу повітрообміну в приміщеннях квартири вивчається на базі результатів експериментального визначення кратності за методом вимірювання концентрації CO₂ та використання значень, рекомендованих діючими нормативами. Для кількісної оцінки впливу статичних та динамічних факторів застосовувалися програми для енергетичного моделювання будівель. Одним з найбільш популярних підходів до оцінки енергетичних показників будівель є використання програми EnergyPlus разом з користувацьким інтерфейсом DesignBuilder. За допомогою даного програмного забезпечення було отримані дані у місячному розрізі щодо теплового навантаження та енергоспоживання досліджуваного приміщення квартири при різних режимах повітрообміну, заданих виходячи з результатів експерименту та діючих норм. В роботі [18] вже було досліджено вплив зовнішніх факторів на енергоспоживання об'єкту за постійного рівня повітрообміну.

В даній роботі дослідження дозволяють оцінити енергетичну ефективність використання природної вентиляції в квартирі, а також проаналізувати наведені підходи до задання повітрообміну в енергетичних розрахунках.

Мета та завдання

Метою роботи є визначення впливу фактичних та нормативних умов повітрообміну на динаміку споживання енергії у квартирі з переривчастим режимом опалення.

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні завдання:

- 1) аналіз впливу розподілу фактичних значень кратності повітрообміну на енергоспоживання квартири;
- 2) аналіз впливу розподілу нормативних значень кратності повітрообміну на енергоспоживання квартири;
- 3) порівняння різних підходів до задання повітрообміну при енергетичних розрахунках, включаючи використання постійних значень кратності із діючих стандартів та графіку повітрообміну за результатами експерименту та значеннями зі стандартів;

- 4) оцінка впливу сонячних теплонадходжень на енергоспоживання квартири при досліджуваних режимах повітрообміну.

Матеріал та результати досліджень

Вихідні дані.

Об'єктом дослідження обрано існуюче житлове приміщення. Це двокімнатна квартира, розміщена на четвертому поверсі п'ятиповерхового житлового будинку м. Києва, побудованому у 2016 році. Досліджувана квартира має дві зовнішні стіни. Загальна площа приміщень квартири, без балкону, становить 49,44 м², висота приміщень – 2,7 м. Базові геометричні параметри досліджуваної моделі квартири представлено на плані на рис. 1. При створенні енергетичної моделі приміщення квартири було розділено на п'ять зон, відповідних кімнатам: дві спальні, кухня, санвузол та коридор. Таке рішення пов'язано з необхідністю врахування того факту, що кожна кімната квартири має специфічні поведінкові та експлуатаційні характеристики. Дані щодо площі та опору теплопередачі огорожувальних конструкцій об'єкту дослідження зведені в табл. 1.

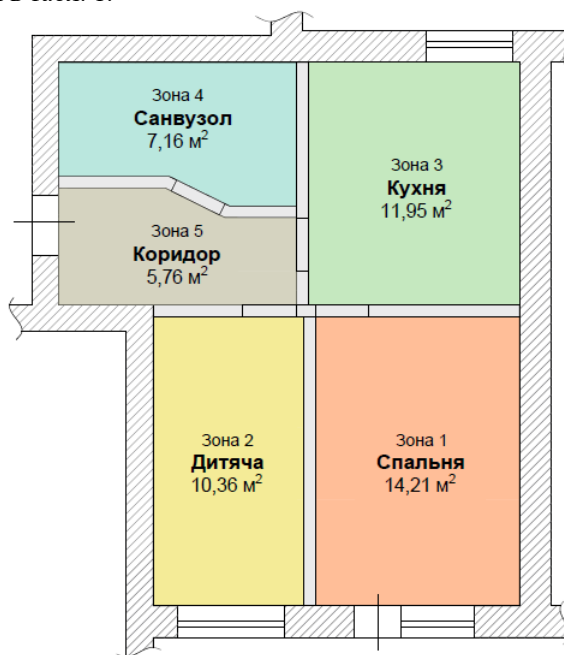


Рисунок 1 – План об'єкту дослідження

Таблиця 1 – Характеристика огорожувальних конструкцій

Тип конструкції	Опір теплопередачі конструкції ¹ , R_i , м ² ·К/Вт	Площа конструкції, A_i , м ²
Зовнішні стіни	1,506	16,1
Вікна та балконні двері	0,945	7,47
Підлога	-	49,44
Стеля	-	49,44

¹ – опір теплопередачі зовнішніх стін визначений з урахуванням теплопровідних включень.

Джерелом тепlopостачання квартири є індивідуальний двоконтурний газовий котел, який застосовуються для забезпечення контурів опалення та гарячого водopостачання. Опалення квартири здійснюється протягом 176 діб опалювального періоду. Внутрішня водяна система опалення квартири двотрубна, горизонтальна. Опалювальні прилади (радіатори) у спальнях та кухні встановлено біля зовнішніх стін під вікнами без радіаційного захисту, у санвузлі опалення здійснюється за допомогою теплої підлоги. В програмній моделі передбачено, що регулювання температури повітря в кімнатах здійснюється мешканцями за допомогою електронного термостату. Термостат обладнаний датчиками температури, розміщеними в кімнатах де є опалення. Наявність термостату запобігає зниженню температури нижче запрограмованої в кімнатах де розміщені датчики. Температурний режим програмується окремо для робочих та вихідних днів.

Система вентиляції квартири припливно-витяжна з природним спонуканням. Приплив свіжого повітря всередину відбувається шляхом інфільтрації (через нещільності у вікнах та дверях), а також через систему мікропровітрювання вікон. Повітрообмін відбувається за рахунок перепаду тиску всередині та зовні будівлі. Будівля оснащена системою витяжних вентиляційних повітроводів, які в місцях виходу обладнані механічними витяжними системами. Продуктивність кухонної витяжки 400-800 м³/год, в залежності від вибраного режиму її роботи. Продуктивність витяжного вентилятора у санвузлі 125 м³/год.

