

УДК 699.86

## ВПЛИВ ІМОВІРНІСНОГО ХАРАКТЕРУ ЗМІНИ ПОГОДНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ НА ПАРАМЕТРИ ПРИРОДНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ БУДИНКУ

В. А. Волощук, А. М. Рокочинський

*В статті проаналізовано вплив мінливості погодно-кліматичних умов на параметри природної вентиляції будинку. Показано, що на відміну від існуючих підходів, урахування імовірнісної зміни геофізичних факторів дозволяє підвищити обґрунтованість рішень при впровадженні енергоефективних технологій в системі вентиляції будинку.*

**Ключові слова:** вентиляція будинку, погодно-кліматичні умови, геофізичні фактори, енергозбереження, природна вентиляція.

## ВЛИЯНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДОМА

В. А. Волощук, А. М. Рокочинський

*В статье проанализировано влияние изменчивости погодно-климатических условий на параметры естественной вентиляции дома. Показано, что в отличие от существующих подходов, учета вероятностной изменения геофизических факторов позволяет повысить обоснованность решений при внедрении энергоэффективных технологий в системе вентиляции дома.*

**Ключевые слова:** вентиляция дома, погодно-климатические условия, геофизические факторы, энергосбережения, естественная вентиляция.

## EFFECT OF CHANGES PROBABILISTIC NATURE OF WEATHER CONDITIONS NATURAL VENTILATION PARAMETERS HOUSE

V. Voloshchuk, A. Rokochynskyu

*The article analyzes the impact of the variability of weather and climate conditions on the parameters of natural ventilation building. It is shown that in contrast to existing approaches, taking into account the probability changes geophysical factors can increase the validity of the decisions in the implementation of energy efficient technologies in building ventilation.*

**Keywords:** building ventilation, weather conditions, geophysical factors, energy, natural ventilation.

Витрати енергії на нагрівання вентиляційного/інфільтраційного повітря займають досить суттєву частку в загальному енергетичному балансі будівлі. Повітрообмін обумовлений необхідністю підтримання належної якості складу внутрішнього повітря. Часто для зменшення енергоспоживання будівлі вдаються до суттєвого зниження кратності повітрообміну, що не є прийнятним з точки зору створення комфортних умов у приміщеннях. Так, у період енергетичної кризи 1970-х років саме через намагання скоротити енергоспоживання у будівлях шляхом зниження витрат вентиляційного/інфільтраційного повітря з'явилася проблема синдрому «хворої» будівлі [1]. В Україні з аналогічною проблемою стикнулися зараз, коли відбулася масова заміна вікон у будівлях, побудованих у період бувшого Радянського союзу, на повітронепроникні. Саме негерметичність вікон у таких будівлях забезпечувала відповідну чистоту внутрішнього повітря за рахунок інфільтрації та ексільтрації. В даному випадку правильнішим було б улаштування рекуператорів теплоти витяжного повітря. Але влаштування таких систем в уже збудованих будинках не завжди технічно можливе.

Отже, проблема забезпечення вентиляції будівлі залишається актуальною. При цьому повністю не вирішеними поки що залишаються питання методології розрахунку параметрів та характеристик систем вентиляції.

Найбільшу частку будівель, особливо житлових, як в Україні, так і в інших країнах займають саме ті, де передбачена природна вентиляція. Існуючі підходи [2, 3] з визначення витрат енергії на нагрів вентиляційного повітря у таких системах не враховують те, що характер залежності цих витрат є нелінійним відносно метеорологічних параметрів, які у свою чергу змінюються випадковим чином. Наприклад, в роботі [3] дані витрати за весь опалювальний період пропонується визначати за формулою

$$E_{n_{inf/vent}} = c \cdot ACH \cdot v_v \cdot V_h \cdot \gamma_0 \cdot \eta \cdot D_d, \quad (1)$$

