

Київський національний університет будівництва і архітектури  
Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**БУБОН СЕРГІЙ ЛЕОНІДОВИЧ**

УДК 628.9:725.23:725.8

**ДИСЕРТАЦІЯ**

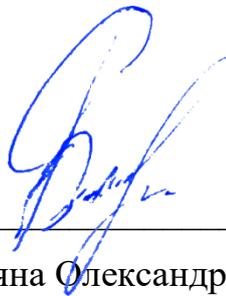
**ФОРМУВАННЯ КОМФОРТНОГО ТА БЕЗПЕЧНОГО СЕРЕДОВИЩА  
ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕНЬ ВІДКРИТОГО ПЛАНУВАННЯ**

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 263 – Цивільна безпека

Галузь знань 026 – Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії вперше

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Сергій БУБОН

---

Наукова керівниця Негрій Тетяна Олександрівна, канд. техн. наук, доцентка

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

Бубон С. Л. Формування комфортного та безпечного середовища підземних приміщень відкритого планування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 263 «Цивільна безпека» (26-Цивільна безпека) – Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, 2026.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної задачі розроблення комфортних та безпечних умов перебування людей у підземних приміщеннях відкритого планування підземного розташування.

У роботі основну увагу приділено проблемі безпеки довготривалого перебування людей у підземних приміщеннях відкритого планування, які переобладнані з наявних підземних споруд іншого за проектом і функціоналом призначення. Зокрема, наявні вбудовані системи вентиляції, кондиціонування повітря та контролю параметрів внутрішнього середовища не відповідають комфортним умовам перебування, що знаходить негативно впливає на самопочуття та продуктивність персоналу. Комплексний аналіз шкідливих факторів у підземних приміщеннях відкритого планування продемонстрував необхідність унормування не тільки мікрокліматичних показників, а й інших фізичних факторів, здатних суттєво впливати на безпеку і комфорт внутрішнього середовища.

Дослідження параметрів якості повітря підземних приміщень відкритого планування та аналіз рівнів концентрації дрібнодисперсного пилу, радону та вуглекислого газу довели, що більшість переобладнаних підземних приміщень не пристосовані для постійного перебування великої кількості людей, що зумовлює складність підтримання безпечних і комфортних параметрів повітряного середовища.

Встановлено, що на динаміку концентрації CO<sub>2</sub> суттєво впливає кількість і локалізація людей у просторі приміщення, а також наявний рівень

концентрації вуглекислого газу у припливному повітрі, що зумовлює необхідність урахування цієї особливості при розрахунку кратності повітрообміну. Запропоновано зонування приміщення на основі поточних показників CO<sub>2</sub>.

Установлено, що рівні випромінювання Rn в підземних приміщеннях відкритого планування підземного розташування не цілком відповідають регламентованим значенням і можуть суттєво впливати на загальний стан людей, які постійно знаходяться в таких приміщеннях. Запропоновано враховувати відносний коефіцієнт впливу радону при розрахунку кратності повітрообміну приміщення для зменшення рівня його концентрації до унормованих показників.

Аналіз теплового та вологісного комфорту підземних приміщень, в яких не передбачено умов для постійного перебування великої кількості людей показав значний вплив на ці показники кількості та скупчення осіб через збільшення відносної вологості повітря та температури. Запропоновано враховувати таку особливість при визначенні стратегій переобладнання наявних підвальных приміщень та підземних приміщень іншого технологічного призначення в офісні приміщення та місця постійного перебування людей.

Дослідження показників мікроклімату та рівня комфорту в приміщеннях підземних споруд з високою вологістю і зниженою температурою внутрішнього повітря, не пристосованих до довготривалого перебування людей, аналіз показників комфорту за результатами анкетування, фізіологічних та психологічних наслідків перебування у підземних приміщеннях, дозволили запропонувати систему управління унормованими показниками повітряного середовища та рівня комфорту для безпечної та продуктивної роботи людей у підземних приміщеннях відкритого планування, яка ґрунтується на постійному моніторингу показників датчиків, порівнянні отриманих даних з унормованими показниками і формуванні керівних сигналів для підтримання мікрокліматичних показників на основі

комбінованих систем припливно-витяжної вентиляції з «ентальпійними» рекуперативними теплоутилізаторами, можливістю температурного зонування простору з орієнтуванням на найбільше скупчення людей та можливістю корекції температурної стратифікації, регулювання концентрації радону та його прохідних, а також підтримання аероіонного та мікробіологічного складу повітря підземного простору для підвищення продуктивності роботи та безпеки довготривалого перебування людей у такого типу приміщеннях.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у розробленні комплексної системи формування мікроклімату в приміщеннях підземних споруд з високою вологістю і зниженою температурою внутрішнього повітря при переобладнанні наявних підземних приміщень, у яких не передбачено умов для постійного перебування великої кількості людей, у підземні приміщення відкритого планування для безпечної і безперебійної роботи людей. Обґрунтовано формування тепловологісного режиму в приміщеннях, надано рекомендації щодо організації та проектування систем вентиляції вологих приміщень із зниженою температурою внутрішнього повітря та значною температурною стратифікацією.

Результати роботи впроваджено у діяльності «ТОВ «КТЛ», ФГ «Енергія-1» та ТОВ «КремПромЗІЗ» (додаток Б).

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

*Удосконалено:*

- математичний апарат для розрахунку теплообміну підземної будівлі з урахуванням кількості людей, які в ній присутні.
- математичну модель повітрообміну в приміщеннях підземного розташування відкритого планування з урахуванням вивільнення радону.

*Набули подальшого розвитку:*

- дослідження процесів температурного зонування та стратифікації у в підземних приміщеннях відкритого планування, що дозволяє забезпечити

різні потреби людей залежно від індивідуальних особливостей та стану організму.

**Ключові слова:** мікрокліматичні показники, підземні споруди, тепловологісний режим, приміщення відкритого планування, комфортне середовище, дрібнодисперсний пил, якість повітря, кратність вентиляції, забруднювачі повітря, штучна іонізація, температурна стратифікація, тіньолюбні рослини.

## ABSTRACT

Bubon S. L. Forming a comfortable and safe environment in open-space underground premises. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 263 “Civil Security” (26-Civil Security) – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to solving the current problem of developing comfortable and safe conditions for people to stay in underground open-plan premises.

The work focuses on the problem of safety of long-term stay of people in underground open-plan premises, which are converted from existing underground structures of a different design and functional purpose. In particular, the existing built-in ventilation, air conditioning and control systems for internal environment parameters do not meet comfortable conditions, which has a negative impact on the well-being and productivity of personnel. A comprehensive analysis of harmful factors in open-plan underground premises has demonstrated the need to normalize not only microclimatic indicators, but also other physical factors that can significantly affect the safety and comfort of the indoor environment.

Research on air quality parameters of Open Space underground premises and analysis of fine dust, radon and carbon dioxide concentration levels have proven that most converted underground premises are not adapted for the constant presence of a

large number of people, which makes it difficult to maintain safe and normal air space indicators.

It has been established that the dynamics of  $C_{O_2}$  concentration is significantly affected by the number and localization of people in the space of the premises, as well as the existing level of carbon dioxide concentration in the supply air, which necessitates the need to take this feature into account when calculating the air exchange rate. Zoning of the premises based on current  $CO_2$  indicators is proposed.

It was established that the levels of Rn radiation in underground Open Space type premises do not fully comply with the regulated values and can significantly affect the general condition of people who are constantly in such premises. It is proposed to take into account the relative radon exposure coefficient when calculating the multiplicity of air exchange of the premises to reduce its concentration level to normalized indicators.

Analysis of thermal and humidity comfort of underground premises, in which conditions are not provided for the constant stay of a large number of people, showed a significant impact on these indicators of the number of people due to an increase in humidity and temperature. It is proposed to take this feature into account when determining strategies for re-equipping existing basements and underground spaces of other technological purposes into office spaces and places of permanent residence of people.

Research into microclimate indicators and comfort levels in underground structures with high humidity and low indoor air temperatures, not adapted to long-term human occupancy, analysis of comfort indicators based on questionnaire results, physiological and psychological consequences of staying in underground spaces, made it possible to propose a system for managing standardized air environment indicators and comfort levels for safe and productive work of people in underground Open Space-type spaces, which is based on constant monitoring of sensor indicators, comparison of the obtained data with standardized indicators and generation of control signals to maintain microclimatic indicators based on combined supply and exhaust ventilation systems with recuperative air

dehumidifiers, the possibility of temperature zoning of the space with orientation to the largest concentration of people and the possibility of temperature correction stratification, regulation of radon concentration and its passage, as well as maintenance of aeroionic and microbiological composition of the air of the underground space to increase work productivity and safety of long-term stay of people in such types of premises.

The practical significance of the results obtained lies in the development of a comprehensive system for organizing the microclimate in the premises of underground structures with high humidity and low internal air temperature during the re-equipment of existing underground premises, which do not provide conditions for the constant stay of a large number of people in the underground Open Space premises for safe and uninterrupted work of people. The formation of the thermal and humidity regime in the premises is substantiated, recommendations are provided for the organization and design of ventilation systems for wet premises with low internal air temperature and a significant range of temperature stratification.

The results of the work were implemented in the activities of LLC KTL, FG Energia-1 and LLC KremPromZIZ (Appendix B).

Scientific novelty of the obtained results:

***Improved:***

- a mathematical apparatus was developed for calculating the heat exchange of an underground building, taking into account the number of people present in it.
- mathematical calculation of air exchange in open-plan underground rooms, taking into account the radon release coefficient.

***Further development was made:***

- research into the processes of temperature zoning and stratification in open-plan underground rooms.

***Keywords:*** microclimatic indicators, underground structures, thermal and humidity regime, open-plan premises, comfortable environment, fine dust, air

environment, ventilation rate, air pollutants, artificial ionization, temperature stratification, shade-loving plants.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Статті в наукових виданнях, внесених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б» :**

1. **Бубон С. Л.,** Негрій Т. О., Розроблення системи управління рівнем комфорту підземних приміщень типу Open Space підземного розташування, *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, № 4, 2025, С. 340-345., DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-47>.

*Особистий внесок здобувача полягає в розробленні концепції системи управління рівнем комфорту підземних приміщень відкритого планування.*

2. **С. Л. Бубон,** Т. О. Негрій. Дослідження параметрів якості повітря приміщень типу Open Space підземного розташування. *Комунальне господарство міст*, 2025, том 3, випуск 191. С. 580-583. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-580-585>.

*Особистий внесок здобувача полягає у визначенні показників вуглекислого газу, радону, дрібнодисперсного пилу респірабельної фракції та запропоновано заходи унормування зазначених параметрів.*

3. **Бубон С.Л.,** Резнік Д.В. Дослідження мікрокліматичних показників офісних приміщень типу open space підземного розташування, *Український журнал будівництва та архітектури*, No 5 (029), 2025, С.38-45.

*Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні підтримання мікрокліматичних показників на основі комбінованих системам припливно-витяжної вентиляції з рекуперативними осушувачами повітря та можливістю температурного зонування простору з орієнтуванням на найбільше скупчення людей.*

4. **Бубон С.Л.,** Визначення показників комфортності підземних приміщень на основі опитування працівників. *Комунальне господарство міст*, 2025, том 6, випуск 191. С. 394-398. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-394-398>

### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Роговенко О., студ., **Бубон С.**, студ, Горбенко О. Дослідження впливу показників повітряного простору офісних приміщень типу Open Space на рівень комфортності працівників, *Тези XXXII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених "Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства"*, Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2025. С. 302-304. <https://doi.org/10.32782/2079-5009.krnu25.11.10>.

*Особистий внесок здобувача полягає у визначенні впливу параметрів якості повітря підземних офісних приміщень відкритого планування на рівень комфортності працівників.*

6. **Бубон С. Л.**, Роговенко О. О., Рєзнік Д. В. Системи вентиляції й очищення повітря в Open Space приміщеннях підземного розташування, *Тези II міжнародної науково-методичної конференції, 22 - 23 травня 2025 року, Київ, Державний університет «Київський авіаційний інститут»*, 2025. С. 30.

*Особистий внесок здобувача полягає у визначенні та ранжуванні шкідливих факторів в підземних приміщеннях відкритого планування з метою розробки систем вентиляції.*

7. Tsiuriupa Y., **Bubon S.** Development of a classification of factors that determine the occurrence and course of "sick building syndrome". *Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Green Construction"*. Kyiv: Kyiv National University of Construction and Architecture. 2025, Київ, 2025. С. 249-251. URL:

[https://www.researchgate.net/publication/391850107\\_Proceedings\\_of\\_the\\_IV\\_International\\_Scientific\\_and\\_Practical\\_Conference\\_Green\\_Construction\\_Kyiv\\_13-14\\_May\\_2025](https://www.researchgate.net/publication/391850107_Proceedings_of_the_IV_International_Scientific_and_Practical_Conference_Green_Construction_Kyiv_13-14_May_2025).

*Особистий внесок здобувача полягає у визначенні актуальності систематизації та класифікації факторів «синдрому хворого будинку» для різних типів приміщень.*

8. Цюрюпа Ю., Бубон С. Розроблення класифікації факторів, що визначають появу та перебіг «синдрому хворої будівлі». *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»)*. Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. 2025, с.356-358.

[https://www.researchgate.net/publication/391850615\\_Materiali\\_IV\\_Miznarodnoi\\_naukovo-practicnoi\\_konferencii\\_Green\\_Construction\\_Zelene\\_budivnictvo\\_Kiiv\\_13-14\\_travna\\_2025\\_r](https://www.researchgate.net/publication/391850615_Materiali_IV_Miznarodnoi_naukovo-prakticnoi_konferencii_Green_Construction_Zelene_budivnictvo_Kiiv_13-14_travna_2025_r)

*Особистий внесок здобувача полягає у адаптуванні та застосуванні систематизації та класифікації факторів «синдрому хворого будинку» при визначенні стратегії покращення умов перебування у різних типах приміщень.*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	13
РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ОБЛАШТУВАННЯ РОБОЧИХ ПРОСТОРІВ У ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕННЯХ .....	18
1.1. Проблеми облаштування безпечних найпростіших укриттів .....	19
1.2. Невирішені проблеми підземних приміщень.....	24
1.3. Потенційні ризики для здоров'я людини при довготривалому перебуванні у підземних спорудах.....	30
1.4. Висновки за розділом 1 .....	36
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМФОРТНОГО СЕРЕДОВИЩА ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕНЬ ВІДКРИТОГО ПЛАНУВАННЯ .....	38
2.1. Методика вимірювання параметрів внутрішнього середовища підземних приміщень відкритого планування .....	38
2.2. Соціологічне визначення найбільш значущих показників комфортності підземних приміщень.....	46
2.3. Висновки за розділом 2 .....	50
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ОФІСНИХ ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕНЬ ВІДКРИТОГО ПЛАНУВАННЯ ....	52
3.1. Дослідження процесів теплообміну підземних приміщень відкритого планування .....	52
3.2. Дослідження параметрів якості повітря підземних приміщень відкритого планування .....	61
3.3. Дослідження методів унормування якісних показників повітря .....	68
3.4. Вплив озеленення підземних просторів на показники комфортності середовища.....	74
3.5 Висновки за розділом 3 .....	81

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОКАЗНИКАМИ КОМФОРТНОГО І БЕЗПЕЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕНЬ ВІДКРИТОГО ПЛАНУВАННЯ.....	84
4.2 Алгоритм управління системою забезпечення показників комфортного і безпечного середовища підземного приміщення відкритого планування	91
4.3. Висновки за розділом 4 .....	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ джерел.....	110
ДОДАТОК А ПУБЛІКАЦІЇ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ .....	128
ДОДАТОК Б ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ .....	131
ДОДАТОК В ФРАГМЕНТ ЛІСТИНГУ ДАНИХ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА УНОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ .....	135

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Через постійний терор цивільного населення, знищення та пошкодження об'єктів цивільної інфраструктури внаслідок збройної агресії на території України за допомогою ракет та БПЛА, які досягають найвіддаленіших регіонів нашої країни, все більше організацій і підприємств переносять свої офіси у підземні приміщення для безпечної роботи персоналу.

На сьогодні активізувалася розбудова комплексних заходів і засобів цивільного та інженерного захисту та мережі підземних робочих майданчиків типу відкритого планування.

Проте в умовах сучасного стану безпеки більшість таких приміщень реалізуються на основі переобладнання наявних підземних споруд типу підвалів, паркінгів, складів, тобто таких, що не пристосовані для постійного перебування людей.

На відміну від наземних просторів, якість повітря в підземних приміщеннях є особливо небезпечною. Загалом, важко досягти належної циркуляції повітря в закритих підземних приміщеннях через відсутність природної вентиляції. Крім того, застій забруднювальних речовин через недостатню вентиляцію може спричинити серйозні проблеми зі здоров'ям для працівників відкритого планування підземного розташування.

Крім того, забруднення повітря частинками пилу, вуглекислим газом, неприємними запахами та радоном зростає через відсутність належної вентиляції.

Закрите робоче середовище, висока чи занижка температура, висока відносна вологість повітря та висока концентрація CO<sub>2</sub> негативно впливають на організм людини, викликають суб'єктивне сприйняття, психологічну та фізіологічну поведінку, що призводить до низки змін, спричиняє зміни у фізичних функціях та психологічні проблеми, що впливає на когнітивні функції, працездатність та здоров'я.

Таким чином, розроблення системи контролю та унормування показників середовища для створення здорових і безпечних умов в приміщеннях відкритого планування підземного розташування відповідає актуальним завданням галузі та має значний практичний потенціал.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні дослідження дисертаційної роботи виконані відповідно до Кодексу цивільного захисту України (поточна редакція) від 02.10.2012 р. №5403-17, Стратегії національної безпеки України, затвердженої Указом Президента України №392/2020 від 14.09.2020р., Закону України «Про національну безпеку України» № 2469-19 від 21.06.2018 і безпосередньо пов'язані з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0122U001197 і 0117U003297).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розроблення науково обґрунтованої концепції формування комфортного та безпечного середовища підземних приміщень відкритого планування на основі унормування небезпечних і шкідливих чинників.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі були поставлені та вирішені такі наукові завдання:

1. Визначити основні показники комфортності підземних приміщень відкритого планування, які потребують покращення та суттєво впливають на загальне відчуття комфорту.
2. Виміряти кількісні значення мікрокліматичних показників підземних приміщень відкритого планування.
3. Провести опитування працівників підземних офісів для уточнення показників комфорту приміщення на основі власних відчуттів.
4. Удосконалити математичний апарат для визначення теплообміну підземного приміщення з урахуванням теплообміну присутніх людей та місця їх локалізації у приміщенні.

5. Визначити можливості використання фізико-біологічних методів покращення якості повітря підземних приміщень відкритого планування – ультрафіолетового опромінення та фітодизайну.

6. Дослідити вплив кімнатних рослин на якісні показники повітря та рівень комфорту підземного приміщення.

7. Розробити концепцію системи унормування показників комфорту середовища підземних приміщень відкритого планування з урахуванням зонування приміщення та локалізації людей у приміщенні.

**Об’єкт дослідження** – процеси формування внутрішнього середовища приміщень відкритого планування підземного розташування.

**Предмет дослідження** – закономірності процесів тепло- та повітрообміну внутрішнього середовища підземного приміщення для створення умов безпечного та комфортного перебування працівників.

**Методи дослідження:** для розв’язання поставлених наукових завдань у дисертаційному дослідженні використовувався критичний аналіз літературних джерел для визначення наявних проблем унормування показників комфортності підземних приміщень відкритого планування та технічних рішень їх подолання; вимірювання з використанням сучасної вимірювальної апаратури, коректних методик проведення експериментів; опитування.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

*Удосконалено:*

- математичний апарат для розрахунку теплообміну підземної будівлі з урахуванням кількості людей, які в ній присутні;
- математичну модель повітрообміну в приміщеннях підземного розташування відкритого планування з урахуванням вивільнення радону.

