

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.406-421

УДК 697.91; 622.7; 620.133

к.т.н., доцент **Човнюк Ю.В.**,  
yuchovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203,

доцент **Чередніченко П.П.**,  
petro\_che@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7161-661X,

к.т.н., доцент **Москвітіна А.С.**,  
moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646,

к.т.н., доцент **Васильєва Г.Ю.**,  
anvas677@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0557-6925,

Київський національний університет будівництва і архітектури

## **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ СПОРТИВНОГО ЗАЛУ З ВРАХУВАННЯМ ПОКАЗНИКІВ КОМФОРТУ І ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ РОБІТІ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЗА ПОТРЕБОЮ І ЗЕЛЕНОЇ СТІНИ**

*Метою дослідження є розробка та обґрунтування фізико-математичної моделі енергоефективного управління мікрокліматом фітнес-залу, яка враховує параметри комфортності та якості повітря. Це спрямовано на подальше дослідження, вдосконалення та впровадження багатопараметричних систем автоматичного керування ключовими показниками мікроклімату, такими як вологість, температура та швидкість руху повітряних мас. У роботі розглянуто сучасні вимоги до газового складу повітря в залах для занять спортом, а також методи оцінки його безпечності, які необхідно враховувати під час проектування цих приміщень для забезпечення належного функціонування і експлуатації. Запропонований альтернативний підхід до моделювання комфортності приміщення передбачає врахування якості повітря. Оцінювання якості повітря для спортивних приміщень зазвичай базується на двох підходах: 1) порівняння концентрацій забруднювальних речовин із гранично допустимими нормами; 2) використання індексів якості повітря. У роботі наведено рівняння, їх аналітичні розв'язки та чисельні розрахунки, які описують динаміку абсолютної вологості повітря у приміщенні, взаємозв'язок між абсолютною і відносною вологістю, баланс маси повітря фітнес-залу, а також зміни температури й тиску в ньому. Виведено рівняння енергетичного балансу приміщення, яке було розв'язане аналітично. Отримані рішення дають змогу оптимізувати енергоефективність управління мікрокліматом під час експлуатації залу. Всі розглянуті в роботі залежності, диференціальні рівняння, їх чисельні та аналітичні розв'язки і складають математичну модель мікроклімату*

приміщення для занять спортивною діяльністю, яка дозволяє експлуатувати дане приміщення у енергоефективному режимі з урахуванням динамічних змін надходження шкідливостей в приміщення, управління системою вентиляції та кондиціонування повітря за потребою в даний момент, тобто змінювати витрату повітря відповідно потреб. А також дозволяє інтегрувати кімнатні рослини (живу стіну) в сучасні системи забезпечення мікроклімату приміщення.

*Ключові слова:* якість внутрішнього повітря, клімат контроль, система живої стіни, зелена стіна, біофільтрація, енергоефективність, вентиляція, кондиціонування повітря, зелене будівництво; забрудненість приміщень викидами CO<sub>2</sub>; інтелектуальні системи управління мікрокліматом.

**Постановка проблеми.** Екологічна безпека приміщень для занять спортивною діяльністю має безпосередній вплив на безпеку здоров'я та життя людей, які у них знаходяться. У цих приміщеннях має місце акумуляція шкідливих речовин в повітрі, зокрема, у фітнес-залах. Велика кількість спортивних, оздоровчих та тренувальних баз знаходиться в сільській місцевості, далеко від міст. І людина може знаходитись у вказаних приміщеннях тривалий час без перерв під впливом саме забруднювачів повітря.

Наразі для вирішення актуальних проблем соціальної безпеки людей, які займаються спортом (і, зокрема, у сільській місцевості) потребують наукового дослідження наступні проблемні завдання:

- 1) підтримання безпечного середовища для проведення тренувальних або спортивних занять у закритих спортивних спорудах;
- 2) впровадження методик оцінювання безпечності середовища для проведення фізкультурно-оздоровчих занять та тренувань з різних видів спорту;
- 3) впровадження новітніх, інноваційних технологій тестування мікроклімату закритих спортивних споруд за екологічними параметрами, які до того ж дозволяють забезпечити енергоефективні режими їх функціонування.

Існує два підходи для оцінки якості повітря закритих спортивних споруд: порівняння концентрацій забруднювачів з максимально допустимими концентраціями; застосування індексів якості повітря.

При застосування першого підходу для оцінки ступеню забрудненості закритої спортивної споруди (точніше, повітря в споруді) зазвичай використовують гранично допустимі концентрації (ГДК), які встановлені на міжнародному, державному та галузевому рівнях. Гранично допустимі концентрації можуть бути обов'язковими та рекомендованими, застосовуватись виключно до зовнішнього середовища (відкриті спортивні майданчики чи арени) або для повітря у закритих спортивних спорудах (спортивні або тренувальні зали,

тощо). Зокрема, до мікроклімату спортивних споруд закритого типу встановлені обмеження по температурі, вологості та швидкості руху повітря. Для систем вентиляції відсутні норми повітрообміну повітря та обмеження щодо рециркуляції для забезпечення концентрації вуглекислого газу в повітря (CO<sub>2</sub>) не вище гранично допустимої. Всі люди, які займаються оздоровлювано-лікувальною, тренувальною, спортивно-змагальною діяльністю у закритих спорудах так чи інакше знаходяться під впливом хімічних, фізичних та алергенних факторів. Хімічні фактори діють як безпосередньо при контакті з речовиною, зі спортивними знаряддями, тренажерами тощо, так і через вдихання шкідливих газів, летючих сполук, твердих частинок. Найбільшу небезпеку становить забруднення повітря закритих спортивних споруд, оскільки люди, які у них знаходяться.