де  $c$  – питома теплоємність повітря, приймається постійною і рівною  $1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  
 $ACH$  – середня кратність повітрообміну будинку за опалювальний період, яка приймається постійною,  $\text{год}^{-1}$ ;  
 $v_v$  – коефіцієнт зниження об'єму повітря у будинку, яким враховується наявність внутрішніх огорожувальних конструкцій;  
 $V_h$  – опалюваний об'єм будинку,  $\text{м}^3$ ;  
 $\gamma_0$  – середня за опалювальний період густина повітря, що надходить до приміщення за рахунок інфільтрації або вентиляції,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $\eta$  – коефіцієнт впливу зустрічного теплового потоку в огорожувальних конструкціях, що приймається в залежності від конструктивних параметрів огорожень.  
 $D_d$  – кількість градусо-днів опалювального періоду.

Отже, із формули (1) бачимо, що в ній не врахована можлива зміна кратності повітрообміну  $ACH$ , а також густини зовнішнього повітря протягом опалювального періоду залежно від зміни таких метеорологічних чинників як температура та швидкість зовнішнього повітря і пов'язаної з цим функції витрат енергії на нагрівання інфільтраційного повітря (1). Іншими словами, у виразі (1) добуток  $ACH$ ,  $\gamma_0$  та різниці температур внутрішнього і зовнішнього повітря, що входить у вираз для визначення кількості градусо-днів, «розірвали» та представили у вигляді трьох незалежних параметрів. Про це, зокрема, вказано в роботі [4]. Але, знову ж таки, в цій роботі не враховано ще той факт, що температура та швидкість зовнішнього повітря змінюються впродовж опалювального періоду випадковим чином.

**Мета роботи** – кількісна оцінка впливу імовірнісного характеру погодно-кліматичного фактора на параметри природної вентиляції будівлі на основі відповідного статистичного матеріалу та методів теорії імовірностей, дослідження практичного значення врахування цього впливу.

Природний повітрообмін у будинку обумовлений дією двох параметрів – різницею температур внутрішнього та зовнішнього повітря та вітровим напором. При цьому, для визначення кратності повітрообміну  $ACH$  пропонується використовувати принцип суперпозиції [2, 5]

$$ACH = \frac{V_{inf}}{V_h} = \frac{k_{inf} \cdot (\Delta p)^{n_{inf}}}{V_h}, \quad (2)$$

де

$$\Delta p = k_{stack} \Delta T + k_{wind} w^2, \quad (3)$$

$V_{inf}$  – об'ємна витрата зовнішнього повітря, що інфільтрує всередину будівлі;

$k_{inf}$ ,  $k_{stack}$ ,  $k_{wind}$  – емпіричні коефіцієнти, значення яких залежить від конструктивних характеристик будівлі;

$\Delta T$ ,  $w$  – відповідно різниця температур внутрішнього і зовнішнього повітря та швидкість вітру;

$n_{inf} = 0,5 \dots 1,0$  – коефіцієнт, який залежить від режиму інфільтрації, найчастіше його значення становить  $n_{inf} = 0,67$  [2, 5, 6].

Тоді

$$ACH = \frac{V_{inf}}{V_h} = \frac{k_{inf} \cdot (k_{stack} \Delta T + k_{wind} W^2)^{n_{inf}}}{V_h} \quad (4)$$

Відповідно, витрата енергії на нагрівання інфільтраційного повітря буде визначатися за формулою

$$Q_{inf} = c \cdot k_{inf} \cdot (k_{stack} \Delta T + k_{wind} W^2)^{n_{inf}} \cdot v_v \cdot \gamma_0 \cdot \eta \cdot \Delta T \quad (5)$$

Отже, бачимо, що і кратність повітрообміну  $ACH$ , і витрата енергії  $Q_{inf}$  на нагрівання інфільтраційного повітря є нелінійними функціями відносно різниці температур та швидкості вітру, які є змінними в часі. Прийемо, що ці аргументи є випадковими величинами. На рис. 1, для прикладу, показані гістограма розподілу різниці  $\Delta T$  температур внутрішнього повітря в приміщенні та середньодобової температури зовнішнього повітря, а також середньодобової швидкості зовнішнього повітря  $W$  окремо взятого опалювального періоду Рівненського регіону. Бачимо, що дійсно ці показники можна вважати як такими, що підпорядковуються законам теорії імовірностей.