*Набули подальшого розвитку:*

- дослідження процесів температурного зонування та стратифікації в підземних приміщеннях відкритого планування, що дозволяє забезпечити різні потреби людей залежно від індивідуальних особливостей та стану організму.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у науковому обґрунтуванні та експериментальному підтвердженні доцільності використання комплексної системи комфортного середовища в підземних приміщеннях відкритого планування, переобладнаних з приміщень іншого функціонального призначення, що дозволяє адаптувати параметри середовища під довготривале перебування людей. Визначено ключові показники комфорту внутрішнього середовища на основі проведених вимірювань параметрів мікроклімату, кількісних значень вуглекислого газу, радону та суб'єктивного сприйняття комфорту особами, що перебувають у підземних приміщеннях. Запропоновано врахування параметрів теплообміну людей та коефіцієнту просочування радону при розрахунку кратності повітрообміну у підземних просторах. З метою досягнення температурного комфорту запроваджено двозонний температурний поділ приміщення з можливістю корекції температури як за горизонтальною, так і за вертикальною стратифікацією. Передбачено організацію озеленення підземних відкритого планування та заходи для покращення мікробіологічних параметрів підземних просторів, що за суб'єктивною оцінкою здатні покращити психо-емоційний стан людей у замкнених просторах при довготривалому перебуванні.

Запропоновано концепцію системи управління рівнем комфорту приміщень типу відкритого планування підземного розташування на основі унормування мікрокліматичних показників з використанням комбінованих систем вентиляції та кондиціонування повітря з «ентальпійними» рекуперативними теплоутилізаторами та можливістю температурного зонування простору та орієнтування на найбільше скупчення людей.

Результати роботи впроваджено у діяльності «ТОВ «КТЛ», ФГ «Енергія-1» та ТОВ «КремПромЗІЗ» (додаток Б).

**Особистий внесок здобувача** полягає у виконанні комплексного дослідження для розроблення концепції системи управління рівнем комфорту підземних приміщень відкритого планування на основі унормування мікрокліматичних показників з використанням комбінованих систем вентиляції та кондиціонування повітря з «ентальпійними» рекуперативними теплоутилізаторами та можливістю температурного зонування простору та орієнтування на найбільше скупчення людей. Особистий внесок у наукові праці зі співавторами наведено в додатку А.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення і результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на міжнародних конференціях: XXXII Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих учених "Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства", Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, (Кременчук, 2025); II Міжнародній науково-методичній конференції «Захист населення, територій та об'єктів критичної інфраструктури – освіта, наука, практика», Державний університет «Київський авіаційний інститут», (Київ, 2025); IV International Scientific and Practical Conference «Green Construction». Kyiv National University of Construction and Architecture. (Київ, 2025).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано вісім наукових робіт, зокрема чотири статті в наукових фахових виданнях категорії Б, з них одна одноосібно та чотири тези доповідей на наукових конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків до них, загальних висновків, списку використаних джерел з 136 найменувань, трьох додатків; містить 27 зображень і вісім таблиць. Загальний обсяг роботи становить 136 сторінок тексту.

## РОЗДІЛ 1

### ОСОБЛИВОСТІ ОБЛАШТУВАННЯ РОБОЧИХ ПРОСТОРІВ У ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Збройна агресія російської федерації стала найбільшим викликом для національної безпеки України від моменту здобуття незалежності. Унаслідок масованих атак на території України вже пошкоджено значну кількість цивільних споруд, а також об'єктів критичної інфраструктури, зокрема електроенергетичну та газотранспортну систему, нафтовидобувну промисловість [1-3].

Масові втрати серед цивільного населення зумовлені низкою об'єктивних факторів. Серед них варто відзначити недостатню кількість захисних споруд, їх незадовільний технічний стан, а також обмежений доступ до них [4].

Додатковим чинником ризику стали офіційні рекомендації органів влади щодо використання для укриття найпростіших захисних об'єктів — підвальних та цокольних приміщень житлових будинків. Зазначені приміщення не відповідають базовим вимогам протидії впливу звичайних засобів ураження, зокрема повітряної ударної хвилі та уламків зруйнованих конструкцій [5].

Поглиблюють проблему глобальних наслідків руйнування цивільних об'єктів активне застосування різноманітних засобів повітряного нападу, прицільне ураження найважливіших елементів інфраструктури та, як наслідок, осколкові руйнування прилеглих споруд, використання агресором сучасних високоточних закордонних засобів атаки [6-9].

### **1.1. Проблеми облаштування безпечних найпростіших укриттів**

Ведення бойових дій у межах житлової забудови населених пунктів спричинило масштабні руйнування не лише об'єктів критичної інфраструктури, але й житлового фонду та споруд цивільного і адміністративного призначення. Це, у свою чергу, обумовило значні людські втрати серед цивільного населення, зокрема осіб, які переховувалися у підвальних та цокольних приміщеннях будівель.

Такі виклики потребують термінових технічних рішень для захисту населення від факторів ураження війни.

Основним законодавчим актом, який регламентує заходи захисту цивільного населення, є Кодекс цивільного захисту України. На підставі цього документа було розроблено низку нормативно-правових актів, спрямованих на захист населення від звичайних засобів ураження та дії ударної повітряної хвилі [10].

Відповідно до ст. 32 Кодексу цивільного захисту цивільне населення підлягає укриттю в найпростіших захисних спорудах. Згідно з визначенням, найпростіше укриття — це фортифікаційна споруда, підвальне або цокольне приміщення, чи інша споруда підземного простору, призначена для тимчасового перебування людей з метою зниження комбінованого впливу небезпечних факторів, а також дії засобів ураження в особливий період.

Водночас у самому визначенні відсутні технічні характеристики, які б конкретизували, від яких саме засобів ураження здатні захистити такі споруди. Конструктивні недоліки найпростіших укриттів полягають у відсутності інженерних систем життєзабезпечення: водопостачання, водовідведення, вентиляції та спеціалізованого обладнання. Натомість нормативи допускають використання посудин для питної води та виносних баків для фекалій, що фактично відображає застарілу практику середини ХХ століття.

Крім того, нормативна база визначає, що лише частина підвальних і цокольних приміщень (більша або менша половини висоти) розташована

нижче рівня землі, що робить їх так само вразливими, як і надземні поверхи [11]. Серед проблемних положень варто відзначити й вимогу облаштування додаткових виходів лише для укриттів місткістю понад 50 осіб.

У сучасних умовах ця норма потребує перегляду: евакуаційні виходи, розташовані за межами зони можливих завалів, мають бути обов'язковим елементом укриттів будь-якої місткості. Їх відсутність значно підвищує ризик загибелі цивільного населення, адже руйнування надземних поверхів будівель суттєво ускладнює або унеможлиблює евакуацію людей з-під уламків.

Підвальні приміщення цегляних житлових будинків із залізобетонним перекриттям, зведених у період, що передував Другій світовій війні та в перше десятиріччя після неї (рис. 1.1 і 1.2), за умови проведення відповідних заходів можуть бути використані як найпростіші укриття. Частина таких приміщень проєктувалася як бомбосховища та оснащувалася броньованими дверима.

Станом на початок повномасштабної війни в лютому 2022 р. більшість цих споруд перебувають у непридатному стані для використання за цільовим призначенням. Інша частина підвальних приміщень будинків зазначеного періоду використовувалася як комори. Їх конструктивною особливістю є наявність виходів з кожного під'їзду, що забезпечує можливість евакуації у випадку часткового руйнування будівлі.

Водночас у більшості житлових панельних будинків, зведених на території України, підвальні приміщення відсутні. У таких спорудах передбачалися лише технічні приміщення, призначені для розміщення інженерного обладнання та прокладання комунікацій.

Захист цивільних споруд і об'єктів критичної інфраструктури розглядається як сукупність організаційно-технічних та інженерних заходів, спрямованих на підвищення живучості об'єктів, гарантування безпеки персоналу та забезпечення стійкого функціонування систем життєзабезпечення та критично-важливих галузей промисловості держави в інтересах задоволення життєвих потреб суспільства.



Рис. 1.1. Підвальні приміщення під цивільним об'єктом



Рис. 1.2. Підвальні приміщення житлових будівель з мережею комунікацій

Визначальним методологічним підходом у побудові перспективної системи інженерного захисту виступає принцип «країна – фортеця». Його реалізація передбачає формування інтегрованої системи безпеки, що охоплює захист територій, об'єктів, населення та суспільства загалом від засобів

повітряного нападу. Реалізація концепції планується упродовж 2023–2027 рр., із поділом організаційно-технічних заходів за термінами досягнення цілей.

На сьогодні активізувалася розбудова об'єктів цивільного інженерного захисту та мережі підземних робочих майданчиків відкритого планування. Наприклад, в Ізраїлі, США, деяких інших країнах – вже на стадії проектування об'єктів критичної, промислової та цивільної інфраструктури передбачають інженерний захист, зокрема занурення під землю ключових елементів, відповідні розрахунки на можливу дію повітряних ударів, терористичних атак тощо [7].

Через постійний терор цивільного населення, знищення та пошкодження об'єктів цивільної інфраструктури внаслідок збройної агресії на території України, які досягають найвіддаленіших регіонів нашої країни, все більше організацій і підприємств з метою збереження економічної стійкості країни переносять свої офіси у підземні приміщення для безпечної роботи персоналу. Проте в умовах сучасного стану безпеки більшість таких приміщень реалізуються на основі переобладнання вже наявних підземних споруд типу підвалів, паркінгів складів, тобто таких, що не пристосовані для постійного перебування людей [12-15].

Інколи прикладом "країни-фортеці" називають Ізраїль, і мабуть частину уроків із цієї країни варто вивчати і застосовувати. Ізраїль має потужні збройні сили, багаточисельний армійський резерв, угоди з союзниками і міцні фортифікації зі сховищами і "капсулами безпеки" по всій території країни [16].

Архітектура протиповітряної оборони Ізраїлю є однією з найдосконаліших у світі, спеціально розроблена для боротьби з широким спектром ракетних загроз, що виникають з боку супротивників у регіоні. Ця багаторівнева система передбачає різні оборонні механізми, здатні перехоплювати загрози на різних висотах та дальностях, адаптовані для протидії ракетним атакам ближньої, середньої та великої дальності.

Система має «Залізний купол» для загроз малої дальності, «Пращу Давида» для ракет середньої дальності та серію «Стріла» для балістичних

ракет великої дальності. Ця комплексна оборонна мережа є наріжним камінням національної безпеки Ізраїлю, особливо враховуючи його географічну близькість до ворожих утворень, які регулярно завдають ракетних ударів.

Мамади та мамаки є частиною системи «Мерхав Муган» (захищений простір), обов'язковою для нових будівель в Ізраїлі, призначеної для захисту мешканців від ракетних обстрілів та інших загроз, надаючи можливість швидко сховатись в укріпленій кімнаті.

З 1992 року більшість будинків в Ізраїлі (рис. 1.3) містять Мамад (Merhav Mugan Dirati) укріплену, окрему кімнату в кожній квартирі, тоді як інші мають загальний безпечний простір на поверсі будівлі, так званий Мамак (Merhav Mugan Komati).

Безпечні кімнати Мамад і Мамак – товсті бетонні конструкції, призначені для захисту мешканців від ракетних ударів, уламків і навіть хімічних чи біологічних загроз. За звичайних обставин часто служать спальнями або домашніми офісами в приватних квартирах або приміщеннями для громадського користування в житлових будинках.



Рис. 1.3. Елементи системи «Мерхав Муган» в Ізраїлі: мамади, мамаки

В Україні чинний закон №7398, який забезпечує будівництво мережі захисних споруд цивільного захисту з метою безпеки громадян. Орган державного архітектурно-будівельного контролю може відмовити у видачі сертифіката про готовність будівлі до експлуатації, якщо забудовник не завершить роботи з обладнання бомбосховища [13,14].

## 1.2. Невирішені проблеми підземних приміщень

Порівняно з наземними приміщеннями, однією з відмінних рис підземних просторів є висока відносна вологість повітря, яка особливо характерна влітку. Вологе середовище в підземних приміщеннях відкритого планування має суттєвий вплив на здоров'я і комфорт людей, що там перебувають протягом тривалого часу, та безпеку експлуатації та термін служби офісного обладнання [17].

Вологість підземних приміщень потенційно може спричинити зростання шкідливих мікроорганізмів, а також призводити до корозійних процесів та пошкодження будівельних поверхонь і обладнання (рис. 1.4). Тому важливо і необхідно контролювати показники вологості, основним джерелом якої є вологі стіни, а також різкі перепади температур внутрішнього і зовнішнього повітря [18].



Рис. 1.4. Деградація поверхні стін підземного приміщення під дією ґрунтових вод

Вологість стін викликана такими причинами:

- випаровування залишків вологи з будівельних матеріалів: у процесі будівництва вода необхідна для зведення стін та фундаменту. Більша частина води випаровується в підземні простори, де відносна вологість може досягати 95% протягом перших двох років після будівництва, а далі поступово зменшуватися.
- проникнення ґрунтових вод крізь шар покриття: ґрунтові води можуть проникати крізь мікротріщини в будівельних матеріалах і конструкціях, а також проникають через шар покриття під дією осмотичного тиску [19]. Їх вплив є більш серйозним у весняний та осінній періоди, коли ґрунтові води сильні і рівень ґрунтових вод високий;
- потрапляння зовнішнього вологого повітря, коли парціальний тиск водяної пари всередині будівельних конструкцій менший, ніж ззовні, водяна пара ззовні огорожувальних конструкцій дифундує всередину, що є звичайним процесом перенесення вологи в підземних приміщеннях.

Вологість стін безпосередньо залежить від місцевих геологічних і гідрологічних умов, розривів гірських порід, пори року, структурних форм покриттів, будівельних матеріалів, температури і вологості повітря в приміщенні, швидкості повітрообміну, а також від вологи, що виділяється в процесі будівництва [20].

Відповідно до Державних будівельних норм України (ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування") [21] у приміщеннях для тривалого перебування людей рекомендовано підтримувати оптимальний діапазон відносної вологості: 25–60%. При цьому допустимий діапазон 25–70 %

У період низьких температур зовнішнього повітря підтримання оптимальних умов здійснюється за рахунок роботи системи опалення [21], проте в переважній більшості перебудованих підземних приміщень не

передбачено таких систем за проектом, оскільки їх першочергове призначення не передбачало довготривалого перебування там людей.

Показники мікроклімату підземних приміщень унормовано таким чином: температура повітря — 20-24 °С [21] (джерело [22] передбачає нижчу температуру – 18–22 °С), допустимий діапазон [21] 19–25 °С (15-25 °С [22]); швидкість руху повітря — не більше 0,3 м/с [21,22];

Разом з тим, параметри мікроклімату формуються не лише завдяки функціонуванню систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, а й значною мірою залежать від теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій, як-от: коефіцієнт теплопровідності, термічний опір, паропроникність, теплотривкість [23]. Вибір будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій є визначальним для досягнення заданих параметрів мікроклімату в підземних приміщеннях, які проектуються в умовах сучасності [24]. Їх теплотехнічні показники — теплопровідність, теплотривкість та паропроникність — безпосередньо впливають на величину термічного опору й теплостійкість приміщень будівлі, що в комплексі забезпечує стабільність теплового режиму та комфортність внутрішнього середовища [25].

Оскільки велика кількість підземних приміщень відкритого планування першочергово не були призначені за своїм функціоналом для постійного перебування великої кількості людей, наявні системи теплопостачання не здатні забезпечити комфортних параметрів теплообміну, які, зазвичай, характеризуються нерівномірністю теплообміну та значною температурною стратифікацією [26].

Забруднювачі в підземних просторах – це тверді частинки (PM10, PM2.5), леткі органічні сполуки (ЛОС), чадний газ (CO), вуглекислий газ (CO2) та радон, часто у вищих концентраціях, ніж у зовнішньому повітрі, через погану природну вентиляцію [27,28].

На відміну від наземних просторів, якість повітря в підземних приміщеннях є особливо небезпечною. Загалом, важко досягти належної

циркуляції повітря в закритих підземних приміщеннях через відсутність вентиляції [29]. Крім того, застій забруднювальних речовин, як-от токсичний газ та  $PM_{2.5}$ , через недостатню вентиляцію може спричинити серйозні проблеми зі здоров'ям для працівників підземних приміщень відкритого планування [30].

Тим не менш, наразі не існує стандарту для вимірювання якості повітря в підземних просторах з урахуванням сезонних коливань або кількості людей, які користуються цими приміщеннями. Крім того, забруднення повітря частинками  $PM_{2.5}$ , вуглекислим газом ( $CO_2$ ), неприємними запахами та радоном ( $Rn$ ) зростає через відсутність належної вентиляції [31-35]. Забруднювачі повітря в підземних приміщеннях мають шкідливий вплив на організм людини. Оскільки  $PM_{2.5}$  мають відносно малий діаметр, вони потрапляють в організм через дихальні шляхи та глибоко проникають в альвеоли, викликаючи хронічний бронхіт, що може призвести до смерті при тривалому впливі високих концентрацій [36].  $CO_2$  – це безбарвний газ без запаху, який зазвичай викликає головний біль та підвищення кров'яного тиску, що є основним показником забруднення повітря в приміщенні, а при впливі високих концентрацій може стати смертельним через сплутаність свідомості [37]. Радон ( $Rn$ ), побічний продукт, що утворюється внаслідок безперервного розпаду урану (або торію), який міститься в природних матеріалах, як-от ґрунт або гірські породи, – це безбарвний, без смаку та запаху радіоактивний газ, який має ризик спричинити рак легенів [38-41]. Повідомлялося про наявність  $Rn$  переважно в приміщенні, ґрунті та воді. Серед них переважає концентрація  $Rn$ , оскільки корінні породи та ґрунт випромінюють високу концентрацію радону [42-44]. Через постійне розсіювання  $Rn$  та його продукти розпаду рідко досягають високих рівнів ззовні. Тому  $Rn$  вважається одним з основних забруднювачів повітря в приміщенні. Оскільки люди проводять більше часу в приміщенні, високий вміст  $Rn$  у приміщенні створює загрозу для людей [45,46]. Порівнюючи повітря в приміщенні та зовнішнє повітря, концентрація  $Rn$  виявляється вищою в приміщенні [47].

Концентрації радону в підземних будівлях в залежності від температури ґрунту, а саме взимку вони нижчі, ніж влітку, що є протилежним до ситуації над рівнем землі [48].

Пожежа в підземних спорудах, не пристосованих для перебування людей, має кілька особливостей. По-перше, гарячий дим не може бути вчасно відведений за відсутності системи димовидалення або димоподавлення, температура в приміщенні швидко підвищується, відведення теплоти ускладнене. По-друге, кількість диму велика і накопичується протягом тривалого часу. Неповне згоряння відбувається через недостатню вентиляцію. Концентрація токсичних газів, як-от чадний і вуглекислий газ, швидко зростає, а дим легко поширюється на інші ділянки. Нарешті, підземні приміщення будівлі мають обмежену кількість входів/виходів і велику відстань евакуації, що ускладнює евакуацію та гасіння пожежі. Пожежа в підземному приміщенні часто призводить до великих втрат [49].

Дим, спричинений пожежею, є основною причиною величезних жертв і матеріальних втрат під час пожеж у підземних приміщеннях. Характеристики пожежного диму в однорідному середовищі та в термічно стратифікованому середовищі вивчалися протягом багатьох років. Температура диму, що виділяється осередками пожежі, значно вища за температуру навколишнього повітря. Плавучість, спричинена різницею температур, може піднімати дим вгору. Під час підйому димовий шлейф захоплює навколишнє повітря з нижчою температурою. Оскільки за першочерговим призначенням більшість переобладнаних підземних приміщень не були розраховані на довготривале перебування значної кількості людей, системи димовидалення або апарати димоподавлення та автоматичні системи пожежогасіння й оповіщення зазвичай відсутні [50].