**Аналіз публікацій по темі досліджень.** Багато країн встановили гранично допустимі концентрації шкідливостей у повітрі на державному рівні: Австралія [1], США [2-3], Німеччина [4], Індія [5], Республіка Корея [6], Канада [7] та інші. Всесвітня організація охорони здоров'я встановила орієнтовні ГДК для непромислового зовнішнього середовища та повітря приміщень [8]. Рекомендовані ГДК та тривалість перебування у концентрованому середовищі розроблені Національним інститутом безпеки та охорони здоров'я [9,10]. Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (ASHRAE) запропонувало рекомендовані ГДК непромислових середовищ [11].

**Мета роботи.** Обґрунтувати математичну модель мікроклімату приміщення (фітнес-зали) закритої спортивної споруди, як багатозв'язної системи, яка дозволяє синтезувати багатопараметричні системи автоматичного керування комфортом та якістю повітря й досліджувати їх ефективність.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Безпечність повітря може бути оцінена за допомогою Індексу Якості Повітря (AQI). Наразі, AQI використовується у Англії, Республіці Корея, Європейському Союзі, Мексиці, Сінгапурі, Індії, Канаді, Китаї, Гонконгу та США. У більшості згаданих вище країн регіональні агенції та філії зобов'язані щоденно звітувати AQI, що і дозволяє оцінювати динаміку забруднення повітря на державному рівні та вживати відповідних заходів для зменшення забруднення.

Зазвичай AQI розраховують за деякою шкалою, котра вказує на рівень забрудненості від низького до високого, або на рівень придатності для дихання від придатного до небезпечного. Використовують шкали індексів від 0 до 10, від 0 до 100 та від 0 до 500, де менші значення відповідають чистішому та безпечнішому повітрю, а більші – вищій концентрації забруднювачів.

Більшість країн використовують концентрації озону, діоксиду сірки, оксиду вуглецю, твердих частинок різних фракцій та діоксиди азоту для визначення AQI. Для кожного зі вказаних забруднювачів розраховують відповідний частковий індекс  $AQI_i$  шляхом співвідношення короткострокового середнього значення його концентрації, найчастіше восьми або двадцяти годинного, з відповідною ГДК. AQI приймають рівним значенню найбільшого з часткових індексів забруднювачів.

$$AQI = \text{MAX} (AQI_i) \quad (1)$$

Американською агенцією з захисту навколишнього середовища (US EPA) [12] встановлена наступна шкала AQI:

Таблиця 1

Шкала AQI EPA

Індекс якості повітря	Пояснення	Кольоровий код
0...50	Добре (безпечне) повітря *	Зелений
51...100	Повітря середньої якості	Жовтий
101...150	Повітря нездорове для чутливих груп	Помаранчевий
151...200	Нездорове повітря	Червоний
201...300	Дуже нездорове повітря	Фіолетовий
301...500	Небезпечне повітря	Бордовий

Примітка: \*враховується у AQI концентрація вуглекислого газу ( $CO_2$ ) – ГДК та короткострокове середнє значення.

Для розрахунку часткових індексів по кожному із забруднювачів використовують формулу:

$$AQI_i = \frac{I_j - I_{j-1}}{C_{ji} - C_{(j-1)i}} \cdot (C_i - C_{(j-1)i}) + I_{j-1} \quad (2)$$

де  $AQI_i$  - частковий індекс  $i$ -го забруднювача;  $C_i$  – концентрація  $i$ -го забруднювача,  $mg/m^3$ ;  $C_{ji}$  - верхня границя інтервалу концентрацій, у який попадає  $C_i$ ;  $C_{(j-1)i}$  - нижня границя інтервалу концентрацій, у який потрапляє  $C_i$ ;  $I_{j-1}$  – значення AQI, що відповідає  $C_{ji}$ ;  $I_j$  – значення AQI, що відповідає  $C_{(j-1)i}$ .

Залежності часткових індексів якості повітря від конценрацій забруднювачів є, по суті, неперервними кусково-лінійними функціями і можуть бути представлені у вигляді [13-14]:

$$AQI_i = a_i \cdot C_i + b_i + \sum_{j=1}^n W_{ji} [C_i - C_{(j-1)i}], \quad (3)$$

де  $b_i \equiv I_{j-1}$ , тобто AQI при  $C_{ji}$ ,  $W_{ji} = (k_{ji} - k_{(j-1)i})/2$ ,  $k_{ji} = (I_j - I_{j-1}) / (C_{ji} - C_{(j-1)i})$ ,  $a_i = (k_{i0} - k_{in})/2$ , при чому  $k_{ji}$  – кут нахилу сегменту  $j$  кусково-лінійної функції  $i$ -го забруднювача,  $\text{m}^3/\text{mg}$ .

Динаміка концентрації забруднювачів у повітрі приміщення закритої спортивної споруди визначається залежністю:

$$\frac{d_{i_{in}}}{dt} \cdot V + C_{i_{in}} \cdot q_{in} = C_{i_{ext}} \cdot q_{ext}, \quad (4)$$

де  $C_{i_{in}}$  – концентрація  $i$ -го забруднювача повітря приміщення,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $V$  – об'єм приміщення,  $\text{m}^3$ ;  $q_{in}$  – об'ємна витрата витяжного повітря,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_{ext}$  – об'ємна витрата припливного повітря,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $C_{i_{ext}}$  – концентрація  $i$ -го забруднювача у припливному повітрі,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $t$  – час,  $\text{s}$ .