Рисунок 1 – Гістограма розподілу різниці температур внутрішнього повітря в приміщенні та середньодобової температури зовнішнього повітря окремо взятого опалювального періоду для Рівненського регіону,  $\Delta T = 291,15 K - T_{out}$

Зробимо теоретичний аналіз впливу імовірнісного характеру реалізації геофізичних показників на показники природного повітрообміну в будівлях. Розглянемо більш спрощений випадок, коли швидкість вітру відсутня. Тоді кратність повітрообміну і кількість затраченої на нагрівання інфільтраційного повітря енергії будуть відповідно визначатися за формулами

$$ACH = \frac{k_{inf} \cdot (k_{stack} \Delta T)^{n_{inf}}}{V_h}; \quad (6)$$

$$Q_{inf} = c \cdot k_{inf} \cdot k_{stack}^{n_{inf}} \cdot v_v \cdot \gamma_0 \cdot \eta \cdot (\Delta T)^{n_{inf}+1} \quad (7)$$

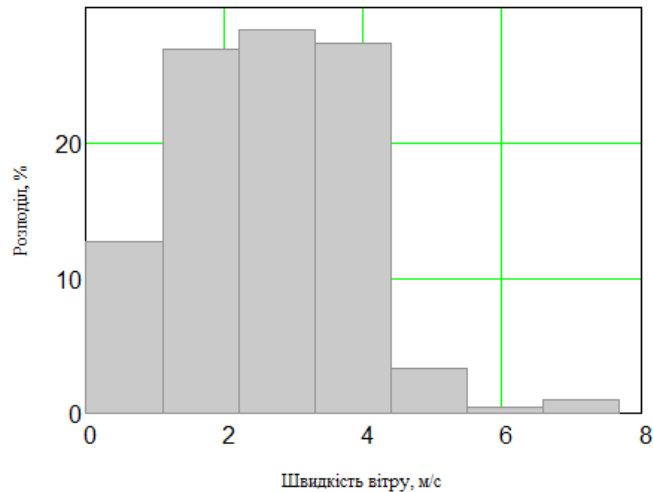


Рисунок 2 – Гістограма розподілу середньодобової швидкості вітру окремо взятого опалювального періоду для Рівненського регіону

Отже, якщо вважати, що за певний період часу (опалювальний сезон, місяць тощо) різниця температур внутрішнього та зовнішнього повітря  $\Delta T$  є випадковою величиною з відповідним законом розподілу, то загальний або середній параметр природної вентиляції  $y_{inf}$  буде визначатися за формулою математичного сподівання функції, яка залежить від різниці  $\Delta T$  і також є випадковою величиною

$$y_{inf}^{calc} = \int_{\Delta T_{min}}^{\Delta T_{max}} y_{inf}(\Delta T) f(\Delta T) d\Delta T, \quad (8)$$

де  $y_{inf}(\Delta T)$  – функція, що визначає параметр природної вентиляції і залежить від випадкової величини  $\Delta T$ ;

$f(\Delta T)$  – густина розподілу різниці температур  $\Delta T$  як випадкової величини;

$y_{inf}^{calc}$  – розрахунковий параметр природної вентиляції (наприклад, загальна кількість енергії, спожита за певний період для нагрівання інфільтраційного повітря, середнє значення кратності повітрообміну тощо).

На практиці, при визначенні функцій такого типу, використовують спрощену формулу

$$y_{inf, simple}^{calc} = y_{inf}(\Delta T_{mean}), \quad (9)$$

де  $\Delta T_{mean}$  – осереднене значення різниці температур за розрахунковий період.

Формула (9) може бути використана лише в окремих випадках (наприклад, коли функція  $y(\Delta T)$  є лінійною відносно  $\Delta T$  без розривів та зламів).

