

## КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОВІТРООБМІНУ

*Київський національний університет будівництва та архітектури, Україна*

**Постановка проблеми.** Питання оцінки енергоефективності будівель набуває все більшого значення. Найважливішим при цьому є врахування усіх факторів, здатних вплинути на кінцевий результат. Серед них найважливіші наступні: кліматичні особливості регіону та орієнтація будівлі, характеристики внутрішнього мікроклімату, теплотехнічні характеристики конструкцій, системи освітлення, опалення, гарячого водопостачання і особливо вентиляції і кондиціонування повітря (СВ і СКП), так як вони споживають електричну і теплову енергію, водопровідну воду та холод. На деяких об'єктах експлуатаційні витрати на системи формування мікроклімату можуть досягати 60% від загальних витрат. Тому питання оцінки ефективності СВ і СКП є першочерговим для складання загальної енергоефективності будівлі. Сучасні підходи до оцінки ефективності СВ і СКП в країнах Європи, Америці та на пострадянському просторі значно відрізняються, що потребує аналізу та розуміння переваг і недоліків кожного з них.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробкою сучасного європейського підходу до оцінки енергоефективності протягом останніх років займається Технічний комітет CEN/TC156 «Вентиляція будівель» Європейського комітету з розробки нормативної документації CEN (Comite Europeen de Normalisation) [1...4]. Американський підхід до оцінки систем вентиляції розроблено Американською спільнотою інженерів з тепlopостачання, охолодження та кондиціонування повітря ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [5]. Сучасний підхід до оцінки ефективності підсистем організації повітрообміну і повітророзподілення для країн пострадянського простору було розроблено ще за часів Радянського Союзу А.А. Римкевичем [6], Т.А. Верховою [7] та Г.М. Позіним [8], тому зараз він потребує перегляду та адаптації під сучасні тенденції енергозбереження.

**Постановка задачі.** В даній статті проведено порівняльний аналіз сучасних критеріїв оцінки енергоефективності систем СВ та СКП, що застосовуються в європейському, американському та пострадянському підходах з метою визначення переваг і недоліків кожного з них та розробки сучасного комплексного критерію, що буде враховувати всі впливаючі на ефективність фактори.

**Основна частина.** Енергоефективність систем СВ та СКП в значній мірі визначається організацією повітрообміну, яка в свою чергу залежить від типу і

розташування джерел забруднення, конструктивних особливостей самого приміщення і в першу чергу – від системи повітророзподілення. В усіх трьох підходах вважається, що ефективність системи визначається в першу чергу ефективністю системи повітророзподілення.

Європейський та американський підходи багато в чому схожі. Критерієм оцінки енергоефективності систем СВ та СКП в них слугує *ефективність вентиляції*  $\varepsilon_v$ :

$$\varepsilon_v = C_e / C_b, \quad (1)$$

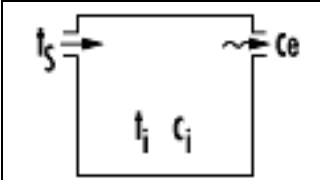
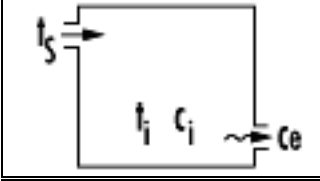

де  $C_e$  – концентрація вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  у витяжному повітрі;

$C_b$  – концентрація вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  у повітрі нарівні дихання відвідувачів.

В залежності від схем повітророзподілення та різниці температур між повітрям припливним  $t_s$  та в зоні обслуговування  $t_i$  значення коефіцієнта  $\varepsilon_v$  може бути більше, менше або дорівнювати одиниці (Табл. 1.).

Таблиця 1

Залежність коефіцієнта  $\varepsilon_v$  від схеми повітророзподілення та різниці температур

Схема повітророзподілення		Різниця температур ( $t_s - t_i$ ), °C	Ефективність вентиляції $\varepsilon_v$
Вентиляція змішуванням		<0 0 – 2 2 – 5 >5	0,9 – 1,0 0,9 0,8 0,4 – 0,7
Вентиляція змішуванням		<-5 0 – 5 >0	0,9 0,9 – 1,0 1,0
Вентиляція витісненням		<2 0 – 2 >0	0,2 – 0,7 0,7 – 0,9 1,2 – 1,4

Від величини критерію  $\varepsilon_v$  залежить найменша загальна кількість повітря, необхідна для комфортного самопочуття людей:

$$V = V_{bz} / \varepsilon_v, \quad (2)$$

де  $V_{bz}$  – приплив повітря в зоні дихання;

$\varepsilon_v$  – ефективність вентиляції.