Розв'язок рівняння (4) має вид:

$$C_{i_{in}}(t) = C_{i_{in}}^{(0)} \cdot \exp\left\{-\frac{q_{in}}{V} \cdot t\right\} + \frac{C_{i_{ext}} \cdot q_{ext}}{q_{in}}, \quad (5)$$

і зображений на рис. 1.

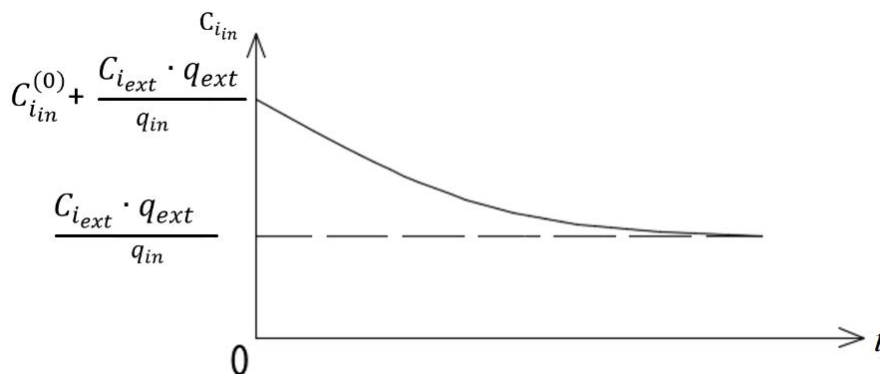


Рис.1. Залежність  $C_{i_{in}}(t)$ .

У виразі (5) введено позначення  $C_{i_{in}}(0) = C_{i_{in}}^{(0)}$ .

Для забезпечення належних умов тренування та відпочинку у закритих спортивних спорудах повітря, окрім безпечності, повинне також відповідати вимогам комфортності. Стандартом ISO 7730 для оцінки комфортності прийнято аналітичну залежність інтегрального показника комфортності PMV від параметрів повітря, метаболізму та вдягненості (у спортивну форму) людини. Згідно зі стандартом, алгоритм розрахунку показника PMV на етапі визначення температури поверхні одягу вимагає чисельного розв'язку рівняння четвертого ступеня (за алгоритмом Феррарі). Але можливий і інший підхід –

використання ітераційного алгоритму. Задля зменшення обчислювальної складності та представлення PMV у вигляді диференційованої функції можна застосувати різні методи апроксимації. Наприклад, перспективним підходом до розрахунку інтегрального показника комфортності є його апроксимація багатовимірним поліномом, для ефективного обчислення якого можна використовувати схему Горнера. Задля оцінки точності апроксимації було проведено обчислювальний експеримент на ПЕОМ із застосуванням методі багатовимірної поліноміальної регресії, який реалізований з використанням мови програмування Python та програмної бібліотеки SKIKIT-LEARN. Результати (таблиця 2) чисельного експерименту показали задовільну точність апроксимації PMV багатовимірними поліномами третього ступеня та вище:

$$\text{PMV}(T, T_r, v_a, \varphi, \text{MET}, \text{CLO}, W) \approx p^n(T, T_r, v_a, \varphi, \text{MET}, \text{CLO}, W), \quad (6)$$

де  $T$  – температура повітря, °C;  $T_r$  – середня радіаційна температура, °C;  $v_a$  – швидкість повітря, м/с;  $\varphi$  – відносна вологість; MET – показник метаболізму, met (1 met=58,2 Вт/м<sup>2</sup>); CLO – показник вдягненості;  $W$  – ефективна зовнішня робота, Вт/м<sup>2</sup>;  $n$  – ступінь поліному ( $n \geq 3$ ).

Динаміка абсолютної вологості повітря приміщення для занять спортом може бути визначена як:

$$\frac{d\alpha}{dt} \cdot V + \alpha \cdot q_{in} = \alpha_{ext} \cdot q_{ext} + \dot{m}_{in}, \quad (7)$$

де  $\alpha$  – абсолютна вологість повітря приміщення, г/м<sup>3</sup>;  $\alpha_{ext}$  – абсолютна вологість припливного повітря, г/м<sup>3</sup>;  $\dot{m}_{in}$  – масова витрата водяної пари від внутрішніх джерел, г/с.

Таблиця 2

Точність апроксимації PMV багатовимірним поліномом

Ступінь поліному ( $n$ )	Середньоквадратичне відхилення ( $\sigma$ )	Коефіцієнт детермінації ( $d$ )
2	0,236	0,9700
3	0,1153	0,9930
4	0,0589	0,9982
5	0,0329	0,9994

Розв'язок рівняння (7) має наступний вид:

$$\alpha(t) = \alpha_0 \cdot \exp\left\{-\frac{q_{in}}{V} \cdot t\right\} + \frac{\alpha_{ext} \cdot q_{ext} + \dot{m}_{in}}{q_{in}}, \quad (8)$$

Залежність  $\alpha(t)$  зображена на рис. 2. У співвідношенні (8) введено позначення  $\alpha(0) = \alpha_0$ .