Для статистичного ряду, показаного у вигляді номограми на рис. 1, густину розподілу імовірностей найкраще описати кривою розподілу Пірсона I роду, де дотична на лівому кінці цієї кривої є вертикальною. Для України, в більшості випадків, це обмеження визначається температурою зовнішнього повітря, при якій починається опалювальний період  $T_{out} = 8...10 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Але для практичного застосування можна у першому наближенні використати криву нормального розподілу випадкової величини. При цьому, статистичне опрацювання показало, що математичне сподівання різниці  $\Delta T = T_{a-room} - T_{out}$  становить  $\Delta T_{mean} = 18,9\text{K}$ , а середнє квадратичне відхилення  $\sigma_{\Delta T} = 6,3\text{K}$ .

Введемо показник, який буде характеризувати відносне відхилення параметрів природної вентиляції, визначених за спрощеною формулою (9), у порівнянні з тими ж параметрами, але визначеними за формулою (8)

$$\Delta = \frac{y_{inf}^{calc} - y_{inf.simple}^{calc}}{y_{inf}^{calc}} \cdot 100\% . \quad (10)$$

На рис. 3 показані результати теоретичної оцінки похибки  $\Delta$  при визначенні середньої за опалювальний період кратності повітрообміну  $ACH_{mean}$  та сумарного за опалювальний період споживання енергії на нагрівання інфільтраційного повітря при нормальному законі розподілу випадкової величини  $\Delta T$  та таким, що задається кривою Пірсона типу I.

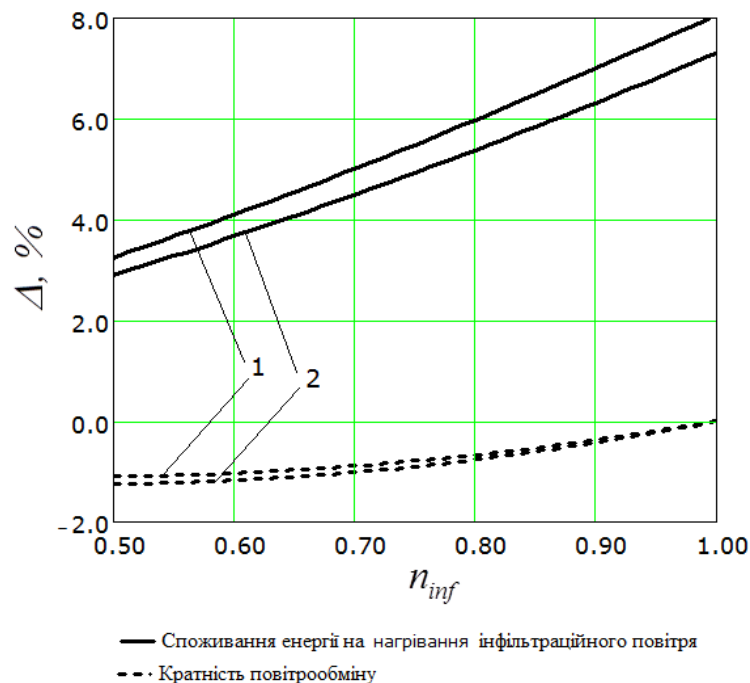


Рисунок 3 – Теоретичні похибки  $\Delta$  при визначенні середньої за опалювальний період кратності повітрообміну та сумарного за опалювальний період споживання енергії на нагрівання інфільтраційного повітря при нормальному законі розподілу (1) випадкової величини  $\Delta T$  та таким, що задається кривою Пірсона типу I (2)

З рис. 3 бачимо, що середня за опалювальний період кратність повітрообміну, визначена з урахуванням імовірнісного характеру зміни  $\Delta T$ , може бути нижчою на 1 % залежно від значення показника  $n_{inf}$  у порівнянні з кратністю повітрообміну, визначеною за спрощеною формулою (9). Тобто такою похибкою можна знехтувати.