Вологість у підземних приміщеннях є основною причиною збільшення кількості мікроорганізмів. Відповідна температура і вологість сприяють зростанню мікроорганізмів на забруднених поверхнях (рис. 1.5).



Рис.1.5. Цвіль і грибок на стінах підземного приміщення.

При дослідженні підземних просторів [51], було виявлено, що кількість анаеробів у закритих приміщеннях у 4,2 та 3,8 рази перевищує число анаеробів у напівзакритих та відкритих відповідно [52]. Аналіз впливу параметрів повітря (температура, відносна вологість і швидкість припливного повітря) та кількості осадженого пилу на ріст мікроорганізмів у припливних повітроводах, довів, що відносна вологість є основним фактором, що впливає на зростання грибків при швидкості припливного повітря 3,0 м/с.

Бактерії в підземних просторах існують у різних формах, адаптованих до екстремальних умов, як-от брак світла та високий тиск, часто процвітаючи в багатих на поживні речовини ґрунтових водах або використовуючи хімічні джерела енергії з гірських порід чи газів. Бактерії в підземних середовищах можуть потрапляти в повітря, створюючи потенційну загрозу для здоров'я через вдихання у вигляді біоаерозолів [53].

Щоб гарантувати хорошу якість внутрішнього середовища підземних приміщень, необхідно вжити комплексних заходів контролю, зокрема підтримання підземного простору в сухому і чистому стані, дезінфекцію підземних приміщень, використання вологостійкого покриття/гігроскопічного матеріалу, правильне проектування, експлуатацію та обслуговування систем

вентиляції та кондиціонування повітря, використання ультрафіолетових ламп для знезараження повітря тощо.

Підземне середовище часто має значний негативний вплив на фізіологічний і психологічний стан, як-от психологічна депресія, нудьга, відчуття страху. Причинами є брак сонячного світла та видимості назовні, висока відносна вологість повітря, тіснота, погана якість повітря, гомогенне візуальне середовище (великі площі одноманітного кольору або однотипних елементів, що повторюються, як на рис. 1.1 і 1.4) тощо.

Психологічні проблеми, спричинені підземними приміщеннями, є складнішими. Результати досліджень показують, що навіть якщо внутрішнє середовище підземних будівель досягає такого ж рівня комфорту, як і в наземних будівлях, психологічні перешкоди все ще існують [54]. У підземних будівлях легко втратити відчуття напрямку, що може викликати напругу, тривогу та страх через невидимість форм будівель та відсутність зовнішніх орієнтирів, що забезпечуються вікнами. Тривале перебування в підземних будівлях призводить до того, що суб'єктивне сприйняття часу посилюється, зір та пам'ять погіршуються, зростає втома, знижується працездатність та захисні функції організму, а також виникають галюцинації [55]. Психологічне розпізнавання підземних просторів є важливим питанням, яке потребує глибоких та всебічних досліджень.

### **1.3. Потенційні ризики для здоров'я людини при довготривалому перебуванні у підземних спорудах**

Фактори внутрішнього середовища підземного приміщення запропоновано структурувати та класифікувати (рис. 1.6) таким чином [56]:

- параметри внутрішнього середовища (температура, відносна вологість, аероіонний склад повітря, освітлення),
- фізичні (шум, вібрація, інфразвук, електромагнітні поля),
- технічні (системи формування мікроклімату, техніка, обладнання),

- радіаційні (радон,  $\beta$  й  $\gamma$ -фон),
- психологічні (стрес від замкненого простору, дискомфорту, відсутності вікон та рослин)
- біохімічні (токсини, хімічні елементи, бактерії, пліснява, спори, віруси).

Внутрішня температура підземного приміщення є критично важливим фактором, що безпосередньо впливає на безпеку та самопочуття людини. Підтримання оптимального температурного режиму у підземних приміщеннях є фундаментальною вимогою для забезпечення теплового комфорту та збереження здоров'я людей.



Рис. 1.6. Класифікація небезпечних факторів підземних приміщень

Відхилення від унормованих температурних показників цих меж може мати негативні наслідки, як-от надмірна втрата організмом вологи, виснаження системи терморегулювання, перегрівання організму, теплового удару та інших реакцій; низька температура призводить до зниження імунітету та застудних захворювань, негативного впливу на когнітивні функції та працездатність людини, поширення інфекційних захворювань [57].

Підвищена відносна вологість створює сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів, зокрема плісняви та грибків, які, утворюючи біоаерозолі, можуть стати причиною захворювань дихальної системи та алергічних реакцій [58].

Таким чином, підтримання оптимального рівня відносної вологості є ключовим аспектом забезпечення цивільної безпеки підземних просторів відкритого планування, що сприяє збереженню їхнього технічного стану, запобіганню ризикам для здоров'я людей.

У підземних просторах із недостатньою вентиляцією концентрація вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) зростає значно швидше, ніж у наземних будівлях. Це пояснюється обмеженим повітрообміном та великою кількістю людей, що перебувають у замкнутому просторі. Це явище здатне суттєво впливати на організм людини, а саме: при концентрації  $\text{CO}_2$  вище 1000 ppm (0,1%) спостерігається сонливість, зниження працездатності та концентрації уваги; рівні 2000–5000 ppm викликають головний біль, підвищена втома, запаморочення, зниження когнітивних функцій; при концентрації понад 10 000 ppm (1%) можливі порушення дихання, тахікардія, зниження м'язової координації; значення понад 50 000 ppm (5%) становлять безпосередню загрозу життю (гіпоксія, втрата свідомості, ризик смерті) [59].

Навіть незначне перевищення норми може викликати відчуття «задухи», тривожність, підвищену дратівливість, що в умовах масового перебування людей у підземних укриттях посилює стрес і паніку.

Підвищений рівень  $\text{CO}_2$  є індикатором низької ефективності вентиляційної системи. Його накопичення паралельно супроводжується

підвищенням вологості та концентрації інших шкідливих домішок (СО, радон, леткі органічні сполуки).

Якісні та кількісні характеристики освітлення підземних приміщень є одним із ключових чинників безпеки, працездатності та психологічного комфорту людини. Оскільки підземні простори позбавлені природного освітлення, штучне світло виступає єдиним джерелом візуальної орієнтації, а його параметри безпосередньо впливають на фізіологічний стан людини. Раціонально організоване освітлення знижує ризик травматизму, сприяє ефективній евакуації в умовах надзвичайних ситуацій та підвищує відчуття захищеності [60].

Недостатній рівень освітленості призводить до розвитку астенопії (зорового стомлення), може сприяти прогресуванню міопії, викликати головний біль та зниження гостроти зору.

Якісне світлове середовище знижує рівень тривожності та депресивних станів, сприяє підтриманню позитивного психоемоційного фону, що особливо важливо під час тривалого перебування у замкнутому просторі.

Недостатнє або нераціонально організоване освітлення призводить до швидкої зорової втоми, зниження концентрації уваги, помилок при виконанні точних чи відповідальних дій. Це може створювати додаткове навантаження на організм та знижувати ефективність виконання завдань.

Альтернативною проблемою, пов'язаною з браком природного сонячного світла, є можливий вплив на циркадний ритм, який контролює гормональні та нейрохімічні вивільнення, а також режим сну. Циркадний ритм контролюється циклом наявності та нестачі синьо-фіолетового спектру світла в середовищі працівника.

Неправильно організоване освітлення може бути не менш небезпечним, ніж його недостатність, оскільки може спостерігатися «ефект засліплення», який викликаний надмірно яскравими джерелами світла або їх відблисками, і може викликати тимчасове погіршення зору.

Нерівномірність освітлення, глибокі тіні та локальні перепади яскравості спотворюють сприйняття простору, відстані та руху об'єктів, що підвищує ризик травматизму. Характерний для низькоякісних джерел штучного освітлення «стробоскопічний ефект», викликаний мерехтінням джерел світла, може створювати ілюзію сповільненого або зміненого руху механізмів та об'єктів, що збільшує вірогідність виникнення небезпечних травматичних подій і дезорієнтації [61].

Відомі дослідження доводять, що мерехтіння штучного світла здатні викликати нейропсихологічний дискомфорт: дратівливість, підвищену втомлюваність, а в окремих випадках навіть провокувати епілептичні напади у чутливих осіб, які мають таке захворювання в анамнезі.

Таким чином, якість освітлення у підземних приміщеннях має не лише фізіологічну, а й соціально-психологічну значущість, безпосередньо впливаючи на рівень безпеки, працездатності та психоемоційної стабільності населення та потребує комплексних рішень по організації.

Шум і вібрація є також важливими факторами середовища підземних приміщень, що безпосередньо впливають на фізіологічний та психоемоційний стан людини. Проте загальний рівень впливу зовнішнього шуму і вібрації в таких приміщеннях суттєво менший через особливості локалізації і звукоізоляції ґрунту. Проте шум у замкненому підземному просторі має властивість підсилюватися через реверберацію (відбиття звукових хвиль від стін і стелі). Тривалий вплив шуму понад 55–60 дБ викликає підвищену втому, зниження концентрації уваги, порушення сну, головний біль, а при рівнях понад 85 дБ — ризик розвитку туговухості та патологій серцево-судинної системи [61].

Вібрація, що виникає від роботи інженерного обладнання, транспорту чи ударних хвиль, джерела яких розташовані поблизу підземних приміщень відкритого планування, поширюється через конструктивні елементи підземних споруд. Хронічний вплив вібрацій (особливо з низькими частотами до 20 Гц) може викликати вестибулярні розлади, нудоту, порушення

координації, підвищену тривожність та навіть розлади опорно-рухового апарату.

У поєднанні шум та вібрація створюють підвищене психоемоційне навантаження, що особливо небезпечно в умовах перебування великої кількості людей у підземних відкритих просторах [62].

Існують технічні методи покращення параметрів внутрішнього середовища, які базуються на використанні різних технічних засобів для зменшення дії шкідливих факторів. Наприклад, для оптимізації температури використовуються системи опалення та кондиціонування повітря.

Для покращення відносної вологості застосовуються зволожувачі або осушувачі та системи кондиціонування повітря; для освітленості – світлозахисні засоби та внутрішнє енергоефективне освітлення. Для боротьби з біохімічними факторами використовуються фільтри.

Тривога, пов'язана з підземними просторами, може виникати через занепокоєння щодо ізоляції або замкненості. До семи відсотків населення світу страждають від клаустрофобії. Клаустрофобія та інші тривожні розлади впливають на продуктивність праці, знижуючи продуктивність і концентрацію, а також збільшуючи кількість помилок. Доведено, що однією з можливих причин негативного ставлення до підземних просторів є відсутність сприйнятого контролю над навколишнім середовищем, який є наслідком відсутності вікон та кімнатних рослин, що оточують людину [63]. Відсутність прямого доступу до зовнішнього середовища та очікувані труднощі з орієнтуванням можуть спричинити невпевненість у собі, що, у свою чергу, призводить до зниження сприйнятого контролю, що, своєю чергою, створює враження, що підземне середовище є небезпечним та ненадійним.

Таким чином до основних факторів, які суттєво впливають на людей при довготривалому перебуванні у підземній захисній споруді можна віднести:

- надмірну скупченість населення: у замкнутому просторі швидко зростає рівень вуглекислого газу, вологи та температури, що призводить до утворення задушливого середовища та погіршення самопочуття;

- відсутність вентиляційних систем або їх функціональна невідповідність: більшість підвалів і технічних приміщень не обладнані ефективною вентиляцією, що сприяє накопиченню неприємних запахів, мікроорганізмів та продуктів життєдіяльності людей, що створює небезпеку масових інфекційних спалахів.
- висока вологість і загроза плісняви: підземні приміщення схильні до підтоплень і накопичення конденсату, що сприяє розвитку грибків і цвілі, які погіршують умови перебування та можуть викликати алергічні реакції й захворювання органів дихання.
- епідеміологічні ризики: інфекційні хвороби можуть швидко поширитися серед більшості людей, які перебувають у замкненому підземному приміщенні, що особливо небезпечно для дітей, людей похилого віку та осіб із хронічними захворюваннями.
- психоемоційні наслідки: відсутність сонячного світла, рослин, «важке» повітря, неприємні запахи та відсутність мінімального комфорту підсилюють відчуття страху й паніки, сприяють розвитку психологічного виснаження.

#### **1.4. Висновки за розділом 1**

Воєнні дії на території України зумовили необхідність переосмислення підходів до організації безпечного робочого середовища для працівників різних галузей. Одним із пріоритетних напрямів стало використання наявних підземних приміщень для розміщення робочих просторів, що обумовлено підвищеним рівнем захищеності від зовнішніх загроз.

Підземні простори мають низку переваг у контексті забезпечення безпеки: вони виступають природним бар'єром від вибухових хвиль, уламків та інших наслідків обстрілів, що значно знижує ризики для життя і здоров'я людей та дозволяє зробити робочий процес відносно безперервним і продуктивним. Водночас організація таких робочих середовищ висуває нові вимоги до систем формування мікроклімату. Приміщення підземного

розташування переобладнані під робочі простори, характеризуються рядом негативних факторів, які можуть впливати на фізичний та психоемоційний стан людини. Відсутність природного освітлення порушує циркадні ритми, знижує продуктивність праці та може сприяти розвитку афективних розладів. Обмежена вентиляція призводить до накопичення вуглекислого газу, радону та інших шкідливих газів, що негативно впливає на когнітивні функції та підвищує ризик онкологічних захворювань. Підвищена вологість створює сприятливі умови для розвитку грибків і бактерій, що може провокувати алергічні реакції та дискомфорт. Температурна нестабільність у приміщеннях призводить до утворення зон перегріву або переохолодження, знижуючи ефективність роботи.

Замкнутість простору та монотонність інтер'єру негативно впливають на психоемоційний стан працівників, підвищуючи тривожність і знижуючи продуктивність. Забезпечення комфортних умов у підземних приміщеннях є критично важливим фактором для підтримання фізичного та психоемоційного стану людини під час довготривалого перебування. У цьому контексті створення інтегрованих систем контролю та управління параметрами внутрішнього середовища є критично важливим. Такі системи дозволяють забезпечити не лише базову безпеку перебування, але й підтримати умови, що відповідають сучасним гігієнічним та ергономічним вимогам до робочих просторів.

Оптимізація умов внутрішнього середовища у поєднанні з рослинним оздобленням створює комплексний підхід до забезпечення комфорту у підземних робочих просторах, що є необхідною умовою для підтримання здоров'я та високої продуктивності праці протягом тривалого часу.

## РОЗДІЛ 2

### ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМФОРТНОГО СЕРЕДОВИЩА ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕНЬ ВІДКРИТОГО ПЛАНУВАННЯ

#### **2.1. Методика вимірювання параметрів внутрішнього середовища підземних приміщень відкритого планування**

З метою отримання достовірної інформації про кількісні показники параметрів комфортного і безпечного середовища було обрано стратегії та методики визначення рівнів факторів підземних приміщень відкритого планування. Для дослідження було обрано приміщення підземного Coworking-центру, переобладнаного з підвального приміщення будівлі навчального закладу. Зазначене приміщення розташоване в Полтавській області (центральна Україна), середній час повітряних тривог у якій у середньому становив за 2023/2024 навчальний рік 28 годин на робочий тиждень. Вимірювання відбувалося у приміщенні, об'ємом 270 м<sup>2</sup> (висота 2,7 м, площа 100 м<sup>2</sup>) при одночасному перебуванні в ньому 40 осіб з низьким характером навантаження й рухливості, що характерно для працівників офісів.

Дослідження температурної стратифікації в приміщенні дозволяє визначити вертикальний розподіл температури у просторі та з'ясувати вплив вентиляції, матеріалів огорожувальних конструкцій і тепловологісного режиму на мікроклімат приміщення та розподіл температур. Для фіксації даних температури було використано цифрові термометри на основі виносного датчика температури DS18B20 (діапазон вимірювання від мінус 55 до плюс 125 °С; похибка  $\pm 0.5$  °С в діапазоні від мінус 10°С до плюс 85°С, роздільна здатність 12 біт). Розташування точок контролю було виконано на вертикальному розрізі з датчиками у чотирьох очках від підлоги до стелі на 3 рівнях (0,2 м, 1,5 м, 2,5 м) [64]. Вимірювання проводилося на всіх рівнях одночасно після витримування протягом 20 хвилин для стабілізації показників

до початку дослідження. Для оцінки показників температури фіксували середнє значення кожного рівня.

Отримана в результаті температурна стратифікація (рис. 2.1) створює дискомфорт для людей, погіршує якість повітря та підвищує витрати енергії. Ефективним вирішенням виявленої проблеми відповідно до [65] є контроль і оптимізація циркуляції повітря (вентиляція, перемішування потоків), що допомагає мінімізувати ці шкідливі ефекти.

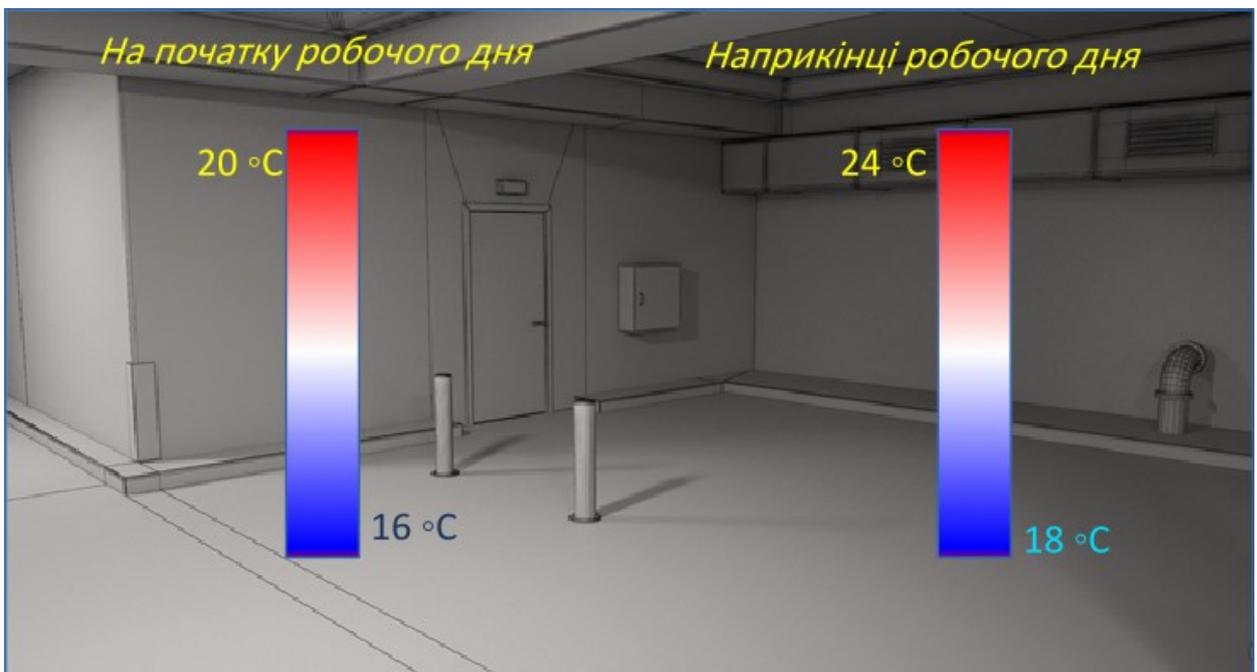


Рис. 2.1. Температурна стратифікація в підземному приміщенні

Згідно з отриманими усередненими результатами розподілу температури приміщення Coworking-центру відкритого планування підземного розташування очевидно, що температурна стратифікація потребує корекції за допомогою технічних рішень для досягнення задовільних показників комфортності. Різниця температур між рівнем підлоги і стелі у 6 °C наприкінці дня вимагає перегляду підходів до організації вентиляції та кондиціонування повітря, оскільки окрім температурного дискомфорту людей може додатково провокувати підвищення вологості та випадку вологи на поверхні стін і підлоги і потенційний ріст цвілі на цих поверхнях.