Розрахункова витрата зовнішнього повітря з врахуванням критерію  $\varepsilon_v$ , необхідна для дихання людей в приміщенні або в його зонах, у європейському та американському підходах визначається за формулою:

$$V_{bz} = R_p P_z + R_a A_z, \quad (3)$$

де  $A_z$  – площа приміщення;

$P_z$  – кількість людей на одиницю площі;

$R_p$  – необхідна витрата зовнішнього повітря на людину;

$R_a$  – необхідна витрата зовнішнього повітря на одиницю площі приміщення.

Як мінімум, вентиляція повинна бути достатньою для асиміляції біологічних виділень від людей (людський компонент  $R_p$ ). На даному етапі виникають протилежності між європейським та американським підходами (Табл. 2.). В таблиці наведено порівняння нормованих рівнів вентиляції за підходами CEN та ASHRAE.

Таблиця 2

Порівняння розрахункових витрат повітря CEN та ASHRAE

Тип приміщення	Кількість людей на одиницю площі, люд./м <sup>2</sup>	Категорія CEN	Мінімальна інтенсивність вентиляції для користувачів, м <sup>3</sup> /год на люд.		Додаткова вентиляція для будівлі, м <sup>3</sup> /год*м <sup>2</sup>			Всього, м <sup>3</sup> /год*м <sup>2</sup>		
			ASHRAE $R_p$	CEN	CEN дуже низьке забруднення	CEN низьке забруднення	CEN не низьке забруднення	ASHRAE $R_a$	CEN низьке забруднення	ASHRAE
Одиночний офіс (модульний офіс)	0,1	I	9	36	36	3,6	7,2	1,08	7,2	1,98
		II		25,2	25,2	2,52	5,04		5,04	
		III		14,4	14,4	1,44	2,88		2,88	
Конференц-зала	0,5	I	8,1	36	36	3,6	7,2	1,08	21,6	5,58
		II		25,2	25,2	2,52	5,04		15,12	
		III		14,4	14,4	1,44	2,88		8,64	

Європейські норми розрізняють три категорії якості внутрішнього повітря, які відрізняються прогнозованим відсотком людей, що невдоволені якістю повітря. Для кожної категорії розраховані власні рівні параметрів  $R_p$  та  $R_a$ , які достатні для людей, що тільки зайшли в приміщення. Дане припущення не завжди є доцільним, адже існують приміщення, в яких всі присутні перебувають значну кількість часу. Тому розрахунок витрати повітря для людей, що тільки зайшли в приміщення, є необґрунтованим.

Американський підхід оснований на прийнятній для користувачів якості повітря: припускається, що люди звикають до якості повітря протягом, як мінімум, 15 хвилин. Тому розрахункова кількість повітря в порівнянні з нормами EN 15251 буде нижчою (наприклад, для категорії II буде достатньо лише 9 м<sup>3</sup>/год. замість 25,2 м<sup>3</sup>/год.). ASHRAE визначає рівні, які відповідають мінімальним нормативним вимогам, тому спостерігаються значні розбіжності з вимогами CEN.

Методика визначення критерію  $\varepsilon_v$  в європейському та американському підходах є доволі спрощеною та не дозволяє оцінити ефективність систем СВ

та СКП з достатньою точністю. В ній приймається припущення, що інтенсивність виділення шкідливостей є рівномірною по всій площі приміщення, а перемішування припливного повітря з внутрішнім повітрям в приміщенні відбувається на 100%. В реальному житті це майже неможливо. Крім того в залежності від призначення приміщень та процесів, що протікають в ньому, диктуючим параметром, що впливає на відчуття комфорту, може бути не рівень CO<sub>2</sub>, а температура або відносна вологість повітря.

Підхід до оцінки ефективності систем СВ та СКП, що найбільш розповсюджений на пострадянському просторі, був оснований на коефіцієнті повітрообміну  $K_l$ , запропонованому Г.М. Позіним [8].