Разом з тим, на рис. 3 видно, що сумарне за опалювальний період споживання енергії на нагрівання інфільтраційного повітря, яке визначене за формулою (8), де враховується імовірнісний характер зміни різниці  $\Delta T$ , є на 3...8 % більшим за цю ж величину, але визначену за спрощеним підходом, як це прийнято на практиці (за формулою (9)).

На основі статистичного опрацювання бази метеорологічних даних для умов Рівненського регіону за 27 років (1970 – 1997 рр.) був зроблений аналіз відхилень значень сумарного за опалювальний період споживання енергії  $Q_{inf}^{calc}$  на нагрівання інфільтраційного повітря, визначеного з урахуванням мінливості метеорологічних факторів (різниці температур внутрішнього і зовнішнього повітря та швидкості вітру) від значень цього ж споживання енергії  $Q_{inf.simple}^{calc}$ , але визначеного без урахування мінливості метеорологічних факторів як це

прийнято на практиці (див. (1) та (8)). Результати досліджень наведені на рис. 4 при значенні показника  $n_{inf} = 0,67$ , що найчастіше має місце на практиці [2, 5, 6]. З рис. 4 бачимо, що відхилення  $\Delta$  в різні роки змінюється від 6 до 12 %. Осереднене в багаторічному перерізі значення відхилення становить 8,6 %. При цьому, значення  $Q_{inf}^{calc}$  є вищими за значення  $Q_{inf}^{calc \cdot simple}$  (рис. 5).

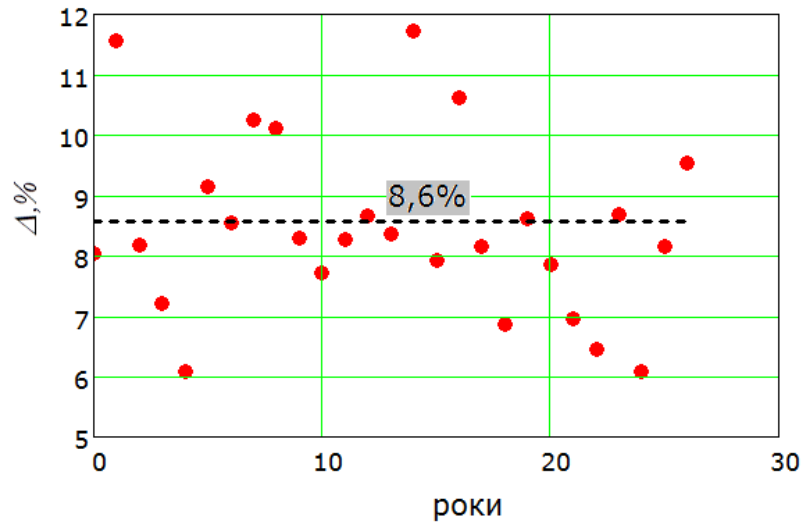


Рисунок 4 – Відхилення з визначення витрати енергії на нагрівання інфільтраційного повітря за опалювальний впродовж 27 років, обчислені з урахуванням та без урахування мінливості метеорологічних факторів