Залежність між абсолютною вологістю та відносною вологістю отримаємо, використовуючи рівняння стану ідеального газу та варіанту формули Магнуса-Тетенса для визначення тиску насиченої пари, яка була запропонована Болтоном [15]:

$$\varphi = \frac{\alpha \cdot (T + 273,15)}{2,1674 \cdot 6,112 \cdot \exp\left\{\frac{17,67 \cdot T}{T + 243,5}\right\}} \quad (9)$$

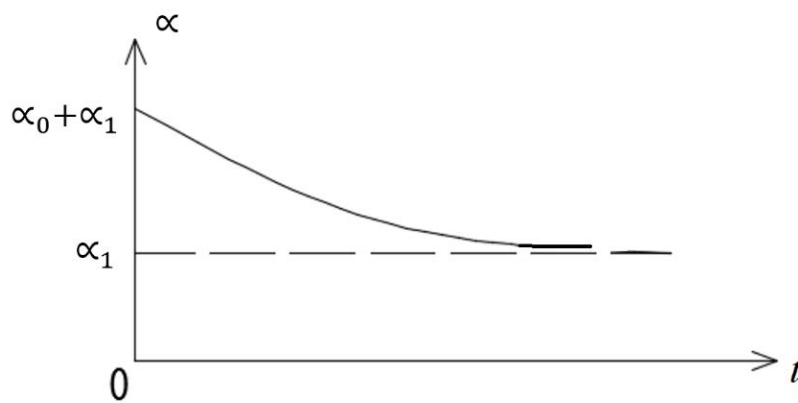


Рис.2. Залежність  $\alpha(t)$ :  $\alpha_1 = \frac{\alpha_{ext} \cdot q_{ext} + m_{in}}{q_{in}}$ .

Залежність масового балансу повітря приміщення, динаміки його температури й тиску має вигляд:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{p} \cdot \frac{dp}{dt} - \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{dt} \right) \cdot \rho \cdot V + 10^{-3} \cdot \frac{R_{da} - R_{wp}}{R} \cdot (\alpha_{ext} \cdot q_{ext} + m_{in} - \alpha \cdot q_{in}) + \\ & + 10^{-3} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{R_{da} - R_i}{R} \cdot (C_{i_{ext}} \cdot q_{ext} - C_i \cdot q_{in}) = \rho_{ext} \cdot q_{ext} - \rho \cdot q_{in} + \\ & + 10^{-3} \cdot m_{in}, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $p$  – тиск повітря приміщення, Па;  $\bar{T}$  – температура повітря приміщення, К;  $\rho$  – густина повітря в приміщенні, кг/м<sup>3</sup>;  $R_{da}$ ,  $R_{wp}$ ,  $R_i$  – індивідуальні газові сталі відповідно сухого повітря, водяної пари та  $i$ -го забруднювача, Дж/(кг·К);  $\rho_{ext}$  – густина припливного повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Формула енергетичного балансу приміщення має вигляд:

$$\rho \cdot C_V \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = u_{ext} \cdot \rho_{ext} \cdot q_{ext} - u \cdot \rho \cdot q_{in} + Q_{in} + Q_0, \quad (11)$$

де  $C_V$  – питома теплоємність повітря фітнес-зали, Дж/(кг·К);  $u$ ,  $u_{ext}$  – відповідно питома внутрішня енергія внутрішнього та припливного повітря, Дж/кг;  $Q_0$  – тепловий потік від огорожень (стеля, підлога, стіни), Дж/с;  $Q_{in}$  – тепловий потік від внутрішніх джерел, Дж/с.

Розв'язок (11) має наступний вид:

$$\bar{T}(t) = \left\{ \frac{u_{ext} \cdot \rho_{ext} \cdot q_{ext} - u \cdot \rho \cdot q_{in} + Q_{in} + Q_0}{\rho \cdot C_V \cdot V} \right\} \cdot t_t \cdot \bar{T}_0. \quad (12)$$

Тобто  $\bar{T}$  є лінійною функцією часу ( $t$ ). У (12) введено позначення  $\bar{T}_0 = \bar{T}(0)$ . Залежність  $\bar{T}(t)$  зображена на рис.3.

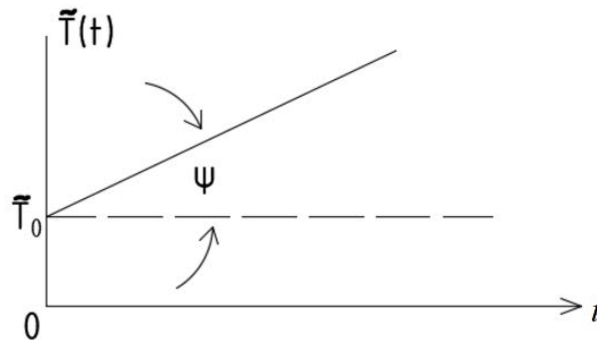


Рис. 3. Залежність  $\bar{T}(t)$ :  $\bar{T}(t) = \bar{k} \cdot t + \bar{T}_0$ ,

$$\bar{k} = \text{tg} \Psi = \frac{u_{ext} \cdot \rho_{ext} \cdot q_{ext} - u \cdot \rho \cdot q_{in} + Q_{in} + Q_0}{\rho \cdot C_V \cdot V}$$

Розглянуті вище залежності (1) - (12) складають математичну модель мікроклімату закритої спортивної споруди, яка дозволяє розглядати його як багатовимірний багатозв'язний ланцюг (рис.4) з п'ятьма вхідними параметрами ( $T_{ext}$ ,  $\varphi_{ext}$ ,  $C_{ext}$ ,  $q_{ext}$ ,  $q_{in}$ ), п'ятьма вихідними параметрами ( $T$ ,  $\varphi$ ,  $C$ , PMV, AQI) та п'ятьма збуреннями ( $Q_0$ , MET, W,  $m_{in}$ , CLO).