Для оцінювання відносної вологості повітря використовували гігрометри (Benetech GM1360, діапазон вимірювання від 5% до 98%, похибка до 3% RH), які розташували у 4 точках приміщення. Відносну вологість повітря вимірювали в тих самих точках, що й температуру. Час вимірювання становив 24 години. Показники значення вологості фіксували протягом 5 діб підряд у теплу пору року і 5 діб підряд у холодну пору року (рис. 2.2).

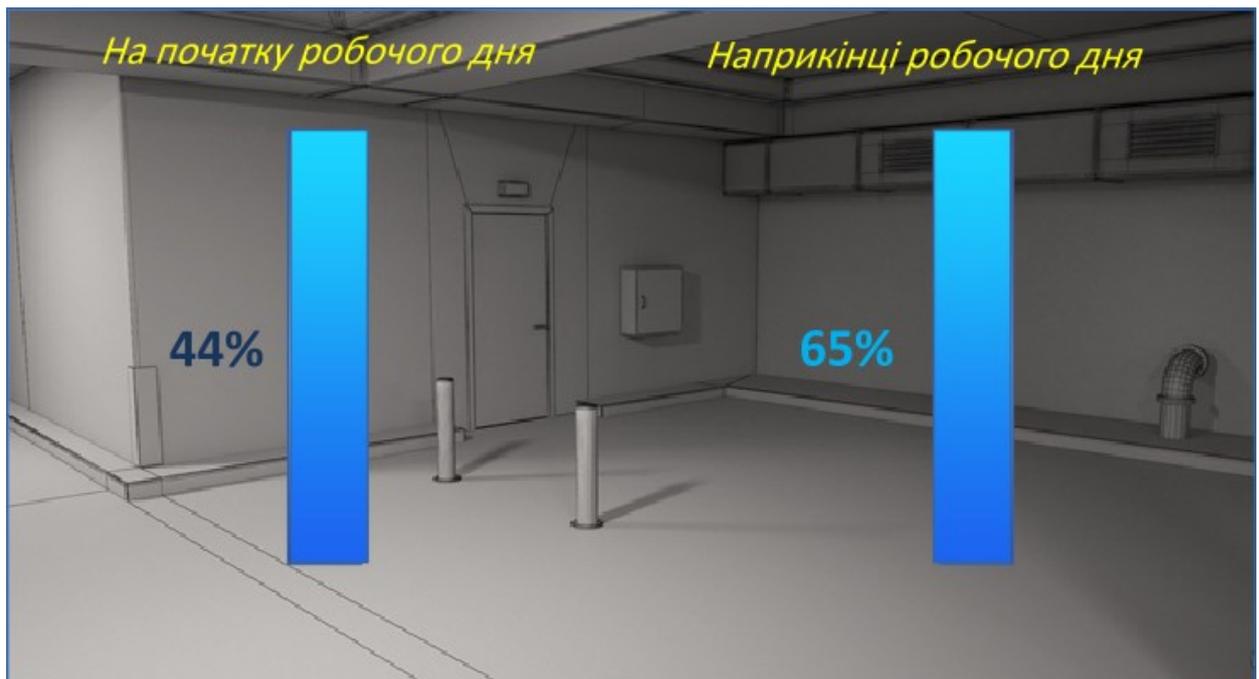


Рис. 2.2. Результати вимірювання показників вологості в підземному приміщенні

Визначені показники вологості вище 65% потенційно створюють ідеальне середовище для появи спор грибків. Неналежна вентиляція та відсутність природного освітлення прискорюють поширення колоній. Грибок уражає бетон, цеглу, дерево, ізоляційні матеріали, навіть фарбу, що призводить до руйнування оздоблювальних матеріалів і носійних конструкцій (цегла стає крихкою, дерево гниє), з'являється стійкий неприємний запах. Основні види цвілі, характерні для підземних приміщень, це [66]:

- чорна цвіль (*Stachybotrys chartarum*, *Aspergillus niger*) – найнебезпечніша і токсична, виділяє мікотоксини, які можуть впливати на

нервову систему, викликати головний біль, запаморочення та навіть зниження концентрації уваги;

- зелена цвіль (*Cladosporium, Penicillium*) – викликає алергії та хронічні хвороби дихання.
- біла цвіль (*Mucor*) – швидко поширюється на дерев'яних і бетонних поверхнях.

Спори грибків легко потрапляють у легені, викликаючи кашель, задишку, бронхіальні спазми. Таким чином, запровадження заходів для унормування вологості дозволить не тільки забезпечити вологісний комфорт, а сприяти здоровій мікрофлорі приміщення і зменшенню розповсюдженню колоній бактерій і мікроорганізмів, шкідливих для організму людини.

З метою визначити концентрації вуглекислого газу у повітрі підземного приміщення відкритого планування, оцінити ефективність вентиляції та можливі ризики для людей, встановити просторовий розподіл CO<sub>2</sub> у різних зонах приміщення виконано дослідження розподілу його концентрації в підземному приміщенні. Для вимірювання використано датчики CO<sub>2</sub> MCOEMH9-CO2-230 (Діапазон вимірювання 0...2000 ppm). Висотою розташування датчика обрано зону дихання людини, яка працює сидячи (1,2 м від рівня підлоги). Тривалість спостережень за динамікою зміни CO<sub>2</sub> становила 24 год на добу протягом 5 діб (робочий тиждень).

Детальну увагу було приділено годинам роботи вентиляції та перебування людей. Отримані результати (рис. 2.3) було прирівняно до нормативних показників, згідно з якими, значення CO<sub>2</sub> < 1000 ppm – прийнятно, > 2000 ppm – небезпечно для тривалого перебування [67].

Отримані результати показали, що системи вентиляції у підземних спорудах потребують особливої уваги до факторів, пов'язаних зі скупченням людей та накопиченням вуглекислого газу CO<sub>2</sub>. Фізіологічно людина в процесі дихання виділяє CO<sub>2</sub> близько 20 дм<sup>3</sup>/год

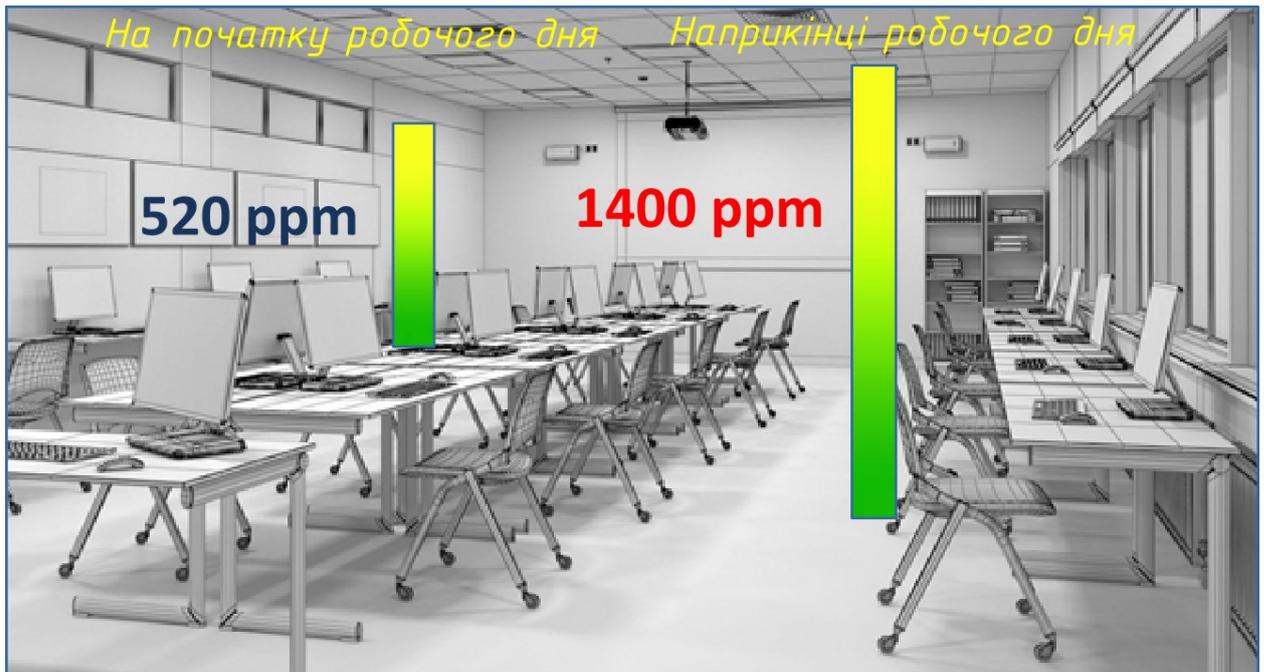


Рис. 2.3. Результати вимірювання показників вологості в підземному приміщенні

За умов масового перебування людей у замкненому просторі концентрація вуглекислого газу може досягати критичних значень у відносно короткий проміжок часу.

Нормативно безпечним вважається рівень до 800–1000 ppm, при якому забезпечується комфортне самопочуття та збереження когнітивних функцій. Підвищення концентрації до 1500 ppm спричиняє погіршення концентрації уваги та відчуття втоми, а при перевищенні 2000 ppm виникають головні болі, сонливість, зниження працездатності.

Таким чином, при плануванні вентиляції підземних приміщень необхідно враховувати: кількість людей, які можуть одночасно перебувати у приміщенні; регламентовані рівні CO<sub>2</sub> як ключовий показник якості повітря; використання автоматизованих систем контролю вуглекислого газу для регулювання повітрообміну.

Для оцінювання руху повітряних мас у приміщенні Coworking-центру, визначення швидкості і напрямку руху повітря в різних зонах підземного приміщення та з метою виявлення застійних ділянок чи областей з надмірним повітрообміном і оцінки ефективності роботи вентиляційної системи було

виконано вимірювання швидкості руху повітря за допомогою анемометра з телескопічним зондом BENETECH GM8903 з діапазоном вимірювань 0,1 ~ 30 м/с, точністю вимірювань  $\pm 3$  %. Анемометр було розташовано в точках вимірювання температури. Визначено кілька вертикальних профілів у приміщенні. Точки вимірювань: біля підлоги (0,2 м), у зоні дихання (1,5 м), під стелею (2,0–2,5 м).

Біля вентиляційних решіток додаткові заміри не проводили. Після встановлення анемометра у вибраній точці, витримано 30–60 с до стабілізації показів. Проведено серію з 3–5 вимірювань, причому в кожному вимірюванні обчислювач приладу усереднив по 50 значень, і визначено середнє значення. Для отримання загальної картини руху повітряних мас з урахуванням інтенсивності руху людей в приміщенні виконано заміри протягом трьох робочих годин. Оскільки наявна вентиляція не дозволяє динамічно змінювати режим і працює в єдиному стаціонарному режимі, моніторинг вентиляції не проводився.

Результати вимірювання (рис. 2.4) дозволили виявити зони застою повітря біля поверхні підлоги ( $< 0,1$  м/с), при цьому значення швидкості руху повітря у робочій зоні для комфортних умов, згідно нормативних вимог (оптимально 0,1–0,3 м/с), не відповідають нормі, що свідчить про неефективну вентиляцію приміщення. Якщо зазначені параметри повітряного середовища є відчутними, то особлива небезпека радіоактивного ізотопу радону полягає в повній відсутності негайного впливу на самопочуття.

В підземних приміщеннях концентрація радону може перевищувати гранично допустимі рівні через обмежений повітрообмін та прямий контакт із ґрунтовими породами. Тривале перебування людини в середовищі з підвищеною концентрацією радону підвищує ризик розвитку онкологічних захворювань дихальної системи, зокрема раку легень. Контроль його рівнів є обов'язковим для оцінки безпеки умов перебування.

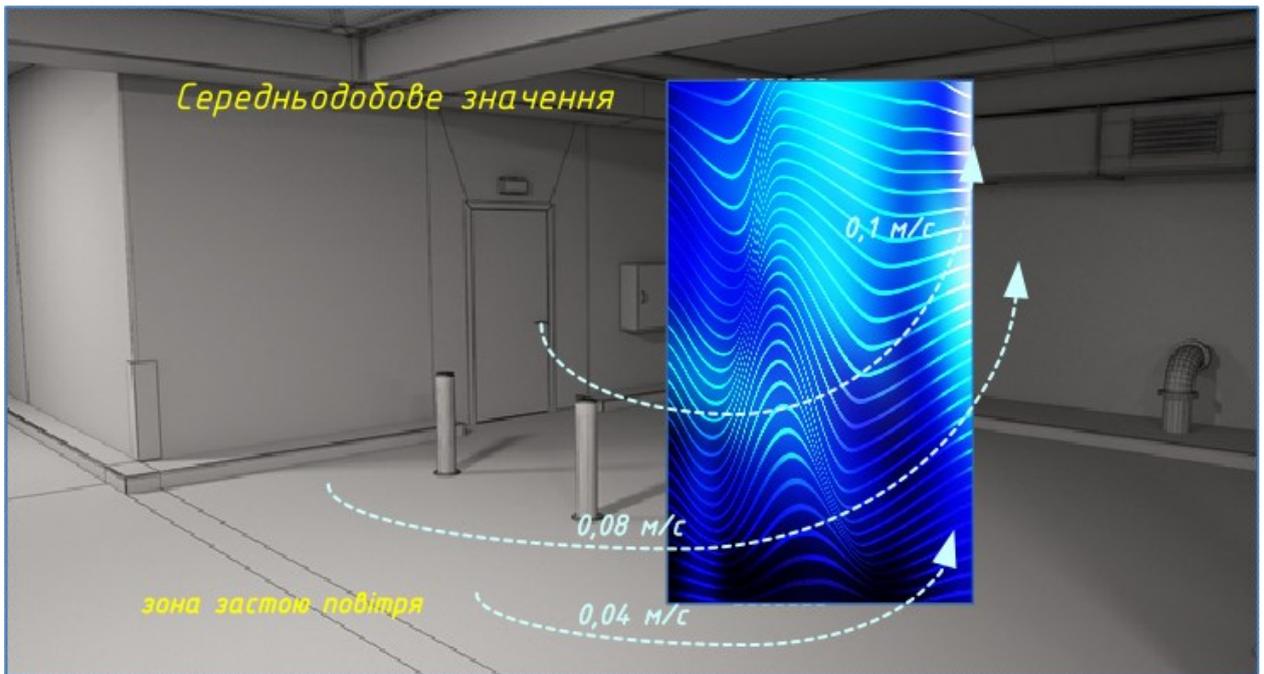


Рис. 2.4. Результати вимірювання швидкості руху повітряних мас в підземному приміщенні

Основними методами вимірювання є пасивні (інтегральні) та активні (оперативні) методи [68,69]. У пасивних використовуються твердотільні трекові детектори (CR-39, LR-115) або активоване вугілля. Детектори розміщуються у приміщенні на висоті 0,8...1,5 м від підлоги, уникаючи прямих потоків повітря. Тривалість експозиції — від 1 місяця до 1 року. Після експозиції детектори аналізуються в лабораторії, що дозволяє визначити середньорічну концентрацію радону.

Активні методи передбачають використання електронних радон-моніторів (наприклад, AlphaGUARD, Rad7). Прилади дають можливість у реальному часі фіксувати коливання рівнів радону, а також оцінювати вплив температури, вологості та вентиляції. Тривалість вимірювання може становити від кількох годин до кількох тижнів.

Відповідно до норм радіаційної безпеки України та рекомендацій ВООЗ: рекомендований рівень: до 100 Бк/м<sup>3</sup>; гранично допустимий рівень: 200–300 Бк/м<sup>3</sup> (залежно від призначення приміщення) [68].

Вимірювання радону слід проводити у різні пори року (зазвичай максимальні рівні фіксуються взимку). Рекомендується поєднувати інтегральні та оперативні методи для отримання найбільш повної картини. Моніторинг має здійснюватися у місцях тривалого перебування людей (спальні зони, робочі приміщення, укриття).

У даній роботі використано радон-монітор AlphaE, АльфаЕ Saphymo (Bertin Instruments), діапазон вимірювань від 20 Бк/м<sup>3</sup> ... 10 МБк/м<sup>3</sup> ( від 0,54 пКі/літр до 270 нКі/літр), похибка становить до 10%.

Отримані результати (рис. 2.5) показують необхідність контролю та унормування рівнів радону для даного приміщення в залежності від пори року.

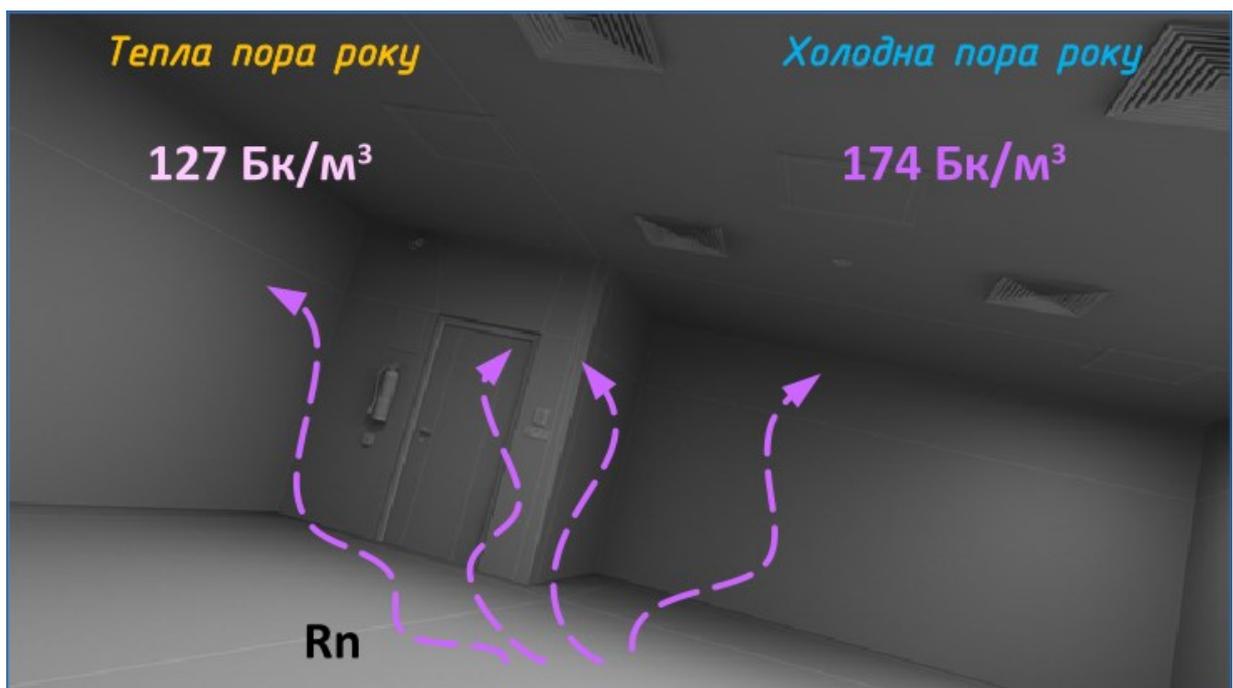


Рис. 2.5. Результати вимірювання рівнів радону в підземному приміщенні

Таким чином ефективно унормування показників радону в підземних приміщеннях вимагає комплексного підходу, що включає інженерно-будівельні заходи (герметизація та депресуризація), організацію механічної вентиляції та систематичний моніторинг. Реалізація зазначених методів

дозволить контролювати рівень радону у межах нормативних значень і мінімізувати ризики радіаційного впливу на людину.