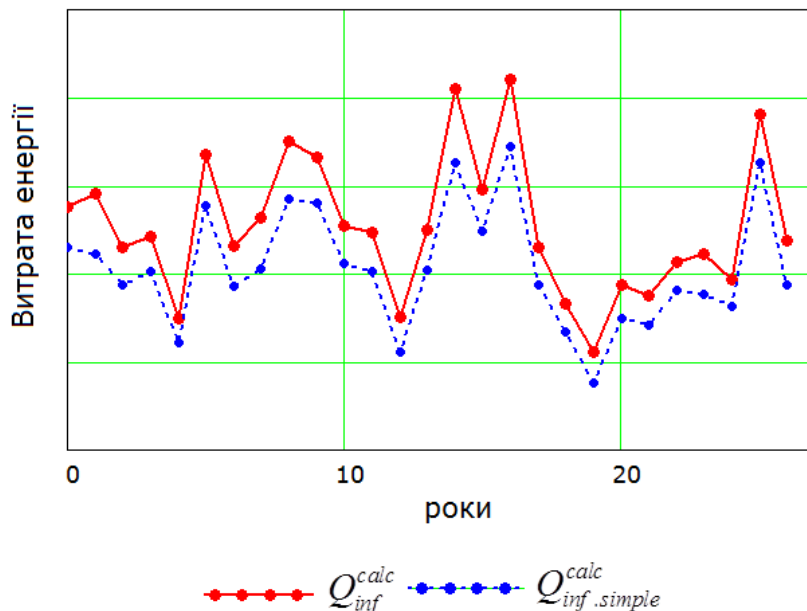


Рисунок 5 – Графіки зміни витрати енергії на нагрівання інфільтраційного повітря за опалювальний період впродовж 27 років обчислені з урахуванням та без урахування змінності метеорологічних факторів

Для подальшого аналізу впливу мінливості погодно-кліматичного чинника на значення витрат енергії для нагрівання за опалювальний сезон інфільтраційного повітря у багаторічному перерізі введемо коефіцієнт варіації

$$KV = \frac{\sigma_{Q_{inf}^{calc}}}{Q_{inf.mean}^{calc}}, \quad (11)$$

де  $\sigma_{Q_{inf}^{calc}}$  – коефіцієнт варіації сезонної витрати енергії  $Q_{inf}^{calc}$ ;

$Q_{inf.mean}^{calc}$  – осереднене у багаторічному перерізі значення сезонної витрати енергії для нагріву інфільтраційного повітря.

На рис. 6 показано графік зміни коефіцієнта варіації  $KV$  при різних значеннях показника  $n_{inf}$ . Наведені дані свідчать, що при збільшенні параметра  $n_{inf}$  даний коефіцієнт варіації зростає. Для найбільш типового випадку, при якому  $n_{inf} = 0,67$ , значення  $KV = 0,14$ .

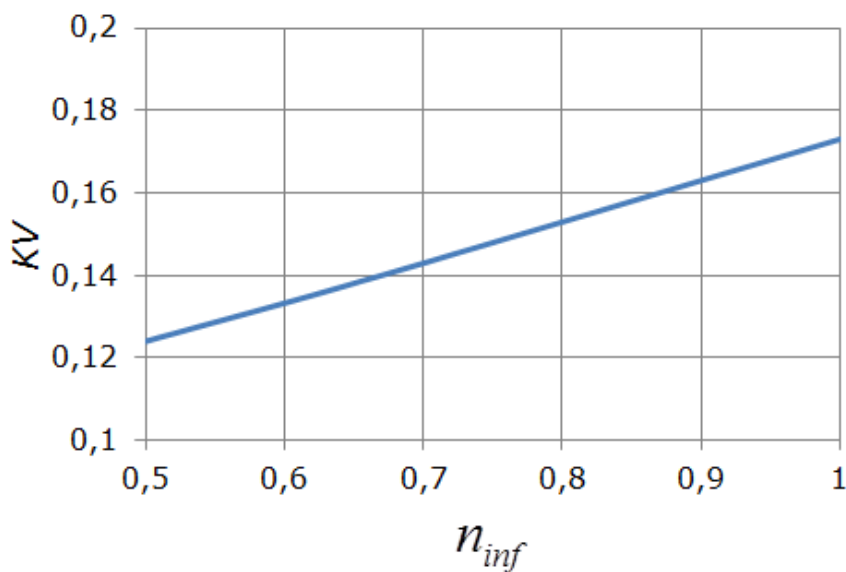


Рисунок 6 – Зміна коефіцієнта варіації витрати енергії  $KV$  на нагрівання інфільтраційного повітря за опалювальний період при різних значеннях показника  $n_{inf}$

Змінність сезонних параметрів вентиляції у багаторічному перерізі доцільно враховувати, зокрема, при техніко-економічному обґрунтуванні рішень щодо створення й модернізації систем вентиляції.