У досліджуваній квартирі проживає три людини, активність яких відрізняється у робочі та вихідні дні. Внутрішній режим експлуатації приміщень квартири безпосередньо впливає на графік використання теплової енергії та на внутрішні теплові надходження від людей, системи освітлення та електричного обладнання. Дані що внутрішніх теплонадходжень протягом робочого та вихідного днів зведені у таблицях 2 і 3 відповідно.

Таблиця 2 – Теплонадходження в робочий день

	Мешканці, Вт					Освітлення, Вт					Обладнання, Вт				
	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор
0-6	162,1	80,9	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	3,7	47,8	0	0,9
6-7	27,0	27,0	143,9	107,9	54,4	14,2	10,4	29,9	20,1	12,1	30,5	22,2	143,4	8,6	9,0
7-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	3,7	47,8	0	0,9
18-19	20,3	26,9	71,9	27,1	27,2	22,7	16,6	20,9	4,3	1,7	22,9	16,7	95,6	4,8	2,7
19-20	40,6	53,7	143,9	54,1	54,4	45,5	33,1	41,8	8,6	3,5	50,9	37,1	143,4	9,7	5,4
20-21	40,6	53,7	143,9	54,1	54,4	45,5	33,1	41,8	8,6	3,5	50,9	37,1	143,4	8,6	5,4
21-22	40,6	53,7	143,9	54,1	54,4	45,5	33,1	41,8	8,6	3,5	50,9	37,1	143,4	6,4	5,4
22-23	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	35,6	26,0	47,8	0	0,9
23-0	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	15,3	11,1	47,8	0	0,9

Таблиця 3 – Теплонадходження у вихідний день

	Мешканці, Вт					Освітлення, Вт					Обладнання, Вт				
	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор
0-6	162,1	80,9	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	3,7	47,8	0	0,9
6-8	80,9	80,9	72,1	37,9	24,3	8,5	6,2	14,9	11,5	5,2	20,4	14,8	95,6	4,3	3,6
8-9	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	25,4	18,5	95,6	4,3	3,6
9-12	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	40,7	29,7	95,6	5,4	3,6
12-13	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	30,5	22,2	95,6	5,4	3,6
13-16	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	30,5	22,2	95,6	2,1	3,6
16-17	40,6	40,6	108	26,9	0	19,9	14,5	6,0	4,3	1,7	30,5	22,2	95,6	2,1	3,6
17-18	40,6	40,6	108	26,9	0	19,9	14,5	6,0	4,3	1,7	40,7	29,7	95,6	2,1	3,6
18-19	40,6	40,6	108	26,9	0	19,9	14,5	6,0	4,3	1,7	50,9	37,1	95,6	3,8	3,6
19-22	60,8	80,9	108	37,9	24,3	45,5	33,1	35,8	8,6	3,5	50,9	37,1	95,6	5,4	3,6
22-23	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	35,6	26,0	47,8	0	0,9
23-0	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	15,3	11,1	47,8	0	0,9

У досліджуваній квартирі реалізований переривчастий режим опалення згідно графіку присутності мешканців. Цей режим полягає у зниженні внутрішньої температури у робочий час, коли мешканці відсутні в квартирі, та у нічні години. Фактичний переривчастий режим опалення, заданий в EnergyPlus за допомогою графіків для робочого та вихідного днів опалювального періоду:

– в робочі дні: з 06:00 до 07:00 – 22°C, з 07:00 до 18:30 – 16°C, з 18:30 до 22:00 – 22°C, з 22:00 до 06:00 – 20°C;

– у вихідні дні: з 06:00 до 22:00 – 22°C, з 22:00 до 06:00 – 20°C.

Вплив глобального потепління призводить до того, що період, типовий для міжсезоння займає тепер значно більшу кількість часу опалювального періоду ніж раніше, тому застосування переривчастого режиму опалення і вентиляції у такі періоди потребує більш детального аналізу. Для представлення результатів моделювання було обрано місяць березень. З метою наближення умов моделювання до реальних, було використано фактичні погодинні дані зовнішньої температури, швидкості та напрямку вітру, зібрані за даними з найближчої до досліджуваного об'єкту метеостанції. Згідно з фактичними даними для

березня місяця середньомісячна температура становила 5,6°C, швидкість вітру – 4 м/с, переважний напрямок вітру – південно-південно-західний. Для погодинних досліджень було обрано погодні умови для типового дня березня, коли проводилися експериментальні вимірювання кратності повітрообміну. Параметри навколишнього середовища для вибраного дня (температура повітря, швидкість вітру та сонячні теплонадходження на вертикальні поверхні) представлено на рис. 2. Сонячні теплонадходження представлені саме для південної та північної орієнтації, оскільки моделювання проводилося для цих двох варіантів, - коли зовнішні стіни спалень орієнтовані на південь та навпаки. Коефіцієнт пропускання сонячної радіації вікнами – 0,579.