У операторній формі багатовимірний багатозв'язний ланцюг такого типу можна подати як матричний добуток:

$$Y(p) = \bar{W}(p) \cdot X(p), \quad (13)$$

$$\bar{W}(p) = \begin{bmatrix} \bar{W}_{11}(p) & \bar{W}_{12}(p) & \dots & \bar{W}_{1n}(p) \\ \bar{W}_{21}(p) & \bar{W}_{22}(p) & \dots & \bar{W}_{2n}(p) \\ \bar{W}_{m1}(p) & \bar{W}_{m2}(p) & \dots & \bar{W}_{mn}(p) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

де  $Y(p)$  – вектор вихідних параметрів;  $X(p)$  – вектор вхідних параметрів;  $\bar{W}(p)$  – матриця передаточних функцій.

На рис. 4 зображена структурна схема приміщення (фітнес-зали) як багатовимірного багатозв'язного ланцюга і введені наступні позначення:  $T_{ext}$ ,  $\varphi_{ext}$  - відповідно температура, відносна вологість.

Слід зазначити, що для ефективного та енергоощадного режиму функціонування приміщення необхідно використати розгалужену у закритій спортивній споруді систему датчиків (вологості, тиску, температури,  $CO_2$  та швидкості руху повітря), які забезпечують моніторинг та регулювання параметрів, які визначають оптимальні значення останніх і підтримують у фітнес-залі комфортні умови для проведення тренувальних занять, якісний склад повітря та необхідний мікроклімат [16-17]. Також, ці датчики повинні бути пов'язані з роботою системи вентиляції та місцевим охолодженням або системою кондиціонування повітря, щоб вони працювала в динамічному режимі, у відповідності до зміни надходжень шкідливостей в приміщення. Для енергоефективного підтримання мікроклімату в приміщенні, згідно структурної схеми, наведеної на рис.4., необхідно використовувати систему вентиляції та кондиціонування повітря зі змінною витратою повітря [18-20].

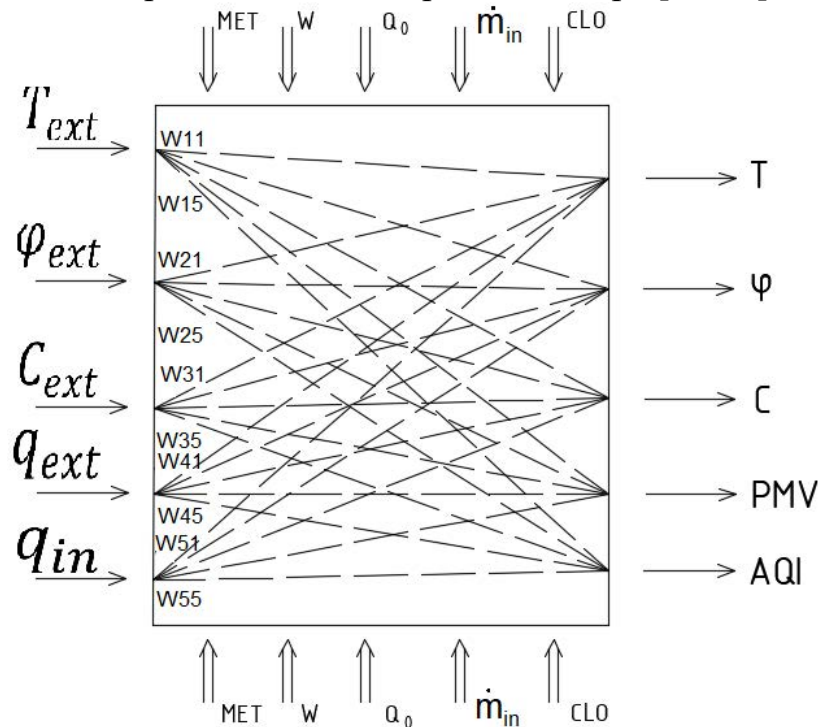


Рис. 4. Структурна схема приміщення (фітнес-зали) як багатовимірного багатозв'язного ланцюга

Ще один перспективний метод для зниження концентрації забруднюючих речовин у повітрі полягає у використанні рослин та пов'язаних з ними ґрунтових мікроорганізмів. Людське існування на Землі неможливе без функціонуючої системи життєзабезпечення, яка включає складні взаємозв'язки з рослинами та мікроорганізмами. Тому спроби ізоляції людини в герметичних

будівлях, віддалених від цієї екологічної системи, неминуче призводять до проблем. Навіть відсутність сотень синтетичних органічних хімікатів у замкненому середовищі не запобіжить появі проблем із забрудненням повітря через власні відходи людини [21 - 23]. Отже, листя, коріння, ґрунт та мікроорганізми, що пов'язані з рослинами, розглядаються як потенційний спосіб зниження забруднювачів повітря всередині приміщень.