## **2.2. Соціологічне визначення найбільш значущих показників комфортності підземних приміщень**

Для комплексної оцінки умов перебування людей у підземних приміщеннях доцільно застосовувати соціологічне опитування, спрямоване на виявлення суб'єктивних відчуттів та індивідуальних оцінок комфортності мікроклімату.

Метою опитування є визначення рівня задоволеності працівників Coworking-центру підземного розташування умовами перебування (мікроклімат, освітлення, вентиляція, шум, санітарно-гігієнічний стан), виявлення факторів, що викликають найбільший дискомфорт та формування базових даних для корекції показників і модернізації підземних укриттів та приміщень відкритого планування. Зазначене приміщення було переобладнано з підвального приміщення під навчальним закладом.

Для проведення опитування було виділено вибірку респондентів, а саме: анкетованими мають бути особи різного віку, статі та стану здоров'я, мінімальний обсяг вибірки має становити не менше 200 осіб для забезпечення репрезентативності та враховувати особливості осіб, які зазвичай працюють або навчаються в підземних приміщеннях відкритого планування.

Для проведення опитування було розроблено анкету, яка містила основні блоки питань:

- загальна інформація про опитуваного: стать, вік, кількість годин, які в середньому людина проводить у підземних просторах;
- показники мікроклімату: температура, відносна вологість повітря, якість повітря, відчуття задущливості;
- освітлення: достатність, рівномірність, вплив на зоровий комфорт;

- рівень загального комфорту: рівень втоми і рівень готовність перебувати тривалий час.

Анкетою передбачено відкриту відповідь, яка передбачає, що саме покращило рівень комфорту у підземному офісі на думку опитаних. Такий інструмент покликаний виявити додаткові фактори комфортного середовища, які не враховано переліком основних запитань.

Для обробки отриманих результатів було використано статистичні методи аналізу (середні значення, стандартне відхилення, кореляційний аналіз) [70].

З метою візуалізації результатів опитування та виявлення критичних факторів дискомфорту наведено таблицю, яка імітує анкету та відображає ранжування значущості результату. Кольорами позначено ступінь ризику, загрози показника для людини та виділено найважливіші параметри, які на думку опитаних, потребують корекції і унормування для досягнення найкращих показників комфорту.

Загальний вид анкети наведено на рис. 2.6. Результати опитування (табл. 2.1) показали, що показники мікроклімату не відповідають бажаним і безпечним для осіб, що постійно перебувають та здійснюють свою трудову діяльність у підземних офісах.

До основних факторів дискомфорту, на думку опитаних, можна віднести незадовільні тепло-вологісні показники, погану якість повітря, швидку втомлюваність, неможливість концентрації уваги, різницю температур між підлогою і робочою зоною. Натомість, показники рівня освітленості для даного приміщення відчуються респонденти як такі, що цілком або майже цілком задовольняють комфортні умови перебування.

Щодо відкритого питання, то більшість опитаних відзначила у якості побажання, передбачити можливість розміщення кімнатних рослин у просторі підземного приміщення, що дозволяє зменшити відчуття тривоги і дискомфорту від замкненого простору.

<b>АНКЕТА ОЦІНЮВАННЯ КОМФОРТНОСТІ ПЕРЕБУВАННЯ В ПІДЗЕМНОМУ ОФІСІ</b>	
<b>Інструкція:</b> Будь ласка, оцініть умови Вашого робочого місця за останній робочий день. Усі відповіді анонімні та використовуються лише для наукового дослідження комфорту в підземних приміщеннях	
<b>1. Загальна інформація:</b>	
Вік: _____ Стать: <input type="checkbox"/> Чоловік <input type="checkbox"/> Жінка <input type="checkbox"/> Інше	
Середній час роботи в підземному офісі: <input type="checkbox"/> менше 3 год <input type="checkbox"/> 3–6 год <input type="checkbox"/> 6–9 год <input type="checkbox"/> понад 9 год	
<b>2. Температура:</b>	
1. Як би Ви оцінили температуру у Вашому робочому приміщенні? <input type="checkbox"/> Холодно <input type="checkbox"/> Комфортно <input type="checkbox"/> Спекотно	
2. Чи відчували Ви температурну нерівномірність (стратифікацію) у приміщенні? <input type="checkbox"/> Так, значну <input type="checkbox"/> Так, невелику <input type="checkbox"/> Ні, рівномірною	
<b>3. Вологість повітря</b>	
3. Як би Ви оцінили рівень вологості? <input type="checkbox"/> Низька (сухо) <input type="checkbox"/> Комфортна <input type="checkbox"/> Висока (волого)	
<b>4. Якість повітря</b>	
4. Чи відчуваєте Ви запахи, запиленість або задуху? <input type="checkbox"/> Так, сильно <input type="checkbox"/> Так, помірно <input type="checkbox"/> Ні, повітря комфортне	
<b>5. Освітленість:</b>	
6. Як би Ви оцінили освітленість Вашого робочого місця? <input type="checkbox"/> Тьмяне <input type="checkbox"/> Комфортне <input type="checkbox"/> Яскраве	
7. Чи відчуваєте ви зорову втому через освітлення? <input type="checkbox"/> Так, значну <input type="checkbox"/> Так, помірну <input type="checkbox"/> Ні	
<b>6. Втома та загальний комфорт</b>	
8. Як би Ви оцінили рівень Вашої втоми в кінці робочого дня? <input type="checkbox"/> Висока <input type="checkbox"/> Середня <input type="checkbox"/> Низька	
9. Загальний рівень комфортності перебування у підземному офісі: <input type="checkbox"/> Некомфортно <input type="checkbox"/> Задовільно <input type="checkbox"/> Комфортно	
<b>10. Додаткові коментарі:</b>	
Будь ласка, зазначте, що саме покращило б Ваш комфорт у підземному офісі: _____	

Рис. 2.6. Загальний вигляд анкети для соціологічного визначення найбільш значущих показників комфортності підземних приміщень

Декілька респондентів запропонували реалізувати інсталяцію з імітацією вікон і зображеннями ландшафтного дизайну, для створення відчуття відкритості простору і свободи.

Таблиця 2.1

## Результати опитування щодо визначення найбільш значущих показників комфортності підземних приміщень

1. Загальна інформація.	
Вік: _____ Стать: <input type="checkbox"/> Чоловік <input type="checkbox"/> Жінка <input type="checkbox"/> Інше	
Середній час роботи в підземному офісі: <input type="checkbox"/> менше 3 год <input type="checkbox"/> 3–6 год <input type="checkbox"/> 6–9 год <input type="checkbox"/> більше 9 год	
2. Температура	
1. Як би ви оцінили температуру у вашому робочому приміщенні?	
<input type="checkbox"/> Холодно	27%
<input type="checkbox"/> Комфортно	21%
<input type="checkbox"/> Жарко	52%
2. Чи відчували ви температурну нерівномірність (стратифікацію) у приміщенні?	
<input type="checkbox"/> Так, значну	39%
<input type="checkbox"/> Так, невелику	28%
<input type="checkbox"/> Ні, рівномірна	33%
3. Відносна вологість повітря	
3. Як би ви оцінили рівень вологості?	
<input type="checkbox"/> Низька (сухо)	2%
<input type="checkbox"/> Комфортна	42%
<input type="checkbox"/> Висока (волого)	56%
4. Якість повітря	
4. Чи відчуваєте ви запахи, запиленість або задуху?	
<input type="checkbox"/> Так, сильно	11%
<input type="checkbox"/> Так, помірно	52%
<input type="checkbox"/> Ні, комфортне	37%
5. Як би ви оцінили загальну якість повітря?	
<input type="checkbox"/> Погана	53%
<input type="checkbox"/> Задовільна	41%
<input type="checkbox"/> Добра	2%
5. Освітлення	
6. Як би ви оцінили освітленість вашого робочого місця?	
<input type="checkbox"/> Тьмяне	11%
<input type="checkbox"/> Комфортне	72%
<input type="checkbox"/> Яскраве	17%
7. Чи відчуваєте ви зорову втому через освітлення?	
<input type="checkbox"/> Так, значну	11%
<input type="checkbox"/> Так, помірну	74%
<input type="checkbox"/> Ні	15%
6. Втома та загальний комфорт	
8. Як би ви оцінили рівень вашої втоми в кінці робочого дня?	
<input type="checkbox"/> Висока	52%
<input type="checkbox"/> Середня	36%
<input type="checkbox"/> Низька	12%
9. Загальний рівень комфортності перебування у підземному офісі:	
<input type="checkbox"/> Некомфортно	20%
<input type="checkbox"/> Задовільно	68%
<input type="checkbox"/> Комфортно	12%

Додатково було відзначено можливість передбачення зон релаксації і відпочинку з облаштуванням побуту. Це дозволить частково знімати втому від напруженої праці протягом робочого дня.

Таким чином, найбільш значущими параметрами, які суттєво впливають на самопочуття людей, що працюють або перебувають у підземних приміщеннях відкритого планування протягом довготривалого часу є температура і відносна вологість повітря, якісні показники повітря та наявність кімнатних рослин для психологічного розвантаження і покращення рівня комфорту.

### **2.3. Висновки за розділом 2**

1. Методики вимірювання температурної стратифікації, рівнів вуглекислого газу, вологості, температури та радону дозволяють отримати характеристику мікрокліматичних та газових умов у підземних просторах, що дає можливість оцінити базові параметри підземного приміщення для його адаптації під робочий простір. Багаторівневе вимірювання температури виявляє стратифікацію та потенційні зони термічного дискомфорту, а моніторинг CO<sub>2</sub> і радону оцінює ефективність вентиляції та потенційний радіаційний ризик для здоров'я.

2. Використання комбінованих сенсорів температури та вологості дозволяє підтримувати оптимальні умови для фізичного та психоемоційного комфорту людей, запобігаючи розвитку конденсації та мікробіологічної активності патогенних мікроорганізмів. Систематичний контроль цих параметрів є необхідним для забезпечення безпечного і комфортного перебування в підземних робочих просторах, що було переобладнано з приміщень іншого функціонального призначення.

3. Проведене опитування серед працівників підземних просторів дозволяє оцінити суб'єктивне сприйняття мікрокліматичних та ергономічних умов, включаючи температуру, відносна вологість повітря, освітлення, шум та загальний психоемоційний комфорт. Аналіз отриманих даних дає змогу виявити ключові фактори дискомфорту, визначити пріоритети для корекції умов та адаптувати систему управління мікрокліматом і робочим середовищем

відповідно до потреб персоналу. Систематичне проведення таких опитувань є важливим інструментом для підвищення продуктивності, зниження стресових реакцій та забезпечення безпечних і комфортних умов праці у підземних робочих просторах.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ В ОФІСНИХ ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕННЯХ ВІДКРИТОГО ПЛАНУВАННЯ

#### 3.1. Дослідження процесів теплообміну підземних приміщень відкритого планування

Дослідження теплового комфорту в підземному будівництві раніше були досить масштабними. Прийнятний діапазон температур демонстрував асиметричний розподіл відносно комфортної температури. В роботах використовували температуру ґрунту та температуру зовнішнього повітря в різних регіонах як основу зонування.

Водночас, мікрокліматичні показники підземного середовища мають значний вплив на психологічний стан та ефективність праці персоналу [71]. Дослідження показало, що тривале перебування збільшує суб'єктивне сприйняття часу, погіршує зір та пам'ять, підвищує втому, знижує працездатність та захисні функції організму, а також виникають галюцинації.

Однак дослідження впливу теплового середовища підземних споруд на психологію персоналу та ефективність праці є відносно обмеженими, для умов ізоляції підземних споруд дослідження впливу теплового комфорту персоналу та ефективності праці в основному не мають результатів. В умовах ізоляції внутрішнє середовище має високу температуру, високу відносна вологість повітря та високу концентрацію вуглекислого газу, особливо якщо температура навколишнього середовища продовжує зростати, коли люди почуваються комфортно в цьому середовищі, їхня мотивація до навчання покращується, а також покращується продуктивність праці [72].

Завдяки вищезазначеним дослідженням було виявлено, що тепловий дискомфорт, спричинений перегрівом середовища, негативно впливає на психологію, фізіологію та працездатність людей [73].

Незадовільний стан тепловологісного режиму, відсутність рекомендацій щодо проєктування систем опалення та вентиляції підземних приміщень зі зниженою температурою внутрішнього повітря, переобладнаних в офісні приміщення та Coworking-центри відкритого планування, вимагають проведення досліджень для створення необхідного і комфортного мікроклімату в цих приміщеннях для забезпечення якнайкращих умов перебування персоналу протягом робочого дня і підтримки продуктивності праці.

Дослідження параметрів мікроклімату у підземних підвальних приміщеннях, які переобладнують під підземні офіси та центри (рис. 3.1), свідчать про вкрай незадовільний стан тепловологісного режиму у всіх цих приміщеннях. Пояснюється це тим, що реалізовані раніше проєктні рішення приймалися та приймаються згідно з чинними нормативними документами для підземних чи підвальних приміщень, що пристосовані для технічних потреб і не передбачає постійної присутності людей. Це широко прийнятий підхід до забезпечення допустимих внутрішніх параметрів повітря в підземних приміщеннях, що функціонує без постійної присутності людей. Відносна вологість та швидкість руху повітряних мас повітря у таких приміщеннях за відсутності спеціальних вимог не нормуються.

Зазначені приміщення відносяться до приміщень зі зниженою внутрішньою температурою та підвищеною вологістю. Це є причиною конденсації вологи з внутрішнього повітря не тільки на внутрішніх поверхнях захисних конструкцій, але й у їх товщі, а також на зовнішній поверхні. При високій відносній вологості внутрішнього повітря (більше 75%) та підвищеній вологості внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій дифузія водяної пари помітна навіть при малих значеннях парціального тиску повітря. Найінтенсивніший процес конденсації типовий для теплого періоду року, для якого характерно найбільш несприятливе поєднання температури та відносної вологості повітря.



Рис. 3.1. Загальний вигляд планування підземного приміщення відкритого планування

Усе це зумовлено відносною герметичністю підземного приміщення та непристосованістю систем вентиляції та осушування повітря для умов перебування великої кількості людей протягом тривалого часу.

При організації прямотечійної припливно-витяжної вентиляції, що найчастіше застосовується у проєктних рішеннях, передбачено подачу в приміщення в теплий період року необробленого зовнішнього повітря з параметрами, при цьому спостерігається інтенсивне випадання конденсату на внутрішніх поверхнях захисних конструкцій навіть при інтенсивному русі повітря [74-76].

Для створення необхідних санітарно-гігієнічних умов у підземних приміщеннях, переобладнаних під офісні приміщення та Coworking центри відкритого планування необхідним є організація примусової припливно-витяжної загальнообмінної вентиляції з регулюванням температури повітря або організована припливна та витяжна вентиляція з рециркуляційними осушувачами повітря, яка здатна забезпечувати параметри мікроклімату, необхідні для комфортного перебування людей протягом тривалого періоду [77-80].

Будівництво підземних, без надземної частини, споруд різного призначення активно розвивається останніми роками. У зв'язку зі специфічними умовами їх експлуатації виникла необхідність розробки адекватних і достовірних розрахункових методів та моделей, що відображають фактичні умови роботи підземної споруди, більш точних розрахунків температурно -вологісного режиму з метою створення необхідних умов для функціонування приміщення як Coworking-центри та офіси.

Тепловологісний режим підземних споруд і приміщень без надземної частини обмеженої довжини недостатньо вивчений як за технологічним призначенням, так і за конструктивно -планувальними рішеннями, особливо при переобладнанні такого типу приміщень під об'єкти з постійним перебуванням людей. У нормативних документах та на підставі проведених досліджень зазначається, що в підземних приміщеннях теплообмін із навколишнім середовищем менш інтенсивний порівняно із частково заглибленими спорудами через низьку теплопровідність навколишнього ґрунту. Встановлено, що в разі підтримання температури повітря в приміщенні, що відрізняється від природної температури ґрунту, навколо підземної споруди встановлюється зона її температурного впливу. При цьому недостатньою є кількість коректних даних із значеннями температур ґрунтів на різній глибині залежно від їх видів та вологості протягом року, з урахуванням регіональних та територіальних особливостей. Неврахування цього фактору знижує достовірність розрахунків теплового режиму і не може бути визнана задовільною для створення необхідних умов мікроклімату для продуктивної роботи персоналу.

Для попередньої оцінки впливу температури ґрунту, що контактує із зовнішньою поверхнею підземної споруди, прийнято умову, що у приміщенні відсутнє надходження вологи від технологічного устаткування, та її наявність зумовлена теплопередачею випаровуванням присутнього персоналу та рослинності. Значення температури внутрішнього повітря в підземному приміщенні, що є умовно герметичною камерою, при розрахункових

параметрах зовнішнього повітря в теплий період року встановлюється з рівняння теплового балансу [81]:

$$\Phi_s = \Phi_l \quad (3.1)$$

де  $\Phi_s$  – надходження теплоти до підземного приміщення (надлишкова теплота від примусової припливно–витяжної вентиляції, від технологічних процесів, надходження теплоти через покриття), Вт;

$\Phi_l$  – втрати теплоти з приміщення в навколишній масив ґрунту, Вт.

Складемо рівняння теплового балансу для підземного приміщення відкритого планування [81]. Повний розрахунок опору теплопередачі для кожної стіни та підлоги призведе до багатопараметричної моделі, яку важко аналізувати. Тому звернемо увагу на рівномірне оточення огорожень ґрунтом, який має значущий опір теплопередачі. Це зменшує відносний вплив похибок визначення опору теплопередачі конструкцій та тепловіддачі з внутрішнього боку. Тому замінюємо приміщення еквівалентним циліндром діаметром внутрішнього перерізу та заввишки, відповідно, м,

$$DIDA = 4 \cdot S / \Pi, Lr = L + 2 \cdot H, \quad (3.2)$$

де  $L$  – найбільший розмір (довжина) приміщення;

$H$  – висота приміщення;

$A$  – площа підлоги за внутрішніми обмірами;

$\Pi$  – внутрішній периметр.

$$\Phi = \Phi_v + \Phi_e + \Phi_p = \frac{\theta_{IDA} - \theta_{gr}}{R_{ir} + R_{tc} + R_{gr}} \cdot Lr \quad (3.3)$$

де  $\Phi_v$  – теплонадходження до споруди з припливним повітрям під час роботи загальнообмінної вентиляції, Вт.

$\Phi_e$  – теплонадходження від технологічних процесів та обладнання (приймається за паспортами на обладнання та коефіцієнтом використання), Вт;

$\Phi_p$  – теплонадходження від людей, Вт,

$\theta_{IDA}$  – температура повітря всередині, °С;

$\theta_{gr}$  – середня температура ґрунту протягом року на середній глибині закладення споруди, °С (температури ґрунту, що контактує із зовнішньою поверхнею огорож підземної споруди);

$R_{ir}$  – опір тепловіддачі внутрішньої поверхні стіни, приведений до довжини еквівалентного циліндра, (м·К) / Вт;

$R_{tc}$  – опір теплопередачі огорожувальних конструкцій приміщення (м·К)/Вт, приведений до 1 м довжини приміщення;

$R_{gr}$  – опір теплопередачі ґрунту, приведений до 1 м довжини приміщення, (м·К) / Вт;

$L_r$  – приведена довжина замкнутого контуру підземного приміщення,  
 $L_r = L + 2 \cdot H$ ;

$L$  – найбільший розмір (довжина) приміщення;

$H$  – висота приміщення.