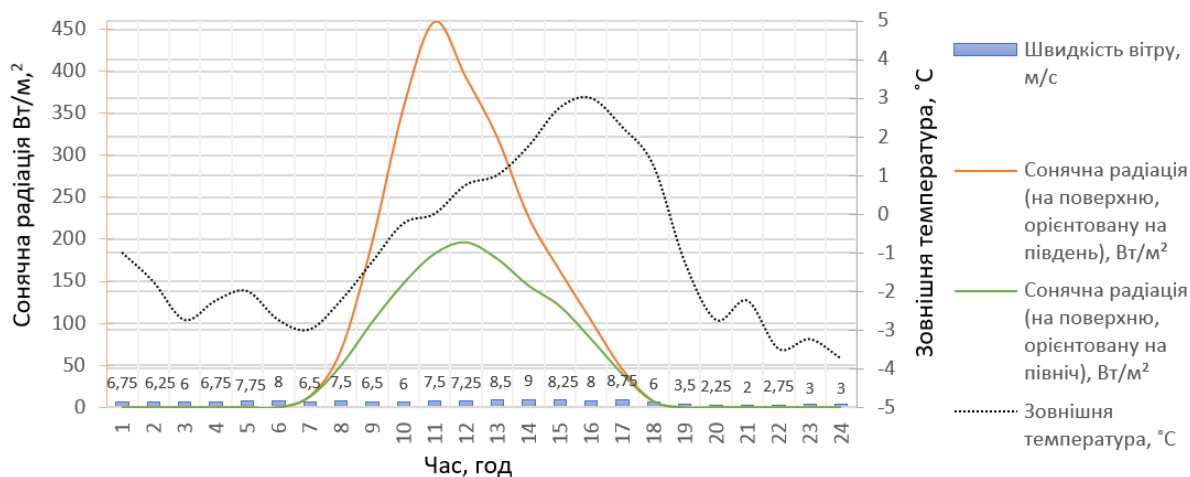


Рисунок 2 – Параметри навколишнього середовища для репрезентативного дня

З метою аналізу впливу повітрообміну на теплове навантаження приміщень було проведено дослідження ряду підходів до задання повітрообміну в житлових приміщеннях, рекомендованих діючими стандартами: ASHRAE Std 62.2-2019 [12], EN 16798-1:2019 [14] та українським ДБН В.2.2-15:2019 [19]. Нормативні значення кратності повітрообміну та витяжних повітряних потоків за цими нормами для досліджуваного приміщення квартири зведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Вимоги до повітрообміну досліджуваного приміщення (відповідно до діючих стандартів)

Стандарт	Приточний повітряний потік				Витяжний повітряний потік			
	Будівля в цілому		Спальня		Кухня		Санвузол	
	л/с	год ⁻¹	л/с, особу	год ⁻¹	л/с	год ⁻¹	л/с	год ⁻¹
ASHRAE Std 62.2-2019	17,92	0,483			50		25	
EN 16798-1:2019	20,76	0,56	7		20		25	
ДБН В.2.2-15-2019				0,5		1,5		1,5

В ASHRAE Std 62.2-2019 є можливість використання загальних значень кратності повітрообміну для всього житла. В стандарті приведено таблиці з вимогами щодо витрати зовнішнього повітря в залежності від площі житла та кількості спалень. Також, за цим стандартом є можливість визначення потреби в зовнішньому повітрі (л/с) за формулою:

$$Q_{tot} = 0.15A_{floor} + 3.5(N_{br} + 1) \quad (1)$$

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

Загальна витрата повітря, розрахована за формулою (1) для досліджуваного житла з двома спальнями та загальною площею 49,44 м², складає 17,92 л/с, що еквівалентно кратності повітрообміну 0,483 год⁻¹ (табл. 4).

Підхід до визначення необхідного повітрообміну за EN 16798-1:2019 заснований на принципі врахування всіх наявних джерел забруднення у будинку. Як і в Standard 62.2, в даному документі представлено приклад загальних норм вентиляції при неперервному режимі вентилявання протягом часу використання житла. Але в цьому стандарті така норма визначається за категорією будівлі, яка залежить від підвищення внутрішньої концентрації CO₂, в порівнянні з зовнішньою у PPM. Оцінка категорії внутрішнього середовища будівлі базується на категоріях ряду факторів: розрахункова внутрішня температура протягом періодів опалення та охолодження, розрахункове значення вентиляції, вологості, освітлення, шуму. Досліджуване приміщення відноситься до категорії II, що відображає нормальний рівень очікувань щодо більшості факторів. Загальна норма вентиляції житла в EN 16798-1:2019 виражена в л/с на квадратний метр, а також через кратність повітрообміну, при внутрішній висоті стелі 2,5 м. Для досліджуваного приміщення використовувалось значення витрати повітря 0,42 л/с на квадратний метр, що еквівалентно кратності повітрообміну 0,56 год⁻¹ при внутрішній висоті 2,7 м (табл. 4).

Українські будівельні норми для житлових будинків ДБН В.2.2-15:2019 визначають мінімальні вимоги до повітрообміну в різних приміщеннях при природній системі вентиляції. Так мінімальна кратність повітрообміну для спалень за цим документом визначається на рівні 0,5 год⁻¹, для кухні та сміщеного санвузла – 1,5 год⁻¹ (табл. 4).

Три підходи, наведені вище, засновуються на використанні значень загальної норми повітрообміну для житла в цілому або для окремих кімнат (ДБН В.2.2-15:2019). Для наближення розрахункових умов повітрообміну до реального експлуатаційного графіку було також проведено дослідження нормативного рівня повітрообміну для окремих приміщень за EN 16798-1:2019, з врахуванням годин використання та невикористання приміщень. В цьому стандарті, окрім загальної норми повітрообміну для житла в цілому, також приведено значення необхідної витрати повітря на одну людину. Для будівлі II категорії це значення становить 7 л/с на людину. Для кухні та санвузла за цим стандартом норма визначається за витратою витяжного повітряного потоку на точку. У випадку досліджуваної квартири необхідна витрата для кухні становить 20 л/с, для санвузла – 25 л/с. Необхідно зазначити, що при створенні графіку вентиляції за нормами EN 16798-1:2019 витяжні потоки було скориговано відповідно до експлуатаційного режиму квартири. В періоди відсутності людей відсутня потреба забезпечення комфортного рівня повітрообміну. В EN 16798-1:2019 рекомендується використовувати мінімальну норму вентиляції на рівні від 0,05 л/с на м² до 0,1 л/с на м² протягом годин невикористання приміщень. В українському ДБН В.2.5-67:2013 ОВК також зазначено, що кратність повітрообміну слід приймати 0,1 год⁻¹ у період невикористання приміщення за умови зачинених вікон і дверей. Тож задана нормативна кратність повітрообміну житла в робочі дні, в період відсутності людей (з 7:00 до 18:30) визначена на рівні 0,1 год⁻¹. Дане значення також застосовано для всіх приміщень, окрім спалень, в той час коли вони не використовуються за графіком присутності людей. Заданий режим повітрообміну на основі експлуатаційного режиму та нормативних вимог EN 16798-1:2019, для робочого та вихідного днів представлено в табл. 5.