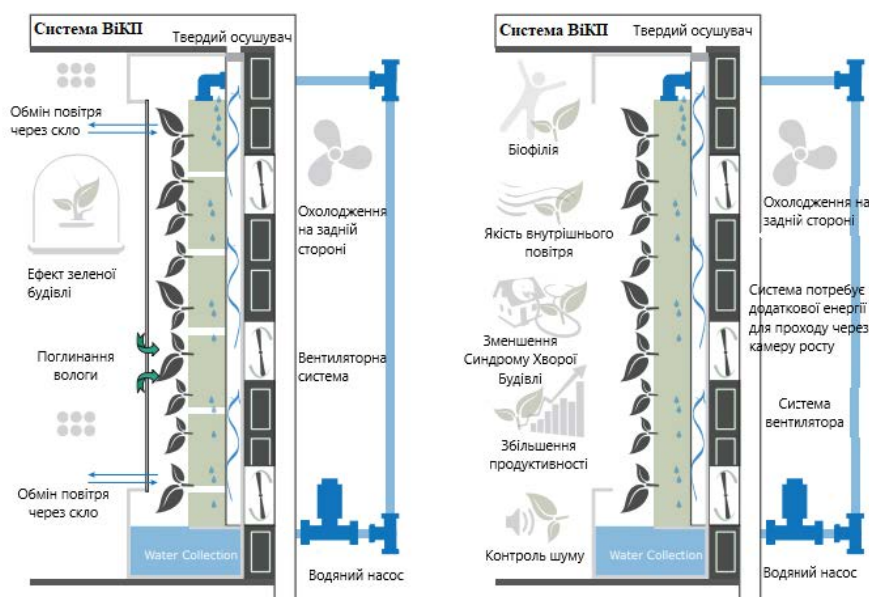


Рис. 5. Система вентиляції та кондиціонування повітря з живою стіною.

Спільні дослідження НАСА та Асоціації ландшафтних підприємців Америки (ALCA), що охоплюють два роки даних, показують можливість використання кімнатних рослин для вирішення проблем забруднення повітря в будинках, нагадуючи людям про їхню залежність від рослин для збереження життя та благополуччя на нашій планеті. Використання систем фітокондиціонування, живих стін потенційно може знизити навантаження на ці системи [24, 25]. Що стосується контролю температури, випаровування з рослин сприяє зниженню температури навколишнього середовища [26, 27].

Якщо додати в приміщення зелену стіну (рис.5) для підвищення енергоефективності системи та психологічного клімату в приміщенні, то процес управління вентиляцією зі змінною витратою повітря та місцевим охолоджувачем або системою кондиціонування повітря необхідно робити з урахуванням потреби необхідної кількості зовнішнього повітря та температури в приміщенні, а також з урахуванням процесів тепловологообміну в приміщенні та динаміки зміни теплонадходжень впродовж дня [28-30].

**Висновки.** Обґрунтована математична модель мікроклімату приміщення (фітнес-зали) закритої спортивної споруди, як багатозв'язної системи, яка дозволяє синтезувати багатопараметричні системи автоматичного керування

комфортністю та якістю повітря й досліджувати їх ефективність. Універсальність моделі дозволяє здійснювати керування газовим складом повітря за показником його якості або відповідно до ГДК, встановлених санітарними нормами для спортивних споруд закритого типу, на галузевому та державному рівнях із залученням мехатронних систем моніторингу, контролю та регулювання відповідних ключових параметрів мікроклімату подібних приміщень, а також для забезпечення комфортних умов перебування в них людей, які займаються спортивною, учбово-тренувальною та оздоровчо-лікувальною фізичною культурою. Такі системи управління відповідають вимогам управління системами вентиляції та кондиціонування повітря зі змінною витратою і вважаються системами управління з класом енергоефективності А. Це дозволяє зменшити непродуктивні втрати енергоносіїв при роботі системи саме за потребою в даний момент часу. Також зелена стіна дозволяє зменшити кількість повітря, яке подається в приміщення за рахунок біофільтрації. Що також вписується в розглянуту багатопараметричну систему автоматичного керування.

### Бібліографічний список:

1. Regulation of Air Pollution: Australia. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://maint.loc.gov/law/help/air-pollution/australia.php>
2. Criteria Air Pollutants. US EPA. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://surl.li/yblngn>
3. Limits for air contaminants. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://surl.li/ebdvja>
4. List of MAK and BAT Values. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://series.publisso.de/en/pgseries/overview/mak/lmbv/curIssue>
5. India: Air Quality Standards. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://www.transportpolicy.net/standard/india-air-quality-standards/>
6. INDOOR AIR QUALITY CONTROL ACT. [online] [18.03.2025]. Available at: [https://elaw.klri.re.kr/eng\\_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG](https://elaw.klri.re.kr/eng_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG)
7. Canadian Ambient Air Quality Standards (CAAQS). [online] [18.03.2025]. Available at: <https://ccme.ca/en/air-quality-report>
8. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>.
9. The NIOSH Occupational Exposure Banding Process for Chemical Risk Management. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2019-132/default.html>
10. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://surl.li/hipnlw>