Коефіцієнт повітрообміну  $K_l$  являє собою безрозмірний симплекс, що пов'язує температури повітря – витяжного  $t_l$ , припливного  $t_{in}$  та робочої зони  $t_{wz}$ :

$$K_l = \frac{t_l - t_{in}}{t_{wz} - t_{in}} = \frac{\Delta t_l}{\Delta t_{wz}} \quad (4)$$

Чим більший коефіцієнт  $K_l$  – тим ефективніше організовано повітрообмін в приміщенні. Співвідношення для знаходження кількості припливного повітря з врахуванням коефіцієнта повітрообміну має вигляд:

$$L_{in} = L_{wz} + \frac{Q - c \cdot L_{wz} \cdot \Delta t_{wz}}{c \cdot K_l \cdot \Delta t_{wz}} = L_{wz} + \frac{\bar{Q} - L_{wz}}{K_l}, \quad (5)$$

де  $\bar{Q} = \frac{Q}{c \cdot \Delta t_{wz}}$  - відношення надлишків повної до надлишків явної теплоти.

Значення коефіцієнта  $K_l$  безпосередньо впливає на витрати тепла та холоду в системах СВ та СКП. Так для приміщень, що обслуговуються системами з рециркуляцією повітря, в яких мають місце тепловиділення, при нагріві припливного повітря відношення витрат теплоти при  $K_l \neq 1$  ( $Q'_T$ ) до витрат теплоти при  $K_l = 1$  ( $Q_T$ ) визначається за виразом [8]:

$$\frac{Q'_T}{Q_T} = 1 + \frac{\frac{G_H^{\min}}{G_0} Q_{надл} \left(1 - \frac{1}{K_l}\right)}{Q_T}, \quad (6)$$

де  $G_H^{\min}$  - мінімально необхідна витрата зовнішнього повітря за санітарними нормами або за умов компенсації витяжної вентиляції;  $Q_{надл}$  - теплонадлишки в приміщенні;  $G_0$  - витрата повітря, що подається в приміщення.

Витрата холоду в залежності від коефіцієнта повітрообміну  $K_l$  має вигляд [8]:

$$\frac{Q'_X}{Q_X} = 1 + \frac{\frac{G_{HexT}^{\min}}{G_0} Q_{надл} \left(\frac{1}{K_l} - 1\right)}{Q_X}, \quad (7)$$

де  $Q'_X$  - витрата холоду при  $K_l \neq 1$ ;  $Q_X$  - витрата холоду при  $K_l = 1$ .

Визначити значення коефіцієнта  $K_l$  можливо як теоретично, так і експериментально. Для теоретичного способу визначення коефіцієнта  $K_l$  застосовують наближені математичні моделі, що складаються з систем рівнянь збереження енергії, витрати та тиску. Розробка математичної моделі включає в себе чотири етапи:

- 1) виявлення розрахункової моделі теплообміну;
- 2) складання системи рівнянь збереження тепла і маси;
- 3) приведення системи балансових рівнянь до розрахункового вигляду;
- 4) постановка конкретної задачі та рішення системи рівнянь.

В розрахунковій схемі з необхідним ступенем деталізації виявляються всі характерні об'єми та поверхні теплообміну, враховуються потоки теплоти та маси, взаємодія яких формує мікроклімат в приміщенні (Рис.1.). Для всіх характерних об'ємів та поверхонь у відповідності до розрахункової схеми складаються рівняння збереження тепла та маси. Сукупність співвідношень тепло-повітряних балансів утворює систему рівнянь, що являє собою математичну модель тепло-повітряних процесів у вентильованому приміщенні. В результаті вирішення даної системи знаходяться шукані значення потоків тепла, маси та значення коефіцієнта повітрообміну  $K_l$ .

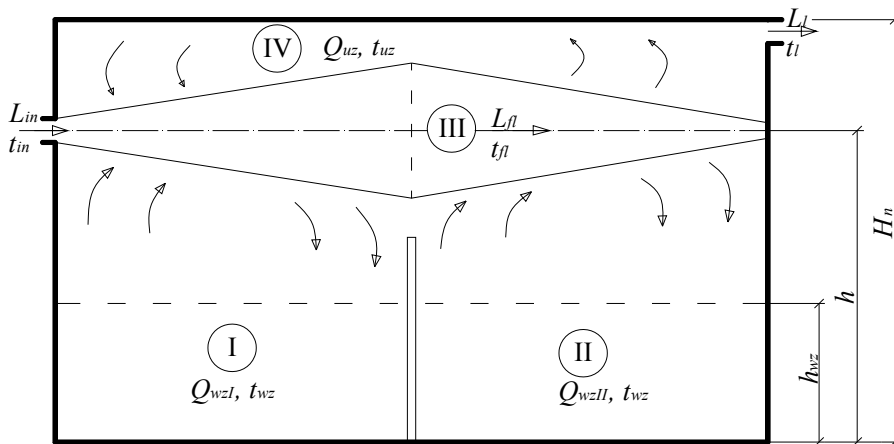


Рис.1. Розрахункова схема для визначення коефіцієнта ефективності повітрообміну  $K_l$  для схеми повітророзподілення зосередженими горизонтальними струминами

В разі, якщо система балансових рівнянь є доволі складною, застосовують номограми, графіки, таблиці та ЕОМ.