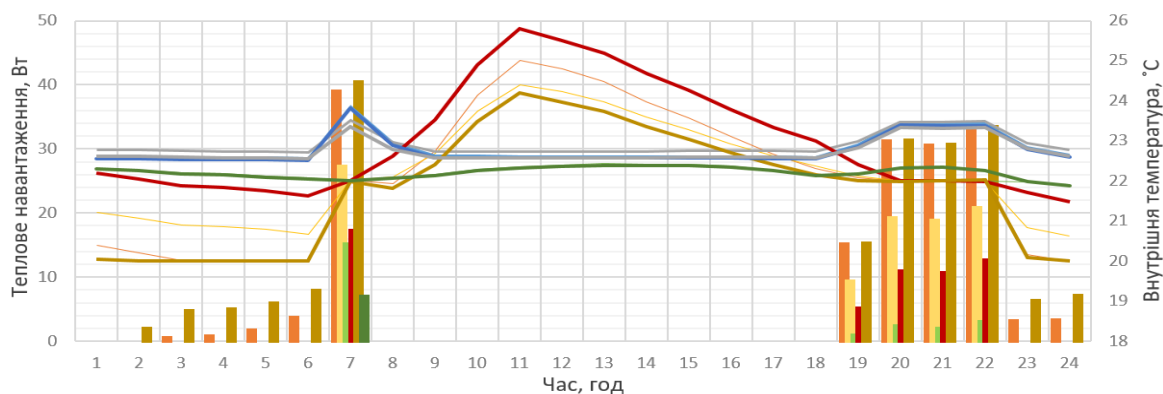
Таблиця 5 – Погодинна кратність повітрообміну за рекомендаціями EN 16798-1:2019 та за результатами фактичних вимірів, задана відповідно до експлуатаційного режиму робочого та вихідного дня

	EN 16798-1:2019					Експеримент				
	Робочий день					Вихідний день				
	Спальня	Дитяча	Кухня	Санвузол	Коридор	Спальня	Дитяча	Кухня	Санвузол	Коридор
0-6	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05
6-18	1,8	1,39	1,23	0,05	0,05	1,17	1,87	0,94	0,05	0,05
18-22	1,65	1,24	0,71	0,05	0,05	1,02	1,72	0,54	0,05	0,05
22-0	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05
0-6	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05
6-8	1,47	1,06	0,53	0,05	0,05	0,86	1,56	0,38	0,05	0,05
8-18	1,47	1,06	0,26	0,05	0,05	0,86	1,56	0,28	0,05	0,05
18-19	1,47	1,06	0,26	0,05	0,05	0,86	1,56	0,28	0,05	0,05
19-22	1,47	1,06	0,53	0,05	0,05	0,86	1,56	0,38	0,05	0,05
22-0	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05

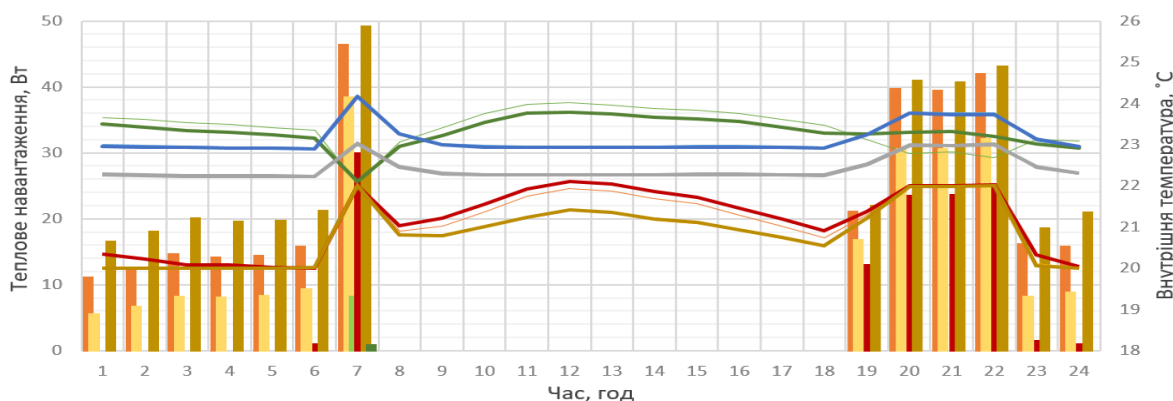
За результатами проведеного в роботі [15] експерименту було проаналізовано фактичні дані про витрату повітря у кожній кімнаті. При заданні графіку повітрообміну за результатами вимірювань в квартирі, передбачається, що зовнішнє повітря надходить безпосередньо до приміщень, в яких є вікна (спальні та кухня), шляхом інфільтрації. Фактичний рівень повітрообміну для спальної та дитячої кімнат обрано за експериментально виміряною кратністю повітрообміну: в режимі мікропровітрювання, за присутності людей в квартирі – 0,73 год⁻¹ та 1,43 год⁻¹; при закритих вікнах, за відсутності людей – 0,1 год⁻¹

та $0,14 \text{ год}^{-1}$ для спальні та дитячої кімнат відповідно. Усереднена погодинна кратність повітрообміну в кухні та санвузлі визначена за витратою повітря при включенні механічних витяжних систем. Частота використання витяжок визначена експлуатаційним режимом приміщень та графіком присутності людей. Подача повітря до коридору та санвузла здійснюється шляхом перенесення нагрітого повітря зі спалень і кухні та збільшується при включенні витяжних систем на витрату витяжного повітряного потоку. Тож за умови, що повітря нагрівається в кімнатах, через які воно надходить при формуванні графіку повітрообміну вважаємо, що кратність повітрообміну по відношенню до припливного зовнішнього повітря в коридорі та санвузлі задається на мінімальному рівні $0,05 \text{ год}^{-1}$. Користуючись результатами аналізу даних щодо фактичної кратності повітрообміну в приміщеннях, а також продуктивності наявних витяжних систем в кухні та санвузлі, задана кратність повітрообміну по відношенню до припливного зовнішнього повітря зведена в табл. 5.