Розглянемо випадок заміни природної вентиляції механічною із рекуперацією теплоти витяжного повітря. На відміну від рішення, що полягає у заміні повітропроникних вікон герметичними та найчастіше використовується на практиці і призводить до появи синдрому «хворої» будівлі, дане рішення є одним з найбільш обґрунтованих, хоч і потребує більших капіталовкладень та технічно складніше в реалізації.

Отже, використовуючи базу метеорологічних даних за 27 років для Рівненського регіону, були розраховані можливі грошові потоки при реалізації рішення по заміні природної вентиляції механічною з рекуперацією енергії вентиляційного повітря. Результати розрахунків наведені на рис. 7. свідчать, що внаслідок впливу мінливості у багаторічному перерізі погоднокліматичного чинника (температури та швидкості зовнішнього повітря) графіки грошових потоків мають певний розкид. Тому з'являється певна невизначеність при розрахунку економічних показників (дисконтований термін окупності, чистий дисконтований дохід тощо). Наприклад, як показано на рис. 7, при заданих капіталовкладеннях у відповідні рішення (горизонтальна лінія) термін їх окупності змінюється від чотирьох до семи років.

На рис. 7, для порівняння, показано графік грошового потоку, розрахований за

існуючим підходом з використанням розрахункових метеорологічних параметрів, без урахування мінливості метеорологічних факторів. Видно, що графік грошового потоку при спрощеному підході знаходиться нижче за графіки грошових потоків, визначених з урахуванням мінливості погодно-кліматичного фактора. При цьому, і відповідні економічні показники також будуть іншими. Наприклад, як видно з рис. 7, при спрощеному підході термін окупності є до трьох років завищеним. При вищих капіталовкладеннях різниця між термінами окупності буде ще більшою.

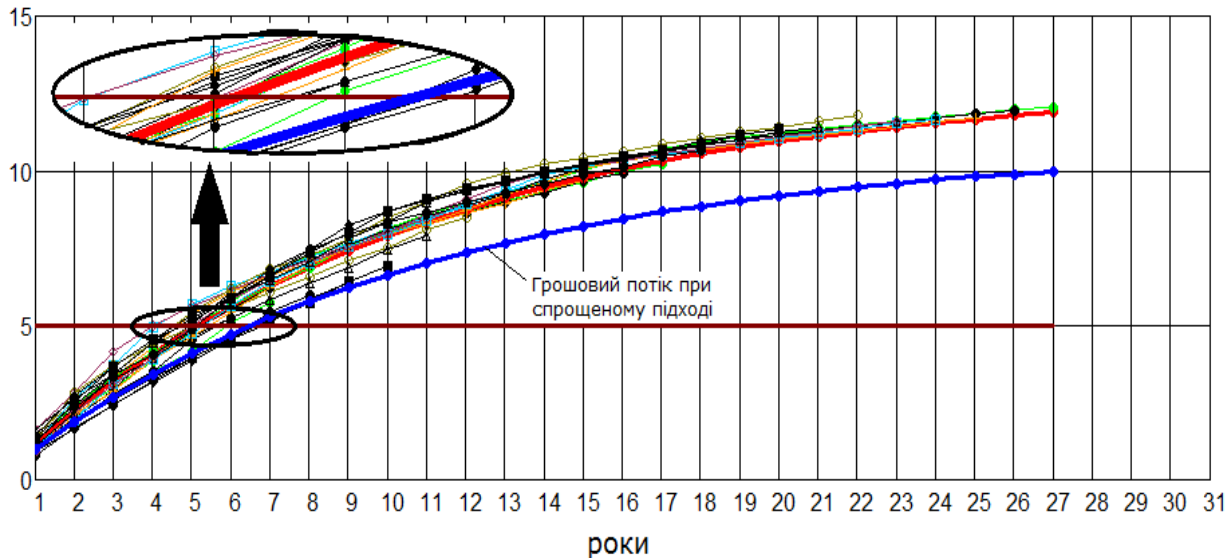


Рисунок 7 – Графіки можливих грошових потоків при заміні природної вентиляції механічною з рекуператором теплоти витяжного повітря з урахуванням впливу імовірнісного характеру погодно-кліматичного фактора на параметри природної вентиляції будівлі, ефективність рекуперації -  $\eta=0,5$