Теплонадходження до споруди з припливним повітрям

$$\Phi_v = 0,28 \cdot \rho \cdot V \cdot n \cdot (\theta_{IDA} - \theta_v), \quad (3.4)$$

де  $\rho$  – густина повітря (1,2 кг/м<sup>3</sup> відповідно до [21]);

$V$  – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;

$n$  – розрахункова (нормативна) кратність повітрообміну;

$\theta_{SUP}$  – температура припливного повітря в літній період, °С.

Теплонадходження від людей, Вт:

$$\Phi_p = (\Phi_{pk} + \Phi_{pr} + \Phi_{pv}) \cdot N \quad (3.5)$$

де  $\Phi_{pk}$  – тепловіддача людини конвекцією, Вт;

$\Phi_{pr}$  – променева тепловіддача людини, Вт;

$\Phi_{pv}$  – тепловіддача людини випаровуванням, Вт;

$N$  – кількість людей у приміщенні.

Опір тепловіддачі внутрішньої поверхні, м·К/Вт

$$R_{ir} = 1/(\pi \cdot \alpha \cdot D_{IDA}), \quad (3.6)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до стіни приміщення,  
 $\alpha = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Опір тепловіддачі огорожувальних конструкцій, м·К/Вт

$$R_{ir} = \ln(D_{out}/D_{IDA})/(\pi \cdot \alpha \cdot \lambda), \quad (3.7)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м·К),

$D_{out}$  – еквівалентний діаметр зовнішнього перерізу стін:

$$D_{IDA} = 4 \cdot S_{out} / \Pi_{out}; \quad (3.8)$$

$S_{out}$  – площа зовнішнього перерізу стін, м<sup>2</sup>;

$\Pi_{out}$  – периметр внутрішнього перерізу приміщення, м.

Опір теплопередачі ґрунту, м·К/Вт:

$$R_{gr} = \ln(4h_{gr}/D_{out})/(\pi \cdot \alpha \cdot \lambda_{gr}), \quad (3.9)$$

де  $\lambda_{gr}$  – коефіцієнт теплопровідності ґрунту, Вт/(м·К);

$h_{gr}$  – глибина занурення до ґрунту, м.

Для оцінювання впливу кількості працівників чи відвідувачів підземних приміщень та Coworking-центрів відкритого планування на тепловологісні показники було проведено дослідження зміни температури і вологості на початку та в кінці робочого дня в літній період року. При цьому вимірювання (рис. 3.1, табл. 3.1, 3.2) відбувалося у приміщенні об'ємом 270 м<sup>2</sup> при

одночасному перебуванні в ньому 40 осіб при низькому характері навантаження і рухливості, що характерно для працівників офісів. Датчики температури і вологості було розташовано в 4 точках зазначеного приміщення у геометричних центрах трикутників, утворених перетином діагоналей приміщення на висоті 1,5 м, що відповідає індивідуальній зоні комфорту працівників. Додатково було встановлено датчики у кутах кімнати для моніторингу тепловологісних показників в місцях найменшого перебування працівників [81].

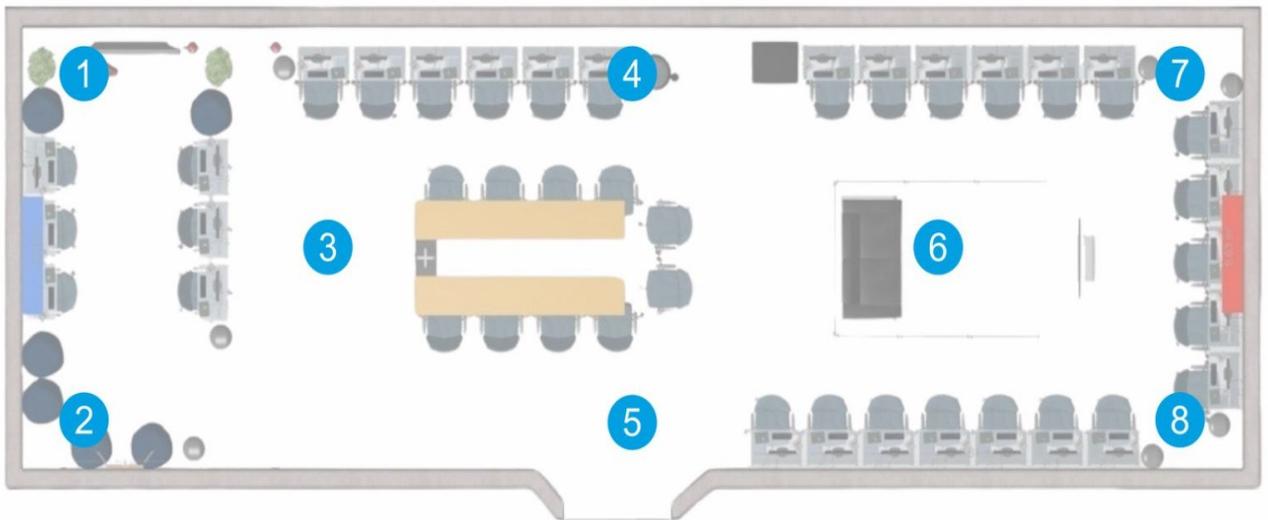


Рис. 3.1. Схема розташування датчиків для моніторингу тепловологісних характеристик приміщення відкритого планування

При проведенні дослідження система припливно-витяжної вентиляції працювала з постійною швидкістю подачі повітря та постійною температурою.

За результатами поточного опитування працівників протягом дня, майже всі присутні відмітили некомфортні умови для перебування у приміщенні, важкість дихання і втому, а також неможливість концентрації уваги при виконанні звичайних оперативних завдань, що зумовлено підвищенням температури і вологості (табл. 2.1).

Таблиця 3.1

**Результати вимірювання температури повітря протягом робочого дня**

Датчик	Температура повітря, °С, у момент часу			
	8:00	11:00	14:00	17:00
1	18	21,5	22,5	25,5
2	19	21,5	23	24,5
3	20	21,5	22,5	25
4	20	22	24	26
5	19	21,5	22	24
6	19	20,5	22	24,5
7	18	21	22	25
8	18	21	23	24

Таблиця 3.2

**Результати вимірювання відносної вологості повітря протягом робочого дня**

Датчик	Відносна вологість повітря, %, у момент часу			
	8:00	11:00	14:00	17:00
1	43	52	58	65
2	41	50	55	63
3	42	48	57	61
4	42	50	56	64
5	41	47	52	57
6	42	49	57	60
7	43	50	59	66
8	44	50	59	65

Таким чином для найбільш ефективного управління тепловологісними показниками доцільно переобладнувати підземні приміщення з реалізацією комбінованих схем припливно-витяжної вентиляції (рис. 3.2).

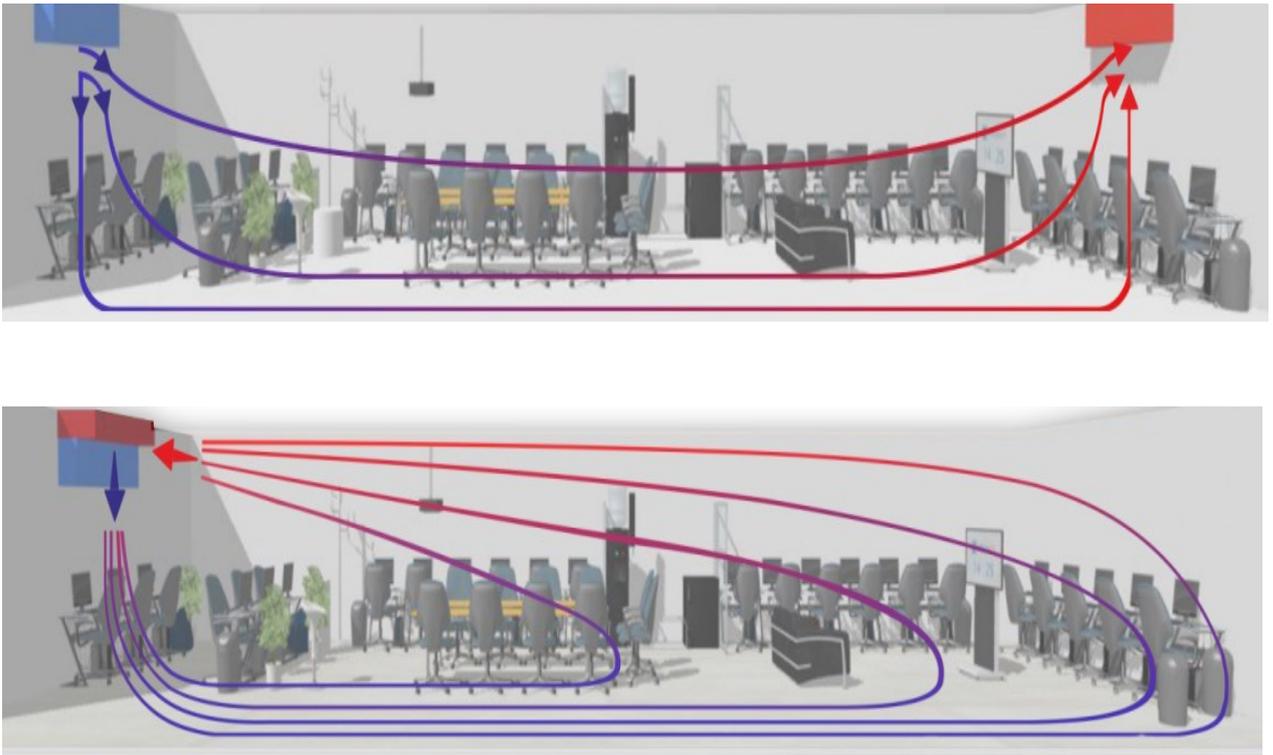


Рис. 3.2. Схема реалізації комбінованої припливно-витяжної вентиляції для унормування тепловологісних показників підземних приміщень відкритого планування

Такий комплексний підхід сприятиме активному циркулюванню повітря та регуляції комфортних температурних і вологісних показників простору з урахуванням особливостей планування, заглиблення, типу ґрунту, пори року і наявної кількості людей у приміщенні.

### **3.2. Дослідження параметрів якості повітря підземних приміщень відкритого планування**

На відміну від наземних просторів, якість повітря в підземних приміщеннях є особливо небезпечною. Загалом, важко досягти належної циркуляції повітря в закритих підземних приміщеннях через відсутність природної вентиляції [82]. Крім того, застій забруднювальних речовин, як-от токсичний газ та PM2.5, через недостатню вентиляцію може спричинити

серйозні проблеми зі здоров'ям для працівників підземних приміщень відкритого планування.

Тим не менш, наразі стандарти щодо вимірювання якості повітря недостатньо враховують специфіку підземних просторів з урахуванням сезонних коливань або кількості людей, які користуються цими приміщеннями. Крім того, забруднення повітря частинками PM2.5, вуглекислим газом (CO<sub>2</sub>), неприємними запахами та радоном (Rn) зростає через відсутність належної вентиляції [83]. Забруднювачі повітря в підземних приміщеннях мають шкідливий вплив на організм людини. Оскільки PM2.5 мають відносно малий діаметр, вони потрапляють в організм через дихальні шляхи та глибоко проникають в альвеоли, викликаючи хронічний бронхіт, що може призвести до смерті при тривалому впливі високих концентрацій [84].

CO<sub>2</sub> – це безбарвний газ без запаху, який зазвичай викликає головний біль та підвищення кров'яного тиску, що є основним показником забруднення повітря в приміщенні, а при впливі високих концентрацій може стати смертельним через сплутаність свідомості. Радон (Rn), побічний продукт радію, що утворюється внаслідок безперервного розпаду урану (або торію), що міститься в природних матеріалах, як-от ґрунт або гірські породи, – це безбарвний, без смаку та запаху радіоактивний газ, який має ризик спричинити рак легенів. Повідомлялося про наявність Rn переважно в приміщенні, ґрунті та воді. Серед них переважає концентрація Rn, оскільки корінні породи та ґрунт випромінюють високу концентрацію радону. Через постійне розсіювання та розведення Rn та його продукти розпаду рідко досягають високих рівнів у зовнішньому повітрі. Тому Rn вважається одним з основних забруднювачів повітря в приміщенні. Оскільки люди проводять більше часу в приміщенні, високий вміст Rn у приміщенні створює загрозу для людей. Порівнюючи повітря в приміщенні та навколишнє повітря, концентрація Rn виявляється вищою в приміщенні [85-86].

В роботах [87-94] незадовільні показники якості повітря та мікроклімату всередині підземних робочих приміщень відкритого планування спричиняють

несприятливі наслідки для здоров'я, зокрема респіраторні симптоми, алергію, подразнення органів чуття, астму, синдром хворої будівлі (SBS, Sick Building Syndrome), серцево-судинні захворювання, головний біль і втому, оскільки люди проводять там 90 % свого робочого часу.

У статті [95] розглядається проблема якості повітря у підземних приміщеннях. У ході дослідження використовувалися дані моніторингу його показників на прикладі підземного торговельного центру. Показано актуальність використання таргетованих систем фільтрації повітря у підземних приміщеннях та особливості врахування концентрацій вуглекислого газу.

У роботі [96] визначено основні фактори впливу радону і вуглекислого газу на організм людини та запропоновано заходи мінімізації на основі вентилявання виробничих підземних приміщень.

Результати досліджень [97] визначають особливості розповсюдження дрібнодисперсних частин респірабельної фракції у приміщеннях підземного розташування та виділено особливості осадження пилу у такого типу приміщеннях при використанні припливно-витяжної вентиляції з фільтрувальними матеріалами.

Для визначення фактичних значень параметрів повітряного середовища було проведено експериментальне вимірювання кількісних показників дрібнодисперсних частинок респірабельної фракції PM<sub>2.5</sub>, фактичних рівнів вуглекислого газу CO<sub>2</sub> та радону Rn. Зазначені фактори якості повітряного середовища було обрано за релевантністю і рівнем впливу на комфортність, продуктивність і безпеку людей, що перебувають у приміщенні.

При цьому мікрокліматичні показники відносної вологості повітря і температури зазначеного приміщення було визначено як постійні зі значеннями 42 % і 21 °C відповідно. Їх впливом на величину факторів якості повітряного середовища було знехтувано, оскільки динаміка зміни їх значень при реалізованій системі підтримки мікроклімату є несуттєвою і не чинить впливу визначені параметри [98].

Дослідження проводили в підземному Coworking-центрі навчального закладу об'ємом 270 м<sup>3</sup> (рис. 3.3). Вимірювання показників відбувалося з урахуванням часу доби, наявності працівників у приміщенні та їх концентрації у просторі приміщення. Для цього перша серія вимірювань виконувалася вранці до початку прибуття відвідувачів та персоналу на робочі місця.

Наступним етапом, приміщення умовно було поділено на дві однакові частини (зона 1, зона 2), в кожній з яких було встановлено однаковий комплект датчиків. При цьому відвідувачам було запропоновано переміститися в одну частину приміщення для можливості оцінки впливу людей, їх концентрації і режимів праці на чисельні значення показників якості повітря.

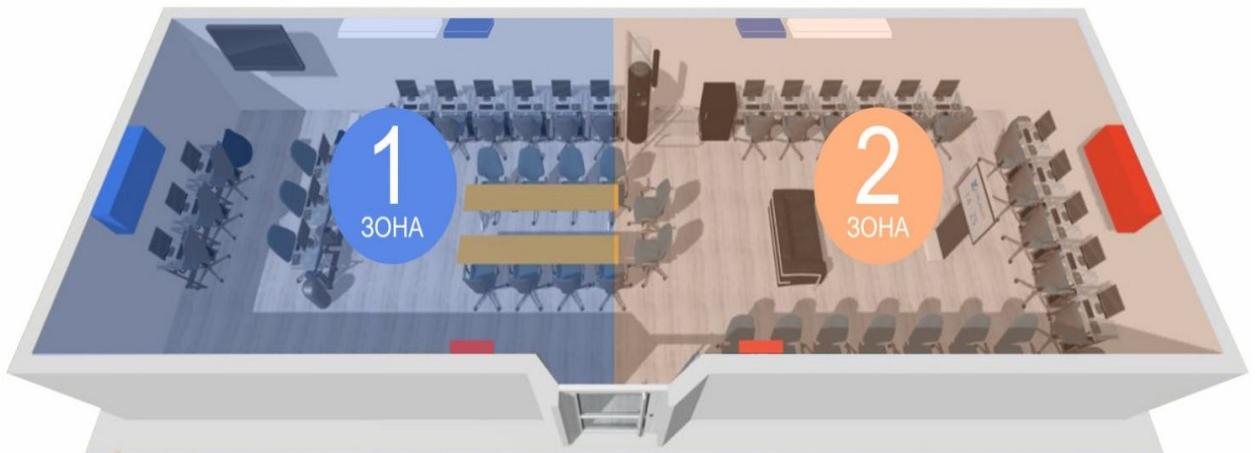


Рис. 3.3. Схема проведення вимірювань показників якості повітря в офісному приміщенні підземного розташування

Вимірювання кількості дрібнодисперсного пилу виконувалося з використанням датчиків пилу PM2.5 SDS011, фактичних рівнів CO<sub>2</sub> – за допомогою модулю Viasala AQT530, а для Rn з використанням цифрового приладу Saphymo AlphaE.

Так, згідно з чинними Державними санітарними правилами «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України», гранично допустима концентрація радону в повітрі житлових та громадських будівель становить 100 Бк/м<sup>3</sup> для новобудов та 200 Бк/м<sup>3</sup> для наявних споруд, а згідно

даних Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) рекомендованим рівнем безпеки для радону в оселях встановлено 100 Бк/м<sup>3</sup>.

У санітарно-гігієнічних рекомендаціях відзначається, що згідно з санітарно-гігієнічними дослідженнями, за концентрації CO<sub>2</sub> менше ніж 800 ppm у людини ідеальне самопочуття, вона є бадьорою. На рівні 1000 ppm кожен другий відчуває духоту, млявість, зниження концентрації, головний біль. За концентрації CO<sub>2</sub> 1000–1400 ppm люди відчувають млявість, проблеми з уважністю і опрацюванням інформації, важке дихання, проблеми з носоглоткою.

Унормування CO<sub>2</sub> в приміщеннях регулюється ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [21]. Згідно з даним нормативним документом, допустимі концентрації CO<sub>2</sub> у повітрі враховують вміст двоокису вуглецю в зовнішньому повітрі. Нормальне значення для приміщень - близько 600 ppm (частин на мільйон). Вище 1000 ppm (0,1% або 1000 ppm) вважається поганим рівнем повітря. За стандартами, у житлових приміщеннях концентрація CO<sub>2</sub> повинна бути в межах 0,07-0,1% (700-1000 ppm). Рекомендація Управління по техніці безпеки та гігієни праці (OSHA, 1994 р.) обмежує нормальний показник CO<sub>2</sub> на рівні 800 ppm, а норми ASHRAE 62-1989 «Вентиляція для нормальної якості повітря» визначає граничне значення у 1000 ppm.

Відповідно до нормативної бази Європейського Союзу максимально допустима концентрація пилу в повітрі в робочій зоні становить 10 мг/м<sup>3</sup> для виробничого пилу, в Канаді – до 15 мг/м<sup>3</sup>.

Результати вимірювання, представлені у таблицях 3.1-3.2, відображають фактичну динаміку зміни показників якості внутрішнього повітря підземного приміщення в зоні 1 (табл. 3.3) і зоні 2 (табл. 3.4). При цьому всі 40 відвідувачів і працівників працювали в зоні 2 з низьким характером навантаження і рухливості [99].