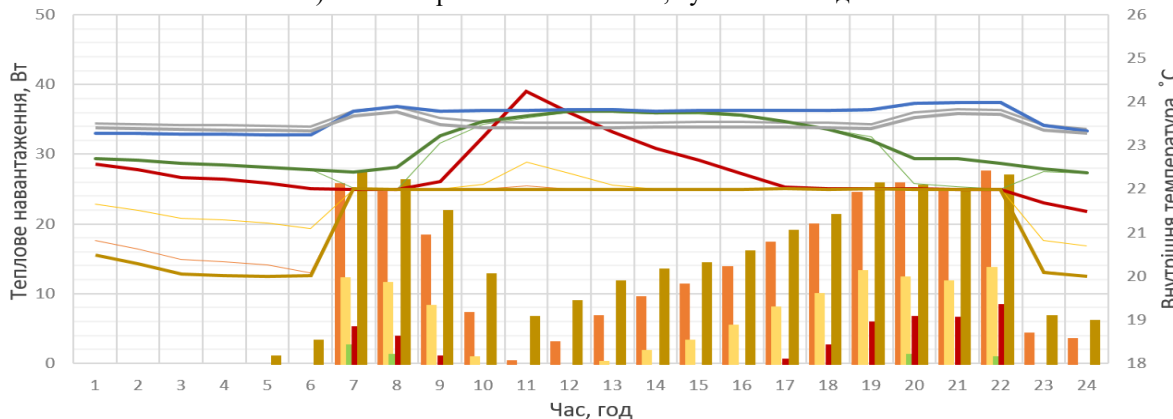
Результати моделювання теплового навантаження кімнат квартири та внутрішніх температур за умов нормативного повітрообміну за заданим графіком відповідно до рекомендацій EN 16798-1:2019 та за графіком за результатами фактичних вимірів (табл. 5) для обраної доби (рис. 2) при експлуатаційному режимі робочого та вихідного дня та для різної орієнтації вікон за сторонами світу представлені на рис. 3.



а) спальні орієнтовані на південь, кухня – на північ



б) спальні орієнтовані на північ, кухня – на південь



в) спальні орієнтовані на південь, кухня – на північ

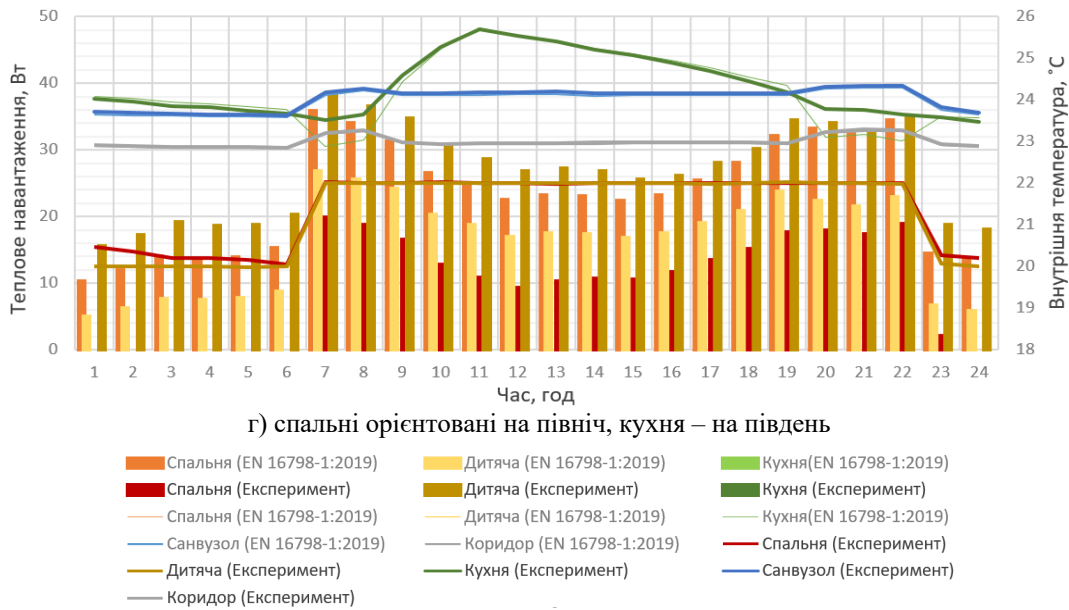


Рисунок 3 – Погодинне теплове навантаження при використанні заданого графіку повітрообміну за EN 16798-1:2019 та результатами експерименту (табл. 5) для робочого (а, б) та вихідного (в, г) дня

Відповідно до рис. 3 (а, б) в години невикористання квартири котел вимикається тому що внутрішня температура в кімнатах не досягає нижньої запрограмованої грані – 16°C. Відсутність теплового навантаження в кухні на більшості графіків пояснюється низьким рівнем повітрообміну, зафіксованим під час роботи витяжки. Теплове навантаження санвузла відсутнє, так як на нього майже не впливає повітрообмін через те що до санвузла, як і до коридору, потрапляє вже нагріте в інших кімнатах повітря. В денні години в спальнях або в кухні внутрішня температура часту перевищує задану 22°C. Це пов'язано з наявністю сонячних теплонадходжень через світлопрозорі конструкції від 7 до 19 год (рис. 2), значне підвищення внутрішньої температури спостерігаються в кімнатах, огорожувальні конструкції яких орієнтовані на південь.