11. 2024 TLVs and BEIs Based on the Documentaion of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. Amerian CGIH. 280 p.
12. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). [online] [18.03.2025]. Available at: <https://surl.li/ypxsbs>
13. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Serhii Rybachov, Petro Zynych. Nonisothermal flow of nanofluid in ground heat accumulator for decentralized heat supply of rural facilities for various purposes. Contents of Proceedings of 23rd International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. May 22-24, 2024. Vol.23. P.623-629.
14. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Mania Shyshyna, Serhii Rybachov, Olha Mykhailyk. Optimization of heat transfer processes in enclosing structures of architectural monuments located outside urban agglomeration. Contents of Proceedings of 23rd International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. May 22-24, 2024. Vol.23. P. 615-622.
15. Bolton, D. (1980) The Computation of Equivalent Potential Temperature. Monthly Weather Review, 108, 1046-1053.
16. Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Москвітіна А.С. Моделювання та алгоритм розрахунку параметрів системи регулювання мікроклімату приміщення з елементами штучного інтелекту. Містобудування та територіальне планування. Випуск 79. К.: КНУБА. 2022. С. 446-462.
17. Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Москвітіна А.С., Золотар Л.В. Інноваційний метод дослідження динаміки зміни забрудненості та вологості повітря спортивних споруд: фітнес-зали та плавальні басейни. Містобудування та територіальне планування. Випуск 83. К.: КНУБА. 2023. С. 374–385.
18. Москвітіна А. С., Шишина М.О. Дослідження поля температур у приміщенні при роботі систем кондиціонування при змінних теплових навантаженнях приміщення. Молодий вчений - Випуск 3(79). 2020. С. 186-192.
19. Москвітіна, А.С., Шишина М.О., Корчмінський М. Техніко-економічне та екологічне обґрунтування використання систем зі змінною витратою повітря для адміністративних будівель. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. Випуск 36.К.: КНУБА, 2021. С.62-79.
20. Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. New approach for refined efficiency estimation of air exchange organization. International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. №. 3. P. 591-596.
21. Wong N.H., Kwang T.AY., Chen Y., Sekar K., Tan P.Y., Chan D., et al. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. Build Environ. 2010. Vol. 45. no.3 P. 663—72.
22. Tetiana Tkachenko, Viktor Mileikovskiy, Anna Moskvitina, Iryna Peftieva, Viktoriia Konovaliuk, Adam Ujma. PROBLEMS OF STANDARDISING ILLUMINATION FOR PLANTS IN GREENHOUSES AND GREEN STRUCTURES. Contents of Proceedings of 22nd International

Scientific Conference 'ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT' May 24-26, 2023. P.1011-1016.

23. Ling CZ, Ghaffarian HA. Greenscaping buildings: amplification of vertical greening towards approaching sustainable urban structures. *J Creative Sustain Archit Built Environ*. 2012. Vol.2. P. 13-22.

24. Green horizons: Exploring the potential of vertical green walls / Jeyasurya T et al. *Plant Science Today*. 2024.

25. Fjeld T. The Effect of Interior Planting on Health and Discomfort among Workers and School Children. *HortTechnology*. 2000. Vol. 10, no. 1. P. 46–52.

26. Wolverton B.C. Interior landscape plants for indoor air pollution abatement. Stennis Space Center, Miss : National Aeronautics and Space Administration, 1989. 22 p.

27. Pease, P.; Chhabra, J.; Zolfaghari, Z. Planning for net zero by 2050, what HVAC system interventions will today's code minimum commercial buildings require? *arXiv* 2021, arXiv:2111.03899.

28. Приймаченко О.В., Москвітіна А.С., Бистров Д.О. Використання нечіткої логіки для управління vav-системою кондиціонування повітря в поєднанні з зеленою стіною. *Просторовий розвиток*. Випуск 10. К.: КНУБА, 2024 С.389–406.

29. Davis M.M., Hirmer S. The potential for vertical gardens as evaporative coolers: An adaptation of the 'Penman Monteith Equation'. *Building and Environment*. 2015. Vol. 92. P. 135–141.

30. Ottele M. The green building envelope: vertical greening [dissertation]. Delft: Delft University of Technology; 2011.

PhD, associate professor **Chovniuk Yuriy**,  
Associate Professor **Cherednichenko Petro**,  
PhD, Associate Professor **Moskvitina Anna**,  
PhD, Associate Professor **Vasylieva Hanna**,  
Kyiv National University of Construction and Architecture

## **ENERGY-EFFICIENT MICROCLIMATE MANAGEMENT OF A GYM, TAKING INTO ACCOUNT COMFORT AND AIR QUALITY INDICATORS WHEN MAKING VENTILATION ON DEMAND AND A GREEN WALL**

The study aims to develop and substantiate a physical and mathematical model of energy-efficient microclimate management of a fitness room, which takes into account the parameters of comfort and air quality. This is aimed at further research, improvement and implementation of multi-parameter automatic control systems for key microclimate indicators, such as humidity, temperature and air velocity. The paper considers modern requirements for the gas composition of air in gyms, as well

as methods for assessing its safety, which must be taken into account when designing these facilities to ensure proper functioning and operation. The proposed alternative approach to modelling indoor comfort involves taking into account air quality. Air quality assessment for sports facilities is usually based on two approaches: 1) comparing the concentrations of pollutants with the maximum permissible standards; 2) using air quality indices. The paper presents equations, their analytical solutions and numerical calculations that describe the dynamics of absolute humidity in the room, the relationship between absolute and relative humidity, the balance of air mass in the fitness room, as well as changes in temperature and pressure in it. The energy balance equation for the room was derived and solved analytically. The obtained solutions make it possible to optimise the energy efficiency of microclimate control during the operation of the gym. All the dependencies, differential equations, their numerical and analytical solutions considered in this paper constitute a mathematical model of the microclimate of a sports hall, which allows the hall to be operated in an energy-efficient mode, taking into account dynamic changes in the intake of harmful substances into the room, controlling the ventilation and air conditioning system as needed at the moment, i.e. changing the air flow rate according to the needs. It also allows the integration of indoor plants (living wall) into modern indoor climate control systems.

Key words: indoor air quality; climate control; living wall system; green wall; biofiltration; energy efficiency; ventilation; air conditioning; green building; indoor CO<sub>2</sub> emissions; intelligent microclimate control systems.