Таблиця 3.3

**Фактичні значення показників якості повітря у підземному  
Coworking-центрі**

Величина	Значення величини в час доби			
	7:00	10:00	13:00	16:00
Зона 1				
PM <sub>2,5</sub> (мг/м <sup>3</sup> )	10	10,2	10,9	11
CO <sub>2</sub> (ppm)	520	990	1100	1380
R <sub>n</sub> (Бк/м <sup>3</sup> )	127	120	119	119
Зона 2				
PM <sub>2,5</sub> (мг/м <sup>3</sup> )	10	11	11,5	12,4
CO <sub>2</sub> (ppm)	520	1020	1240	1470
R <sub>n</sub> (Бк/м <sup>3</sup> )	127	117	115	114

Згідно з результатами вимірювання очевидно, що показник рівня R<sub>n</sub> на початку вимірювання перевищує визначені показники, що обумовлено тим, що при першочерговому проектуванні зазначеного приміщення, воно не передбачало постійного перебування людей і рівнем його розсіювання у такому типі приміщенні було знехтувано. Проте при переобладнанні приміщень під відкриті робочі простори фактор перевищення рівня R<sub>n</sub> має бути врахований при розробці систем управління вентиляцією і кондиціонування підземних приміщень.

Концентрація CO<sub>2</sub> навіть при наявності постійної вентиляції кратністю  $n = 3$  перевищила допустимі показники, що відобразилося на рівні самопочуття відвідувачів: майже всі присутні наприкінці дня скаржилися на втому і незначний головний біль. При цьому згідно отриманих даних навіть у відкритому просторі концентрація CO<sub>2</sub> була більшою у зоні, де спостерігалось скупчення людей, що вимагає врахування фактору концентрації і кількості людей при розробці заходів з унормування показників якості повітря приміщень відкритого планування підземного розташування.

Отримані дані показників дрібнодисперсного пилу респірабельної фракції демонструють незначне перевищення, що зумовлено діяльністю присутніх та оргтехніки, проте базовий фон показників PM<sub>2.5</sub> варіюється на

межі рекомендованих значень, що імовірно обумовлено якістю повітря, що нагнітається у приміщення припливним вентилятором.

При реалізації систем вентиляції та кондиціонування повітря в підземних приміщеннях необхідні рівні зважених часток зазвичай досягаються завдяки використанню фільтрів НЕРА, нетеплових плазмових повітряних фільтрів і багатотрубних високоефективних мембранних повітряних фільтрів з політетрафторетилену [99].

Концентрація шкідливих речовин у підземному вентилярованому приміщенні в довільний момент часу може бути визначена за формулою, яку запропонував Е. Ленц. Таким чином для визначення концентрації CO<sub>2</sub>, як найбільш динамічного показника якості повітряного середовища використано таке диференціальне рівняння [99]:

$$q = q_s + \frac{\bar{G}}{n} + \left( q_\tau - q_s - \frac{\bar{G}}{n} \right) e^{-\tau \cdot n}, \quad (3.10)$$

де  $q$  – поточна фактична концентрація у визначений момент часу, мг/м<sup>3</sup>;

$q_s$  – концентрація шкідливої речовини у припливному повітрі, мг/м<sup>3</sup>;

$q_\tau$  – концентрація речовини в початковий момент (з урахуванням параметрів технологічного процесу, наявної кількості персоналу та інтенсивності виконуваної роботи), мг/м<sup>3</sup>;

$n$  – дійсна кратність повітрообміну у приміщенні, 1/год;

$\bar{G}$  – питомі годинні газовиділення на 1 м<sup>3</sup> приміщення, мг/(м<sup>3</sup>·год);

$\tau$  – час від початку заданого режиму, год.

Питомі годинні газовиділення на 1 м<sup>3</sup> приміщення визначаються як:

$$\bar{G} = \frac{G}{V}, \quad (3.11)$$

де  $G$  – кількість шкідливої речовини, що виділяється у приміщення, мг/год;

$V$  – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>.

Таким чином, відповідно до рівнянь (3.10-3.11), очевидно, що концентрація CO<sub>2</sub> у припливному повітрі і кратність повітрообміну суттєво впливають на загальний рівень шкідливих речовин у повітрі. З метою унормування показників повітряного простору приміщень відкритого планування підземного розташування з постійним перебуванням людей слід реалізовувати припливно-витяжні вентиляційні системи з можливістю зонального управління кратністю повітрообміну для забезпечення урахування концентрації людей та офісного обладнання у кожній зоні. З урахуванням показників якості повітряного середовища:

$$n = \frac{1}{t} \frac{\ln(q_0 - q_s)}{q - q_s} k_{Rn} k_{PM_{2.5}}, \quad (3.12)$$

де  $n$  – кратність вентиляції в приміщенні шляхом фільтрації повітря;

$q_0$  – концентрація CO<sub>2</sub> у внутрішньому повітрі приміщення;

$q_s$  – концентрація CO<sub>2</sub> у припливному повітрі;

$q$  – унормована концентрація CO<sub>2</sub> у повітрі приміщення;

$k_{Rn}$  – коефіцієнт впливу радону, який визначається як співвідношення фактичного рівня радону до нормального  $k_{Rn} = Rn/Rn_0$ , і застосовується у випадку коли таке співвідношення більше 1;

$k_{PM_{2.5}}$  – коефіцієнт запиленості, який визначається як співвідношення фактичного рівня дрібнодисперсних частинок  $R_{PM_{2.5}}$  до нормального  $R_{PM_{2.5},0}$ , тобто  $k_{PM_{2.5}} = R_{PM_{2.5}} / R_{PM_{2.5},0}$ , і застосовується у випадку якщо таке співвідношення більше 1.

### 3.3. Дослідження методів унормування якісних показників повітря

Ультрафіолетове (УФ) випромінювання, зокрема у спектральному діапазоні С (200–280 нм), є одним із найефективніших фізичних методів знезараження повітря та поверхонь у закритих середовищах, зокрема в підземних приміщеннях. Дія УФ-випромінювання ґрунтується на фотохімічному ушкодженні нуклеїнових кислот мікроорганізмів, що

призводить до утворення димерів тиміну та блокування процесів реплікації ДНК і РНК. Як наслідок, клітини втрачають життєздатність і здатність до поділу [100].

Експериментальні дослідження підтверджують високу чутливість вегетативних форм бактерій до УФ-опромінення: загибель клітин відбувається протягом кількох секунд чи хвилин залежно від інтенсивності випромінювання. Натомість спорові форми, характерні для грибів та цвілевих мікроорганізмів, виявляють значно вищу стійкість, що зумовлює необхідність збільшення експозиції або підвищення дози УФ-випромінювання для досягнення аналогічного знезаражувального ефекту [101].

Для проведення ефективної дезінфекції приміщень рекомендується використовувати ультрафіолетові лампи типу UV-C з довжиною хвилі 254 нм, які мають високу бактерицидну активність проти широкого спектра мікроорганізмів, включаючи бактерії, віруси та грибки. Потужність ламп підбирається відповідно до площі приміщення та очікуваного часу експозиції; для стандартних офісних кімнат площею 20–30 м<sup>2</sup> рекомендовані лампи потужністю 15–30 Вт [102-104]. Час експозиції повинен відповідати табл. 3.4 і 3.5

Для забезпечення рівномірного розповсюдження ультрафіолетового випромінювання в об'ємі приміщення лампи повинні розміщуватися таким чином, щоб промінь світла максимально охоплював усю площу. Доцільно їх розташовувати у центральній частині кімнати або над робочими зонами. У приміщеннях великої площі для досягнення бактерицидного ефекту необхідним є рівномірне розміщення декількох ламп по периметру. Оптимальна висота монтажу становить 2–3 м, що забезпечує ефективне поширення випромінювання, при цьому напрямок світла повинен мінімізувати наявність тіньових зон. Відбиття випромінювання від стін та стелі може підвищувати ефективність оброблення.

Таблиця 3.4

**Час експозиції УФ-випромінювання для ефективної бактерицидної дії**

Мікроорганізм	Тип	Доза UV-C (мДж/см <sup>2</sup> )	Час експозиції, с, при 1 мВт/см <sup>2</sup>	Примітки
<i>Escherichia coli</i>	Бактерія	2–6	2–6	Грам-негативна, чутлива до UV-C
<i>Staphylococcus aureus</i>	Бактерія	5–10	5–10	Грам-позитивна, більш стійка
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Бактерія	6–12	6–12	Висока стійкість до UV-C
<i>Bacillus subtilis</i> (спори)	Бактерія	50–100	50–100	Спороутворююча бактерія, дуже стійка
<i>Candida albicans</i>	Грибок	10–30	10–30	Дріжджоподібний грибок
<i>Aspergillus niger</i> (конідії)	Грибок	30–60	30–60	Пиловий грибок, відносно стійкий
<i>Penicillium spp.</i>	Грибок	25–50	25–50	Поширений цвілевий грибок

Практичне застосування УФ-ламп у підземних приміщеннях передбачає два основні підходи [105]:

- опромінення повітря та поверхонь відкритими бактерицидними лампами за відсутності людей;
- використання закритих рециркуляційних систем, які можуть працювати у присутності персоналу.

Застосування першого методу забезпечує високу ефективність дезінфекції, однак потребує суворого дотримання техніки безпеки, оскільки УФ-випромінювання небезпечно для шкіри й органів зору людини. Обмеженням цього методу є його низька проникність: УФ-випромінювання не проходить крізь скло, пластик і шари пилу, що знижує ефективність обробки забруднених поверхонь.

Таблиця 3.5

**Час експозиції УФ-випромінювання для ефективної противірусної дії**

Вірус	Тип поверхні	Час прямого опромінення UV-C, хв	Час опромінення при частковому затемненні або пористій поверхні	Примітки
SARS-CoV-2	Гладка (метал, скло, пластик)	10–30	30–60	Енвелопований, висока чутливість
SARS-CoV-2	Пориста (тканина, картон)	20–40	60–90	Тканини частково блокують UV-C
Грип А	Гладка	10–20	25–40	Енвелопований, швидка інактивація
Грип А	Пориста	20–30	40–60	Потужність лампи впливає на час
Норовірус	Гладка	20–40	40–70	Неенвелопований, середня чутливість
Норовірус	Пориста	40–60	60–90	Часто потребує повторного опромінення
Аденовірус	Гладка	25–50	50–80	Неенвелопований, стійкий
Аденовірус	Пориста	50–70	80–120	Найбільш стійкий на пористих поверхнях
HSV-1 / HSV-2	Гладка	5–20	15–40	Енвелопований, швидка інактивація
HSV-1 / HSV-2	Пориста	15–30	30–60	Ліпідна оболонка підвищує чутливість

Крім того, у випадках глибокого ураження стін чи будівельних матеріалів грибковими міцеліями одне лише УФ-опромінення не гарантує повної дезактивації, і в таких випадках необхідне поєднання фізичних та хімічних методів санації [106].

Другий варіант передбачає знезараження повітря приміщення за допомогою системи рециркуляції, в якій повітря пропускається через герметизований корпус опроміювача, де піддається впливу УФ-С випромінювання. Екранована конструкція забезпечує відсутність прямого опромінення людей, що дозволяє проводити знезараження у робочому режимі приміщення.

Оброблене повітря повертається у простір приміщення, суттєво знижуючи концентрацію аерогенних мікроорганізмів, включаючи бактерії, віруси та грибки. При цьому зменшується негативний вплив прямого контакту людей з випромінюванням і забезпечується безперервна дезінфекція під час експлуатації приміщення

Ефективність знезараження визначається швидкістю циркуляції повітря та тривалістю впливу УФ-С променів на об'єм повітря. Екрановані (рециркуляційні) УФ-опроміювачі є високоефективним та безпечним методом дезінфекції повітря у приміщеннях з присутністю персоналу, що сприяє зниженню концентрації патогенів та підвищенню санітарно-гігієнічного рівня робочого середовища.

Таким чином, застосування УФ-випромінювання в підземних приміщеннях дозволяє істотно знизити мікробіологічне навантаження в повітрі та на поверхнях, однак найбільшій ефективності можна досягти лише при комплексному підході, який передбачає поєднання УФ-дезінфекції з вентиляцією, регулюванням вологості та застосуванням хімічних антисептиків.

Використання ультрафіолетового випромінювання суттєво впливає на процеси іонізації повітря. Штучна іонізація повітря розглядається як один із перспективних методів поліпшення мікроклімату в закритих приміщеннях, зокрема у підземних просторах, де природний повітрообмін обмежений. Традиційні іонізатори працюють на основі коронного розряду або п'єзоелектричних ефектів, однак останнім часом увагу привертає можливість використання ультрафіолетових (УФ) ламп як джерела іонізації [107].

Механізм базується на фотохімічному ефекті: під дією короткохвильового УФ-випромінювання ( $\lambda < 200\text{--}240$  нм) відбувається розщеплення молекул кисню з утворенням активних форм (атомарного кисню та озону), а також негативних іонів. Ці частинки здатні приєднуватися до аерозольних часток, пилу та мікроорганізмів, сприяючи їх осадженню та зниженню мікробіологічного забруднення повітря. Крім того, озон, що утворюється у малих концентраціях, чинить виражений бактерицидний ефект.

Відомо, що насичення повітря іонами позитивно впливає на якість повітря та самопочуття людини. Однак широке впровадження цієї технології стримується низкою обмежень. Надмірне утворення озону є небезпечним для здоров'я людини, оскільки його концентрація понад  $0,1$  мг/м<sup>3</sup> викликає подразнення дихальних шляхів і може призвести до хронічних уражень. Тому при використанні УФ-ламп як іонізаторів необхідно суворо контролювати параметри випромінювання та організувати систему відведення надлишкового озону.

З урахуванням сучасних тенденцій можна прогнозувати розвиток комбінованих систем очищення повітря, що поєднуюватимуть УФ-дезінфекцію, фотокаталітичні процеси та контрольовану іонізацію. Це дозволить не лише знижувати мікробіологічне та хімічне забруднення, але й підтримувати оптимальний рівень аероіонів у закритих середовищах.

Таким чином, використання ультрафіолетових ламп (рис. 3.4) для штучної іонізації повітря має значний потенціал, але потребує подальших експериментальних досліджень задля оптимізації дозових режимів, мінімізацію побічного утворення озону та забезпечення безпеки для людини.

Оскільки УФ-випромінювання є потенційно небезпечним для людини, приміщення під час дезінфекції має бути порожнім. Небезпека впливу полягає в потенційних фотохімічних ураженнях рогівки та сітківки, ризику розвитку катаракти та фотокератиту («снігова сліпота») при тривалому або інтенсивному опроміненні

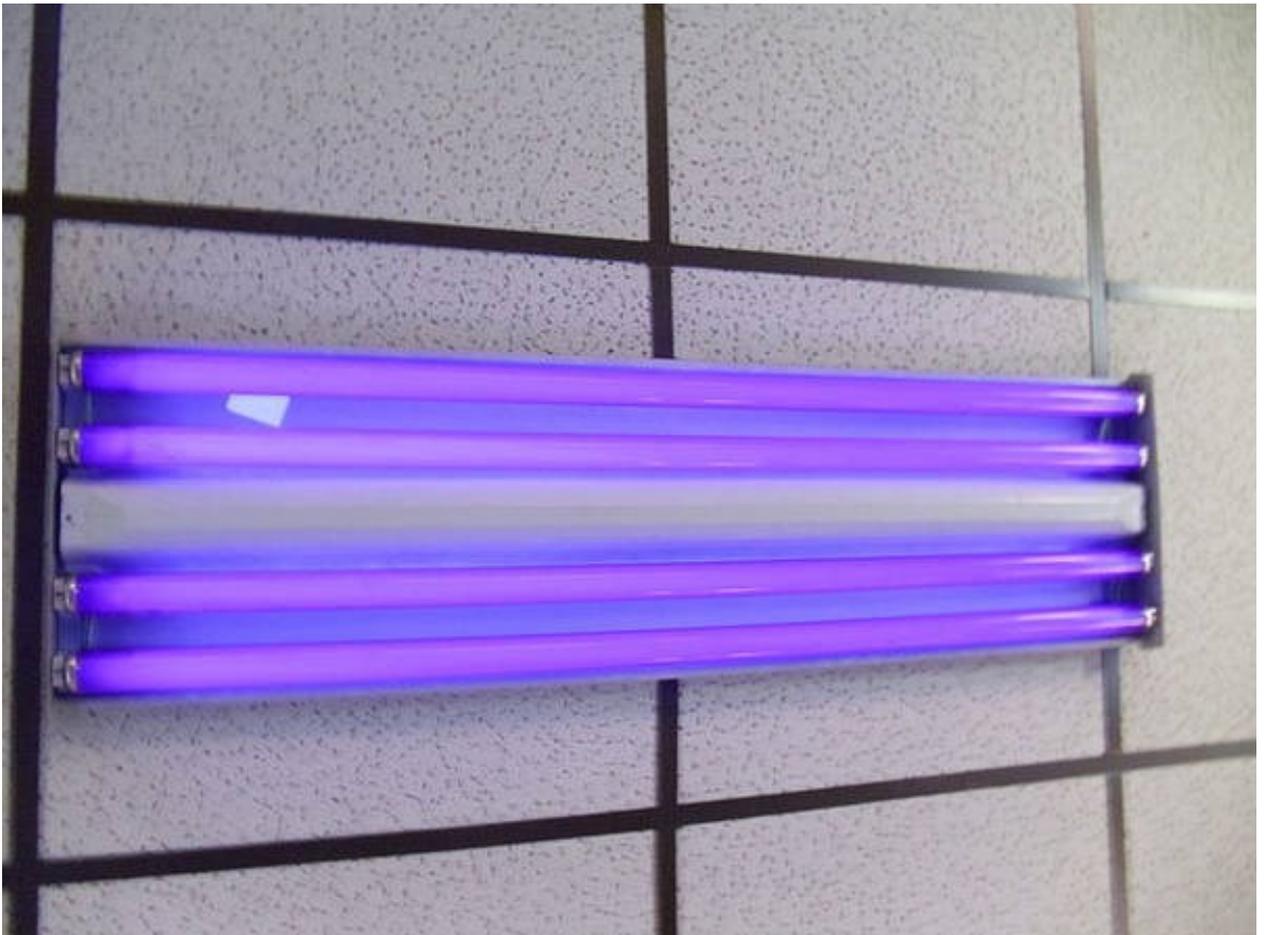


Рис. 3.4. Синій спектр УФ-випромінювання

Також УФ-випромінювання впливає на синтез мелатоніну, що порушує сон та біоритми при частому використанні в робочих приміщеннях.

#### **3.4. Вплив озеленення підземних просторів на показники комфортності середовища**

Використання кімнатних рослин у закритих просторах, зокрема в підземних приміщеннях, розглядається як один із природних методів покращення якості повітря. Біологічна активність рослин базується на процесах фотосинтезу, транспірації та фітомеліорації, що забезпечують зниження концентрацій вуглекислого газу, підвищення вмісту кисню, регуляцію вологості та часткову адсорбцію летких органічних сполук [109-113].

Кімнатні рослини є важливим фактором формування психо-емоційного комфорту у замкнених та підземних приміщеннях, де природне освітлення обмежене, а контакт з природним середовищем мінімальний. Експериментальні та анкетні дослідження показують, що присутність рослин у робочому просторі сприяє зниженню рівня стресу та тривожності, покращенню настрою, підвищенню мотивації та загальної задоволеності перебуванням у приміщенні. Візуальна присутність рослин активує ділянки мозку, пов'язані з релаксацією та відновленням когнітивних ресурсів, що покращує концентрацію уваги, продуктивність та творчі здібності. Крім того, інтеграція рослин у спільні простори підземних приміщень знижує конфліктність та покращує міжособистісну взаємодію, створюючи відчуття більш комфортного та психологічно збалансованого середовища [114].