За результатами моделювання було проведено оцінку впливу режиму повітрообміну на рівень і динаміку енергетичних показників квартири при переривчастому опаленні з урахуванням графіків зміни режиму експлуатації і погодних умов. В таблицю 6 зведено дані результатів моделювання за різних підходів до задання повітрообміну в квартирі з переривчастим режимом опалення. Результати включають дані щодо енергоспоживання, середньозваженої кратності повітрообміну та внутрішньої температури досліджуваного приміщення для експлуатаційних режимів робочого та вихідного дня за однакових погодних умов (рис. 2) щодо цих показників. Графічна інтерпретація результатів представлена на рис. 4. Досліджені підходи включають як метод задання постійної кратності повітрообміну (CVA) для всього житла, визначеної згідно рекомендацій ASHRAE Std 62.2, EN 16798-1:2019 та ДБН В.2.2-15:2019, так і використання графіків повітрообміну в різних кімнатах (SVA) відповідно до EN 16798-1:2019 та типового експлуатаційного режиму в різних кімнатах.

Таблиця 6 – Результати моделювання за різними підходами до задання повітрообміну в квартирі

Підхід до задання повітрообміну	Орієнтація ¹	Споживання теплової енергії, кВт·год			Внутрішня температура, °C			Середньозважена кратність повітрообміну, год ⁻¹		
		Середньодобова	Робочий день	Вихідний день	Середньодобова	Робочий день	Вихідний день	Середньодобова	Робочий день	Вихідний день
ASHRAE Std 62.2, 2019 (постійна кратність)	Пд-Пн	1,97	1,23	2,98	21,21	21,02	21,56	0,483	0,483	0,483
	Пн-Пд	3,44	3,15	7,07	20,47	20,09	20,91			
EN 16798-1:2019 (постійна кратність)	Пд-Пн	2,83	2,72	5,16	20,88	20,63	21,22	0,56	0,56	0,56
	Пн-Пд	4,46	4,55	9,54	20,26	19,8	20,74			
ДБН В.2.2-15:2019 (постійна кратність)	Пд-Пн	7,36	8,25	14,6	21,26	20,95	21,92	0,828	0,828	0,828
	Пн-Пд	8,72	10,47	19,4	20,43	19,9	21,2			
EN 16798-1:2019 (за графіком, табл. 5)	Пд-Пн	2,59	3,56	4,98	22,37	22,43	22,67	0,503	0,435	0,7
	Пн-Пд	5,02	6,54	11,93	22,16	22,17	22,77			
За результатами експерименту (за графіком, табл. 5)	Пд-Пн	2,09	2,85	3,85	22,42	22,5	22,78	0,449	0,387	0,628
	Пн-Пд	4,37	5,28	9,94	22,17	22,17	22,82			

¹ – Пд-Пн – спальні орієнтовані на південь, кухня – на північ; – Пн-Пд – спальні орієнтовані на північ, кухня – на південь.

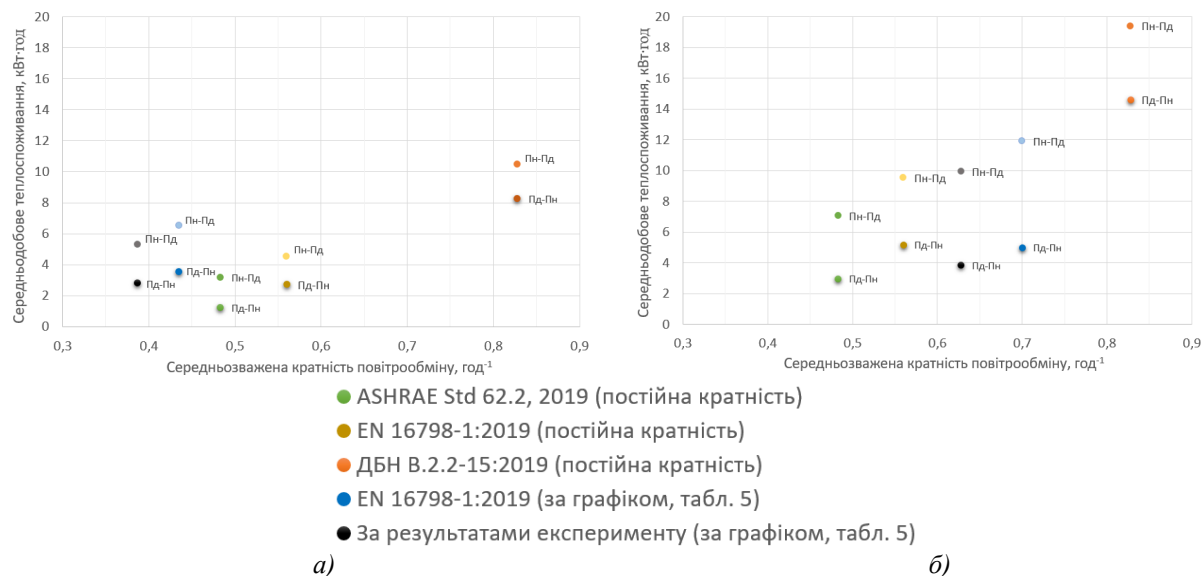


Рисунок 4 – Залежність середньодобового енергоспоживання від середньозваженої кратності повітрообміну, на базі різних підходів до задання повітрообміну, для робочого (а) та вихідного (б) дня