### Висновки

- В роботі теоретично обґрунтована необхідність урахування імовірнісного характеру впливу погодно-кліматичного чинника на параметри природної вентиляції будинку.
- На прикладі метеорологічних даних для умов Рівненського регіону розрахунковим шляхом підтверджено, що у випадку природної вентиляції, при визначенні витрат енергії на нагрів вентиляційного повітря за опалювальний період, використання середньостатистичних значень метеорологічних параметрів є недостатньо обґрунтованим і призводить до заниження даної частини енергоспоживання від 6 до 12%.
- Врахування впливу випадкового характеру змін температури та швидкості зовнішнього повітря показує, що для умов Рівненського регіону, у випадку заміни природної вентиляції механічною, термін окупності даного енергозберігаючого заходу має певну невизначеність і коливається в межах  $\pm 2$  роки і більше. Крім того, грошовий потік, визначений на основі середніх за опалювальний період значень температури та швидкості зовнішнього повітря є заниженим. Це призводить до завищення можливого терміну окупності та неточності з визначення інших показників економічної доцільності (чистий дисконтований дохід, індекс дохідності тощо). Наприклад, якщо ефективність рекуперації складає 50%, то термін окупності встановлення механічної вентиляції із рекуператором теплоти з урахуванням впливу випадкового характеру змін метеорологічних чинників є на 3 і більше років роки меншим ніж без урахування.
- Наведені матеріали свідчать про необхідність подальшого уточнення методів з обґрунтування параметрів природної вентиляції будинку, оскільки при цьому однією з обов'язкових умов є врахування імовірнісного характеру зміни визначальних метеорологічних факторів на території розміщення об'єкта.



**Використана література**

1. Redlich, C. A. Sick-building syndrome [Text] / C. A. Redlich, J. Sparer, M. R. Cullen // The Lancet. – 1997. – № 349. – P. 1013-1016.
2. ASHRAE (2013). ASHRAE Handbook of Fundamentals 2013, Chapter 16 “Ventilation and Infiltration”, pp. 16.23-16.25.
3. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції: ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. – [Чинний від 01.07.2008]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 44 с. – (Державний стандарт України).
4. Шовкалюк М. М. Вплив температурно-погодних та експлуатаційних факторів на рівень ефективності теплопостачання: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.01 «енергетичні системи та комплекси» / Марина Михайлівна Шовкалюк. – Київ, 2011. – 20 с.
5. Walker, I. S. Evaluating models for superposition of wind and stack effects in air infiltration [Text] / I. S. Walker, D. J. Wilson // Building and Environment. – 1993. – Vol. 28, No. 2, P. 201 – 210.
6. Sherman, M. H. Superposition in infiltration modeling [Text] / M. H. Sherman // Indoor Air. – 1992. – Vol. 2, № 2. – P. 101–114.

**Волощук Володимир Анатолійович** – к.т.н., доцент, докторант кафедри атомних електричних станцій та інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

**Рокочинський Анатолій Миколайович** – д.т.н., професор, зав. кафедри природооблаштування та гідромеліорації, Національний університет водного господарства та природокористування.

**Волощук Владимир Анатольевич** – к.т.н., доцент, докторант кафедры атомных электрических станций и инженерной теплофизики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».

**Рокочинский Анатолий Николаевич** – д.т.н., профессор, зав. кафедры природообустройства и гидромелиорации, Национальный университет водного хозяйства и природопользования.

**Voloshchuk Vladimir** – Ph.D., associate professor, doctoral student in nuclear power plants and engineering thermal physics, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute".

**Rokochinsky Anatoliy** – Professor, Head. the department of environmental and reclamation, National University of Water Management and Natural Resources.