#### REFERENCE:

1. Regulation of Air Pollution: Australia. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://maint.loc.gov/law/help/air-pollution/australia.php> . {in English}
2. Criteria Air Pollutants. US EPA. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://surl.li/yblngn>. {in English}
3. Limits for air contaminants. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://surl.li/ebdvja>
4. List of MAK and BAT Values. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://series.publisso.de/en/pgseries/overview/mak/lmbv/curIssue>. {in English}
5. India: Air Quality Standards. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://www.transportpolicy.net/standard/india-air-quality-standards/>. {in English}
6. INDOOR AIR QUALITY CONTROL ACT. [online] [18.03.2025]. Available at: [https://elaw.klri.re.kr/eng\\_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG](https://elaw.klri.re.kr/eng_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG). {in English}

7. Canadian Ambient Air Quality Standards (CAAQS). [online] [18.03.2025]. Available at: <https://ccme.ca/en/air-quality-report>. {in English}
8. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>); ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>. {in English}
9. The NIOSH Occupational Exposure Banding Process for Chemical Risk Management. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2019-132/default.html> {in English}
10. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. [online] [18.03.2025]. Available at: <https://surl.li/hipnlw> {in English}
11. 2024 TLVs and BEIs Based on the Documentaion of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. Amerian CGIH. 280 p. {in English}
12. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). [online] [18.03.2025]. Available at: <https://surl.li/ypxsbs> {in English}
13. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Serhii Rybachov, Petro Zynych. Nonisothermal flow of nanofluid in ground heat accumulator for decentralized heat supply of rural facilities for various purposes. Contents of Proceedings of 23rd International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. May 22-24, 2024. Vol.23. P.623-629. {in English}
14. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Mania Shyshyna, Serhii Rybachov, Olha Mykhailyk. Optimization of heat transfer processes in enclosing structures of architectural monuments located outside urban agglomeration. Contents of Proceedings of 23rd International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. May 22-24, 2024. Vol.23. P. 615-622. {in English}
15. Bolton, D. (1980) The Computation of Equivalent Potential Temperature. Monthly Weather Review, 108, 1046-1053. {in English}
16. Chovnyuk YU.V., Cherednichenko P.P., Moskvitina A.S. Modelyuvannya ta alhorytm rozrakhunku parametriv systemy rehulyuvannya mikroklimatu prymishchennya z elementamy shtuchoho intelektu. Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya. Vypusk 79. K.: KNUBA, 2022. P. 446-462. {in Ukrainian}
17. Chovnyuk YU.V., Cherednichenko P.P., Moskvitina A.S., Zolotar L.V. Innovatsiynnyy metod doslidzhennya dynamiky zminy zabrudnenosti ta volohosti povitrya sportyvnykh sporud: fitnes-zaly ta plaval'ni baseyny. Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya. Vypusk 83. K.: KNUBA. 2023. P. 374–385. {in Ukrainian}

18. Moskvitina A.S., Shyshyna M.O. Doslidzhennya polya temperatur u prymishchenni pry roboti system kondytsionuvannya pry zminnykh teplovykh navantazhennyakh prymishchennya. *Molodyy vchenyy - Vypusk 3(79)*. 2020. P. 186-192. {in Ukrainian}
19. Moskvitina, A.S., Shyshyna M.O., Korchmins'kyy M. Tekhniko-ekonomichne ta ekolohichne obgruntuvannya vykorystannya system zi zminnoyu vytratoyu povitrya dlya administratyvnykh budivel'. *Ventylyatsiya, osviltennya ta teplohapostachannya: naukovy-tekhnichnyy zbirnyk*. Vypusk 36.K.: KNUBA, 2021. P.62-79. {in Ukrainian}
20. Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. New approach for refined efficiency estimation of air exchange organization. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018. Vol. 7. №. 3. P. 591-596. {in English}
21. Wong N.H., Kwang T.AY, Chen Y., Sekar K., Tan P.Y., Chan D., et al. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build Environ*. 2010. Vol. 45. no.3 P. 663—72. {in English}
22. Tetiana Tkachenko, Viktor Mileikovskiy, Anna Moskvitina, Iryna Peftieva, Viktoriia Konovaliuk, Adam Ujma. PROBLEMS OF STANDARDISING ILLUMINATION FOR PLANTS IN GREENHOUSES AND GREEN STRUCTURES. *Contents of Proceedings of 22nd International Scientific Conference 'ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT'* May 24-26, 2023. P.1011-1016. {in English}
23. Ling C.Z., Ghaffarian H.A. Greenscaping buildings: amplification of vertical greening towards approaching sustainable urban structures. *J Creative Sustain Archit Built Environ*. 2012. Vol.2. P. 13-22. {in English}
24. Green horizons: Exploring the potential of vertical green walls / Jeyasurya T et al. *Plant Science Today*. 2024. {in English}
25. Fjeld T. The Effect of Interior Planting on Health and Discomfort among Workers and School Children. *HortTechnology*. 2000. Vol. 10, no. 1. P. 46–52. {in English}
26. Wolverton B.C. Interior landscape plants for indoor air pollution abatement. Stennis Space Center, Miss : National Aeronautics and Space Administration, 1989. 22 p. {in English}
27. Pease, P.; Chhabra, J.; Zolfaghari, Z. Planning for net zero by 2050, what HVAC system interventions will today's code minimum commercial buildings require? *arXiv 2021*, arXiv:2111.03899. {in English}
28. Pryymachenko O.B., Moskvitina A.S., Bystrov D.O. Vykorystannya nechitkoyi lohiky dlya upravlinnya vav-systemoyu kondytsionuvannya povitrya v poyednanni z zelenoyu stinoyu. *Prostorovy rozvytok*. Vypusk 10. K.: KNUBA, 2024 P.389–406. {in Ukrainian}