Коефіцієнт  $K_l$  дозволяє розрахувати ефективність навіть дуже складних схем повітророзподілення, враховуючи велику кількість граничних умов [9...10].

Методика розрахунку коефіцієнта  $K_l$  в порівнянні з критерієм  $\varepsilon_v$  є значно прорахованішою і дозволяє врахувати якомога більше параметрів, що впливають на переміщення повітряних мас всередині приміщення. Але він не враховує інтенсивність асиміляції  $\text{CO}_2$  та інших шкідливостей.

**Висновки.** Загальна енергоефективність систем СВ та СКП насамперед залежить від ефективності організації повітрообміну та повітророзподілення в обслуговуваних приміщеннях. Аналіз існуючих підходів до оцінки

ефективності на основі критеріїв  $\varepsilon_v$  та  $K_l$  засвічує низку недоліків, які не дозволяють отримати дані з необхідною достовірністю. Сучасний європейський та американський підходи загалом є прогресивними та відповідають новітнім тенденціям до енергозбереження, але методика розрахунку критерію оцінки  $\varepsilon_v$  є дуже спрощеною, що нівелює всі переваги. Коефіцієнт  $K_l$  враховує всі можливі фактори, що впливають на ефективність повітрообміну в приміщенні, але не враховує асимілюючу здатність повітря на розбавлення  $\text{CO}_2$  та інших шкідливостей.

Дані недоліки призводять до необхідності розробки нового комплексного критерію оцінки енергоефективності систем СВ та СКП, який відповідав би сучасним світовим тенденціям в сфері енергозбереження та враховував взаємозв'язок між схемою повітророзподілення, розташуванням джерел шкідливостей, конструктивних особливостей приміщення, тепло-повітряних процесів та асиміляції  $\text{CO}_2$  від присутніх в приміщенні людей.

## Література

1. *EN ISO 13790*. Energy performance of buildings. Calculation of energy use for space heating and cooling.
2. *EN 15251*. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings. addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
3. *EN 15241*. Ventilation for buildings. Calculation methods for energy losses due to ventilation and infiltration in buildings (includes Corrigendum AC:2011).
4. *EN 15242*. Ventilation for buildings. Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration.
5. *ASHRAE 62.1...62.7*. Ventilation for acceptable indoor air quality, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2007.
6. *Римкевич А.А.* Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха./Изд.1-е. М.: Стройиздат, 1990г. - 300 с. Изд 2-е, доп. И испр. АВОК – С.-З., 2003г. - 271 с.
7. *Верхова Т.А.* Исследование методов комплексной оценки конструируемых способов воздухораспределения для помещений небольшой высоты./Автореферат кандидатской диссертации. Л.: ЛТИХП, 1980г. – 23с.
8. *Позин Г. М.* Принципы разработки приближенной математической модели тепловоздушных процессов в вентилируемых помещениях – Известия вузов. Строительство и архитектура. 1980, № 11. – с. 122-127.
9. *Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О.* Ефективність організації повітрообміну в тепло напружених приміщеннях у стиснутих умовах, Будівництво України: Науково-виробничий журнал №3, 2007г. – с. 36-39.
10. *Довгалюк В.Б., Рудзинський В.О., Наконечний В.І.* Підвищення ефективності повітрообміну за допомогою напрямляючих щитів у приміщеннях зі змінними об'ємно-планувальними рішеннями. Міжвідомчий науково-

технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка»/Випуск №89. – К.: КНУБА, 2012р. – с. 166-172.

#### **Аннотация**

Проведен сравнительный анализ существующих подходов к оценке энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования воздуха, принятых в странах Европы, Америке и на постсоветском пространстве. Определены преимущества и недостатки каждого из подходов. Приведены рекомендации для разработки нового комплексного критерия оценки энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

#### **Annotation**

A comparative analysis of existing approaches to the evaluation of energy efficiency of ventilation and air-conditioning systems used in Europe, USA and the former Soviet Union. Identification the advantages and disadvantages of each approach. The recommendations for the development of a new comprehensive evaluation criteria of energy efficiency of ventilation and air-conditioning systems.