Результати динамічного моделювання свідчать про те, що від обраного підходу до задання повітрообміну в значній мірі залежить кількість теплоти, що витрачається на нагрів свіжого повітря, яке надходить ззовні, та результат визначення споживання енергії на опалення. У випадку використання постійних значень кратності той самий рівень повітрообміну забезпечується у години використання і невикористання приміщень. При цьому маємо практично пряму пропорційну залежність кратності повітрообміну від енергоспоживання для робочого та вихідного дня (рис. 4). За заданим режимом переривчастого опалення у робочі дні, при відсутності людей в квартирі (7:00 – 18:30), в результаті моделювання виявлено, що використання навіть найвищого з досліджуваних значень кратності не призведе до увімкнення котла та збільшення теплового навантаження в ці години. Це відповідає режиму роботи котла, що має місце на практиці для розглянутих погодних умов. За умов поєднання з впливами графіків переривчастого опалення та теплонадходжень від інших джерел, перш за все від сонця, вплив кратності на середні температури внутрішнього повітря не має регулярного характеру. Для репрезентативних робочого та вихідного днів прийняті найбільш холодні для обраного періоду погодні умови, тому для цих днів дані по споживанню енергії на опалення вищі за середньодобові за місяць (табл. 5). Таким чином, результати свідчать про те, що підхід до врахування режиму повітрообміну безпосередньо впливає на енергоспоживання будівлі.

Висновки.

В результаті дослідження вимог до повітрообміну житлових приміщень виявлено, що вентиляція в спальнях визначає загальний рівень вентиляції всього житла в типових малогабаритних квартирах. Зазвичай, для розрахунку рівня енергетичної ефективності будівель використовують нормативне значення кратності повітрообміну. Використання постійних значень кратності повітрообміну (наведених в нормах ASHRAE і CEN) при розрахунках житлових будівель, є доцільним для визначення енергетичних показників цих будівель за умов експлуатації, що доводиться подібним рівнем енергоспоживання як при постійній кратності повітрообміну так і при врахуванні експлуатаційного режиму. Необхідно зазначити, що українські норми ДБН В.2.2-15:2019 є завищеними, порівняно з вищезгаданими, оскільки вони є проєктними. Врахування ж графіку повітрообміну в першу чергу має сенс за наявності індивідуального регулювання опалення. В такому випадку, при використанні приміщень можна забезпечити комфортний рівень повітрообміну, а за відсутності людей низити його до мінімального рівня. Використання експериментально-розрахункових значень кратності повітрообміну дозволить більш точно визначити енергетичні характеристики будівель відповідно 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.

З точки зору енергоефективності встановлення вікон на мікропровітрювання за присутності людей, їх закриття за відсутності, та контроль роботи витяжних систем може забезпечити рівень енергоспоживання, властивий приміщенням з механічною системою вентиляції. Але для виключення впливу людського фактору більш доцільним є використання сучасних вентиляційних систем з контролем

витрати повітря. Застосування регульованого режиму повітрообміну дозволяє підтримувати високу якість внутрішнього повітря за присутності людей, уникаючи при цьому підвищених втрат теплоти на нагрівання зовнішнього повітря в години невикористання приміщень. При цьому механічна система вентиляції має бути обладнана сенсорними датчиками присутності людей, внутрішньої температури, концентрації CO₂ та летючих органічних сполук. Необхідно також зазначити, що з метою енергозбереження, використання вентиляційних систем з контролем витрати повітря має супроводжуватись можливістю задання переривчастого режиму опалення приміщень за допомогою термостатів в кожній кімнаті. З точки зору індивідуального рівня комфортності застосування контролю повітрообміну за графіком може забезпечити кращу якість повітря в години використання приміщення.

Список використаної літератури

1. Földváry, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., Petráš, D. (2017) Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*. Vol. 122. Pp. 363–372.
2. Yoshino H., Hongb T., Nord N. (2017) IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings – Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings*, 152, 124–136.
3. Hong, T., Taylor-Lange, S. C., D’Oca, S., Yan, D., & Corngati, S. P. (2016). Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy and Buildings*, 116, 694–702.
4. Canha, N., Lage, J., Candeias, S., Alves, C., & Almeida, S. M. (2017). Indoor air quality during sleep under different ventilation patterns. *Atmospheric Pollution Research*, 8(6), 1132–1142.
5. Ren, Z., & Chen, D. (2015). Simulation of Air Infiltration of Australian Housing and its Impact on Energy Consumption. *Energy Procedia*, 78, 2717–2723.
6. Lu, D. B., & Warsinger, D. M. (2020). Energy savings of retrofitting residential buildings with variable air volume systems across different climates. *Journal of Building Engineering*, 30, 101223.
7. Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. *Journal of Building Engineering*, 100917.
8. Simanic, B., Nordquist, B., Bagge, H., & Johansson, D. (2019). Indoor air temperatures, CO₂ concentrations and ventilation rates: Long-term measurements in newly built low-energy schools in Sweden. *Journal of Building Engineering*, 25, 100827.
9. M Cehlin, T Karimipannah, U Larsson, A Ameen. (2019). Comparing thermal comfort and air quality performance of two active chilled beam systems in an open-plan office. *Journal of Building Engineering*, 100827.
10. Leivo, V., Prasauskas, T., Du, L., Turunen, M., Kiviste, M., Aaltonen, A., Haverinen-Shaughnessy, U. (2018). Indoor thermal environment, air exchange rates, and carbon dioxide concentrations before and after energy retro fits in Finnish and Lithuanian multi-family buildings. *Science of The Total Environment*, 621, 398–406.
11. P.F. Pereira, N.M. Ramos, R.M. Almeida, M.L. Simoes, E. Barreira, Occupant influence on residential ventilation patterns in mild climate conditions, *Energy Procedia* 132 (2017) 837–842 (11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway).
12. ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, ASHRAE, Atlanta, Georgia.
13. D. Zukowska, G. Rojas, E. Burman, G. Guyot, M. del C. Bocanegra-Yanez, J. Laverge, G. Cao, J. Kolarik, Ventilation in low energy residences—a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries, *Int. J. Vent.* (2020) 1–20
14. EN 16798-1, Energy Performance of Buildings – Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics – Module M1-6, European Standard, 2018.
15. Експериментальне дослідження якості повітря та повітрообміну в закладах освіти та житлових будівлях / Дешко В.І., Білоус І.Ю., Винорадов-Салтиков В.О., Суходуб І.О., Яценко О.І. // Журнал «Вісник КНУТД». Випуск № 4 (148). Київ 2021, С. 25-37
16. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 96(4). Pp. 27–41.
17. Ng, L., Persily, A., Emmerich, S. (2015) Improving infiltration modeling in commercial building energy models. *Energy and Buildings*, 88, 316–323.
18. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2020). Joint influence of intermittent heating mode and outdoor factors on apartment heat load. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 191, 18-27.
19. ДБН В.2.2-15:2019 Житлові будинки. Основні положення. [Чинний з 01.12.2019]. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 44 с.

V. Deshko, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

I. Bilous, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-6640-103X

I. Sukhodub, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5895-1306

O. Yatsenko, Asst. Lect., ORCID 0000-0002-8001-5987

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

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF AIR EXCHANGE DISTRIBUTION BETWEEN ROOMS ON THE APARTMENT ENERGY CONSUMPTION

Modern results of Ukrainian buildings energy analysis show that 30-50% of the energy for heating goes to heat the supply air, and that is the largest share in the building energy balance. In terms of energy consumption, efficiency of the air exchange mode largely depends on occupancy schedule and air distribution in time and space. The application of air exchange schedule approach makes more sense in case when individual heating control is carried out. Therefore, during occupied hours, the comfortable ventilation level can be ensured, and, during unoccupied hours, it can be reduced to a minimum. According to the results of the study, the use of intermittent air exchange mode in the studied apartment on weekdays, leads to decrease in energy consumption compared to constant air exchange at the level of upper values of the ventilation schedule. In terms of energy efficiency, the use of the constant air change rate from ASHRAE Std 62 is the most efficient approach. In terms of indoor air quality and concentration of CO₂ and VOCs, the scheduled air exchange approach with increased air change rates (from EN 16798) during occupied hours is more efficient. Therefore, the use of required and experimental air change rate values to create the hourly schedules allows to define more precisely a building energy consumption and to choose an optimal operation schedule for building engineering systems to provide thermal comfort and indoor air quality during occupied hours.

Keywords: air exchange, natural ventilation, intermittent heating mode, EnergyPlus, energy saving.

REFERENCES

1. Földváry, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., Petráš, D. (2017) Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*. Vol. 122. Pp. 363–372.
2. Yoshino H., Hongb T., Nord N. (2017) IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings – Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings*, 152, 124–136.
3. Hong, T., Taylor-Lange, S. C., D’Oca, S., Yan, D., & Corngati, S. P. (2016). Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy and Buildings*, 116, 694–702.
4. Canha, N., Lage, J., Candeias, S., Alves, C., & Almeida, S. M. (2017). Indoor air quality during sleep under different ventilation patterns. *Atmospheric Pollution Research*, 8(6), 1132–1142.
5. Ren, Z., & Chen, D. (2015). Simulation of Air Infiltration of Australian Housing and its Impact on Energy Consumption. *Energy Procedia*, 78, 2717–2723.
6. Lu, D. B., & Warsinger, D. M. (2020). Energy savings of retrofitting residential buildings with variable air volume systems across different climates. *Journal of Building Engineering*, 30, 101223.
7. Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. *Journal of Building Engineering*, 100917.
8. Simanic, B., Nordquist, B., Bagge, H., & Johansson, D. (2019). Indoor air temperatures, CO₂ concentrations and ventilation rates: Long-term measurements in newly built low-energy schools in Sweden. *Journal of Building Engineering*, 25, 100827.
9. M Cehlin, T Karimipannah, U Larsson, A Ameen. (2019). Comparing thermal comfort and air quality performance of two active chilled beam systems in an open-plan office. *Journal of Building Engineering*, 100827.
10. Leivo, V., Prasauskas, T., Du, L., Turunen, M., Kivistie, M., Aaltonen, A., Haverinen-Shaughnessy, U. (2018). Indoor thermal environment, air exchange rates, and carbon dioxide concentrations before and after energy retro fits in Finnish and Lithuanian multi-family buildings. *Science of The Total Environment*, 621, 398–406.
11. P.F. Pereira, N.M. Ramos, R.M. Almeida, M.L. Simoes, E. Barreira, Occupant influence on residential ventilation patterns in mild climate conditions, *Energy Procedia* 132 (2017) 837–842 (11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway).
12. ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, ASHRAE, Atlanta, Georgia.

13. D. Zukowska, G. Rojas, E. Burman, G. Guyot, M. del C. Bocanegra-Yanez, J. Laverge, G. Cao, J. Kolarik, Ventilation in low energy residences—a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries, *Int. J. Vent.* (2020) 1–20
14. EN 16798-1, Energy Performance of Buildings – Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics – Module M1-6, European Standard, 2018.
15. Deshko V., Bilous I., Vynogradov-Saltykov V., Sukhodub I., Yatsenko O. Eksperimentalne doslidzhennya yakosti povitrya ta povitroobminu v zakladah osviti ta zhitlovih budivlyah. [Experimental study of air quality and air exchange in educational and residential buildings]. *Vipusk №4 (148). Kyiv 2021, S. 25-37*
16. Bilous, I.Yu., Dshko, V.I., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 96(4). Pp. 27–41.
17. Ng, L., Persily, A., Emmerich, S. (2015) Improving infiltration modeling in commercial building energy models. *Energy and Buildings*, 88, 316–323.
18. Dshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2020). Joint influence of intermittent heating mode and outdoor factors on apartment heat load. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 191, 18-27.
19. DBN V.2.2-15:2019 Zhitlovi budinki. Osnovni polozhennya. [Chinnij z 01.12.2019]. K.: Ministerstvo regionalnogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunalnogo gospodarstva Ukrayini, 2019. 44 s.

Надійшла 23.03.2021
Received 23.03.2021