Кімнатні рослини виконують функцію біологічного та психологічного регулятора у підземних приміщеннях, стабілізуючи психоемоційний стан людей, зменшуючи стресові реакції та підвищуючи загальний рівень комфорту, а також є активними біологічними елементами, що впливають на фізико-хімічні характеристики повітря у замкнених приміщеннях, зокрема на рівень вологості та концентрацію вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) [115].

Процес транспірації рослин забезпечує випаровування води з листової поверхні в атмосферу приміщення. Внаслідок цього відбувається локальне підвищення відносної вологості повітря, що особливо актуально в умовах низької зовнішньої вологості або при активній роботі систем опалення [116-118].

Фотосинтетична активність забезпечує зв'язування  $\text{CO}_2$  і виділення  $\text{O}_2$ , що особливо важливо для підземних середовищ, де обмежена вентиляція сприяє накопиченню вуглекислого газу. За наявності достатнього освітлення, зокрема із використанням штучних LED-ламп у спектральному діапазоні фотосинтезу (400–700 нм), рослини здатні істотно зменшувати концентрацію  $\text{CO}_2$  у повітрі.

Окремі види рослин характеризуються здатністю до фітореMediaції — абсорбції та метаболізації летких органічних речовин (формальдегідів, бензолу, толуолу), що виділяються з будівельних матеріалів та меблів. Цей ефект підтверджений низкою лабораторних досліджень, хоча у реальних приміщеннях його значущість часто залежить від кількості зелених насаджень і об'єму простору.

Зниження концентрації CO<sub>2</sub> в замкнених приміщеннях позитивно впливає на когнітивні функції людини, підвищує концентрацію уваги та зменшує відчуття «задушливості». Ефективність цього процесу безпосередньо залежить від щільності рослинності, об'єму приміщення та рівня освітлення.

Оцінка впливу зелених насаджень на якість повітря здійснюється шляхом порівняння показників концентрації CO<sub>2</sub>, відносної вологості, рівня кисню та наявності летких органічних сполук у приміщеннях з рослинами та без них. Для експериментів у підземних просторах застосовуються флуоресцентні та LED-лампи з випромінюванням у фотосинтетично активному діапазоні (400–700 нм), що забезпечує фотосинтетичну активність рослин. Паралельно ведеться моніторинг мікробіологічного стану повітря з метою оцінки потенційних ризиків розвитку цвілі та патогенних мікроорганізмів у субстратах.

Відомі результати досліджень свідчать про потенційну ефективність використання кімнатних рослин як додаткового інструменту для покращення якості повітря у підземних приміщеннях. Проте ефективність цього методу обмежується низкою факторів: необхідністю забезпечення адекватного освітлення, контролю за вологістю та регулярного догляду за рослинами з метою запобігання розвитку небажаної мікрофлори [117].

Таким чином, кімнатні рослини можуть бути інтегровані у систему екологічного контролю підземних просторів лише у поєднанні з традиційними методами (механічна вентиляція, фільтрація, ультрафіолетове знезараження). Комплексний підхід забезпечує оптимальні умови для перебування людей та

мінімізує ризики, пов'язані з мікробіологічним забрудненням і надмірною вологістю [118].

Водночас існують і певні обмеження. У підземних умовах природне освітлення відсутнє, а тому необхідне застосування штучних джерел світла, що збільшує енергоспоживання. Крім того, надмірна кількість рослин може призвести до підвищення вологості, створюючи сприятливі умови для розвитку цвілі та грибкової мікрофлори. У ґрунті кімнатних рослин можуть також розвиватися мікроорганізми, що потенційно негативно впливають на санітарний стан повітря [119].

Таким чином, інтегрування (табл. 3.6) кімнатних рослин у систему екологічного контролю підземних приміщень може розглядатися як допоміжний елемент природного фільтрування повітря. Для високої ефективності необхідно зосередити в приміщенні достатню біомасу (рис. 3.5). Найбільшої ефективності можна досягти при комплексному підході, що передбачає поєднання зелених насаджень з вентиляційними системами, формуванням мікроклімату та додатковими методами знезараження. Ці рослини можна розглядати для підземних просторів, де природне світло відсутнє або мінімальне, проте для підтримки фотосинтезу їм знадобиться штучне освітлення (LED-лампи з холодним білим спектром або фітолампи).

Фітолампи (рис. 3.6) як спеціальні джерела світла для стимуляції росту рослин, мають два типи: повноспектрові, що дають неперервний спектр, відповідний до ефективності фотосинтезу, та двокольорові, які випромінюють синє (450–495 нм) та червоне (620–750 нм) світло. Для людини їхній вплив не такий екстремальний, як у УФ-ламп, але при тривалому або близькому контакті можливі негативні ефекти: викликати зорову втому, подразнення та сухість очей; фотохімічне ушкодження сітківки при високій інтенсивності та тривалому впливі; вплив на циркадні ритми; інтенсивне червоне світло може підвищувати рівень збудження та стресу при довгому перебуванні під лампою.



а



б



в



г

Рис. 3.5. Приклади озеленення підземних просторів: а, г – зелена стіна та вазони з рослинами; б, в – зелені стіни

Таблиця 3.6

## Тіньолюбні рослини для озеленення підземних просторів

Рослина	Властивості	Зовнішній вигляд
Аглаонема ( <i>Aglaonema</i> )	витримує низьке освітлення, добре очищає повітря.	
Аспідистра ( <i>Aspidistra elatior</i> )	надзвичайно витривала, росте навіть при мінімальному світлі	
Сансев'єрія ( <i>Sansevieria</i> )	переносить тінь, очищує повітря від токсинів, при яскравому освітленні цвіте з сильним запахом	
Спатіфілум ( <i>Spathiphyllum</i> )	росте в півтіні, одночасно декоративний і фільтрує повітря	
Філодендрон ( <i>Philodendron</i> )	добре розвивається при непрямому або слабкому світлі	
Нефролепіс ( <i>Nephrolepis exaltata</i> )	класичний варіант для затінених приміщень, любить високу відносну вологість повітря.	

Рослина	Властивості	Зовнішній вигляд
Адіантум ( <i>Adiantum</i> )	ніжний папороть, стійкий до затінення.	
Хлорофітум ( <i>Chlorophytum comosum</i> )	витримує тінь, активно очищає повітря	
Калатея ( <i>Calathea</i> )	тіньлюбна рослина з декоративним листям.	
Драцена ( <i>Dracaena</i> )	повільно росте, але добре почуватися без прямого світла, дезінфікує повітря, особливо драцена запашна ( <i>Dracaena fragrans</i> )	

Холодне біле світло корисне зранку та вдень, але спричиняє шкідливий вплив на нічний сон через порушення циркадних ритмів синьо-фіолетовою частиною спектру.

Отже реалізація озеленення підземних приміщень відкритого планування потребує врахування особливостей випромінення фітоламп та їх впливу на організм людини, а також врахування збільшення вологості від кімнатних рослин і субстрату при плануванні і унормуванні тепло-вологісних показників приміщень.

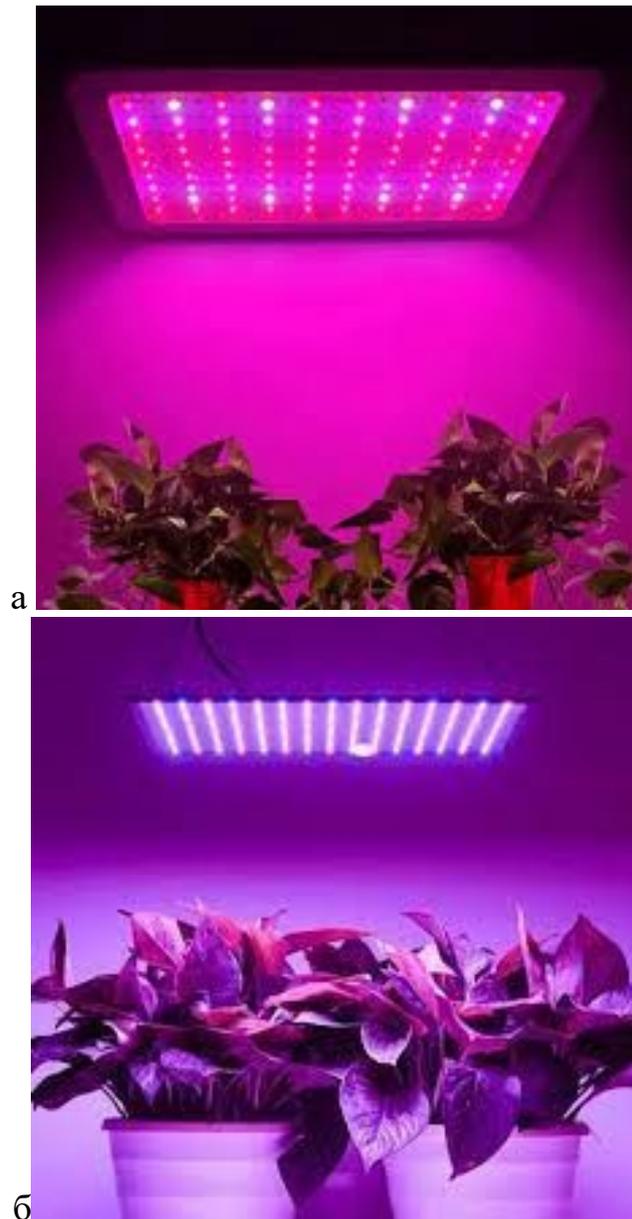


Рис. 3.6. Фітолампи: а – двокольорова; б – повноспектрова

### 3.5 Висновки за розділом 3

1. У результаті дослідження параметрів якості повітря приміщень відкритого планування підземного розташування виконано вимірювання та аналіз рівнів концентрації дрібнодисперсного пилу, радону та вуглекислого газу. Вибір зазначених показників ґрунтується на тому, що більшість переобладнаних підземних приміщень не пристосовані для постійного перебування великої кількості людей, що зумовлює складність підтримання безпечних і нормальних показників повітряного простору. Рівень запиленості

підземних просторів відкритого планування має незначні відхилення від унормованих показників і в основному зумовлений концентрацією пилових частинок притяжного повітря, що можна регулювати за допомогою встановлення спеціальних фільтрів при подачі повітря у приміщення.

2. Дослідження процесів теплообміну в підземних приміщеннях відкритого планування передбачає комплексне оцінку взаємодії повітря, поверхонь та присутніх людей для забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов з урахуванням теплових властивостей ґрунту та поверхонь приміщення, зокрема теплоакumuляційних властивостей, що пом'якшують коливання температури. Розроблена математична модель теплообмінних процесів у приміщенні дозволяє моделювати зміну теплового режиму протягом дня з урахуванням впливу людей та ґрунту. Результати натурних вимірювань у підземному Coworking-центрі показали зміну температури протягом робочого дня від 18-20 до 24-25,5 °C з виходом за діапазони оптимальної температури.

3. Моделювання теплообміну в підземних приміщеннях відкритого планування дозволяє оцінити стратифікацію температури, локальні зони перегрівання або переохолодження та ефективність вентиляційних і опалювальних систем. Отримані дані є необхідними для проектування комфортного середовища праці, оптимізації енергоспоживання та забезпечення психо-емоційного і фізичного комфорту персоналу при тривалому перебуванні у підземних робочих просторах.

4. Визначено, що на динаміку концентрації CO<sub>2</sub> суттєво впливає кількість і концентрація людей у просторі приміщення, а також наявний рівень концентрації вуглекислого газу у припливному повітрі, що зумовлює необхідність урахування цієї особливості при розрахунку кратності повітрообміну у приміщенні та можливості передбачення зональної вентиляції приміщення на основі показників CO<sub>2</sub>. Протягом робочого дня вміст вуглекислого газу підвищувався від 520 до 1380-1470 ppm.

5. Установлено, що рівні випромінювання  $R_n$  в підземних приміщеннях відкритого планування не цілком відповідають регламентованим значенням і можуть суттєво впливати на загальний стан людей, які постійно знаходяться в таких приміщеннях. У Coworking-центрі вони коливалися в межах 114-127 Бк. Запропоновано враховувати відносний коефіцієнт впливу радону при розрахунку кратності повітрообміну приміщення для зменшення рівня його концентрації до унормованих показників.

6. Розташування кімнатних рослин у підземних приміщеннях має важливе значення для психо-емоційного комфорту та покращення мікроклімату. Рослини розміщують у видимих зонах, формуючи локальні «зелені островці», що знижують тривожність і підвищують продуктивність праці. Через відсутність денного світла забезпечується штучне освітлення з відповідним спектром, контроль вологості та температури ґрунту. Використання тіньолюбних і невибагливих видів рослин дозволяє підтримувати їх життєздатність та сприяє створенню комфортного і здорового середовища у підземних просторах.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОКАЗНИКАМИ КОМФОРТНОГО І БЕЗПЕЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕНЬ ВІДКРИТОГО ПЛАНУВАННЯ

Основними небезпечними факторами підземних просторів є підвищена відносна вологість, низька температура повітря, застій забруднювальних речовин, як-от  $\text{CO}_2$  та дрібнодисперсний пил  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , наявність завищених показників радону та його похідних, що характерні для приміщень, які за початковим проєктом і функціоналом не були призначені для довготривалого перебування великої кількості людей. Зазначені фактори як окремо, так і в комбінації можуть спричинити серйозні проблеми зі здоров'ям працівників у довготривалій перспективі.

Забруднення повітря частинками  $\text{PM}_{2.5}$ , вуглекислим газом, неприємними запахами та радоном зростає через відсутність належної системи управління вентиляцією. Дрібнодисперсний пил респірабельної фракції при недостатньому вентиляванні здатен глибоко проникати в альвеоли, викликаючи хронічний бронхіт та призвести до важких наслідків для здоров'я при тривалому впливі високих концентрацій [120].

Через постійне розсіювання та розведення радону природною вентиляцією офісних приміщень його рівень рідко досягає граничних або небезпечних рівнів, проте він вважається одним з основних забруднювачів повітря в підземних приміщеннях. Порівнюючи показники повітря в підземному приміщенні та наземній частині однієї і тієї ж будівлі, концентрація  $R_n$  виявляється значно вищою в підземному приміщенні, що є небезпечним для людей, які постійно там перебувають.

Підземні простори мають високу відносну вологість повітря, що сприяє легкому утворенню цвілі та грибків через недостатній повітрообмін та брак

природного освітлення, а також негативно впливає на загальний мікроклімат приміщення [121].

Приміщення відкритого планування підземного розташування негативно впливають на фізіологію, психологію та безпеку людини. Психологічні проблеми, спричинені підземними просторами, є складнішими. Результати досліджень показують, що навіть якщо внутрішнє середовище підземних будівель досягає такого ж рівня комфорту, як і в наземних будівлях, психологічні бар'єри все ще існують.

За результатами опитування було виявлено, що визначена умовами інтерв'ювання аудиторія майже у повному складі виразила скарги на якість повітря наприкінці робочого дня, що викликало надмірну втому і легкий головний біль, що очевидно обумовлено збільшенням концентрації CO<sub>2</sub> у повітрі приміщення, про що свідчили показники датчиків CO<sub>2</sub> в приміщенні. Дослідження комбінованого впливу підвищеної температури, відносної вологості та концентрації CO<sub>2</sub> на реакції людини у роботі виявили, що висока відносна вологість повітря та підвищена концентрація CO<sub>2</sub> погіршують якість повітря, і що комбінований вплив високої температури повітря, відносної вологості та концентрації CO<sub>2</sub> призводить до різноманітних негативних реакцій людини, як швидка втомлюваність, головний біль, втрата концентрації уваги, тощо.

Підземні споруди мають проблему вологості через своє унікальне середовище, особливо влітку, коли використовується природна вентиляція, що зумовлено підвищенням вологості зовнішнього повітря, яке легко конденсується після проходження через підвальне приміщення з меншою температурою. Як результат, додаткова припливно-витяжна вентиляція може не тільки ефективно запобігти конденсації, але й забезпечити задовільні показники якості повітря в підземних інженерних спорудах, знижуючи при цьому концентрації CO<sub>2</sub> та Rn.

Звичайний процес перенесення вологи в підземних просторах відбувається, коли парціальний тиск водяної пари всередині просторів

нижчий, ніж зовні. Водяна пара ззовні оболонки дифундує всередину. Організація додаткової зональної припливно-витяжної вентиляції може знижувати коливання відносної вологості повітря, пов'язані з погодою та сезонністю, а вологообмін всередині стін може допомогти частково пом'якшити коливання температурних показників. З іншого боку, надмірний повітрообмін може збільшити відносну вологість повітря. Зазвичай температура поверхні стіни нижча або близька до температури точки роси повітря на входах у підземні тунелі або простори. Конденсація відбувається під час процесів охолодження та осушення, коли зовнішнє повітря потрапляє в приміщення. Надмірна конденсація в підземних приміщеннях є неминучою в тривалий спекотний і вологий сезон. В такі періоди температура стіни падає нижче температури точки роси, повітря охолоджується, не змінюючи своєї питомої вологості, і конденсується до лінії насичення, призводячи до процесу, відомого як насичена конденсація [122].

Надмірна вологість у підземних приміщеннях є основною причиною збільшення кількості мікроорганізмів. Зростання грибків зазвичай відбувається при потраплянні води або надмірній конденсації всередині приміщень. Дослідження впливу параметрів кондиціонування повітря (температури, відносної вологості, швидкості припливного повітря) та осадженого пилу на ріст мікробів у повітропроводах припливного повітря довели, що оптимізація температурно -вологісних показників є основним фактором, що впливає на ріст грибків та цвілі. Контроль вологості на поверхні стіни нижче 84 % здатен запобігти швидкому зростанню цвілі. Такого ефекту можна досягти за допомогою оптимізації систем припливно-витяжної вентиляції, використання осушувачів повітря та спеціальних ультрафіолетових ламп для дезінфекції поверхонь приміщення, мінімізування розповсюдження мікроорганізмів у повітряному просторі та одночасній нормалізації аероіонного складу повітря, що сприяє швидкості осадження пилу і є ефективним методом контролю забруднення повітря мікроорганізмами в підземних просторах.

Для забезпечення належної якості навколишнього середовища в підземних приміщеннях слід впроваджувати комплексні заходи контролю, такі як підтримка підземних приміщень у сухому та чистому стані, дезінфекція підземних приміщень дезінфікуючими засобами, використання вологонепроникного покриття/гігроскопічного матеріалу, належне проектування, експлуатація та обслуговування систем вентиляції та кондиціонування повітря, використання ультрафіолетових ламп для дезінфекції повітря тощо. Проте на сьогодні, немає жодних законодавчих обмежень щодо концентрацій і вмісту бактерій та грибків, здатних переноситися повітрям у підземних робочих просторах, включаючи підземні інтегровані труби, які необхідні для реалізації безпечного середовища для працівників, що працюють у підземних приміщеннях відкритого планування.

#### **4.1. Розробка структурної схеми системи управління середовищем підземних приміщень відкритого планування**

З метою забезпечення найбільш задовільних умов перебування людей у приміщеннях відкритого планування підземного розташування запропоновано систему управління показниками комфортного і безпечного середовища (рис. 4.1), яка має блок управління показниками комфортного і безпечного середовища, який на основі порівняння отриманих даних з датчиків рівнів і концентрацій  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Rn}$ , датчиків температури робочої зони  $t_{up}$ , °C, датчиків температури підлоги  $t_{down}$ , °C, датчиків вмісту дрібнодисперсних частинок пилу респірабельної фракції  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , датчиків вологості  $\text{RH}$ , концентрації аероіонів, фотодатчиків присутності людей та заданих нормативних показників параметрів середовища через перетворювачі частоти (ПЧ формує сигнал управління приводам систем припливно-витяжної вентиляції та кондиціонування кожної температурної зони (зона 1 - прохолодна, зона 2 - тепла) для досягнення задовільних температурних показників, визначених відповідно вимогами зони [123].

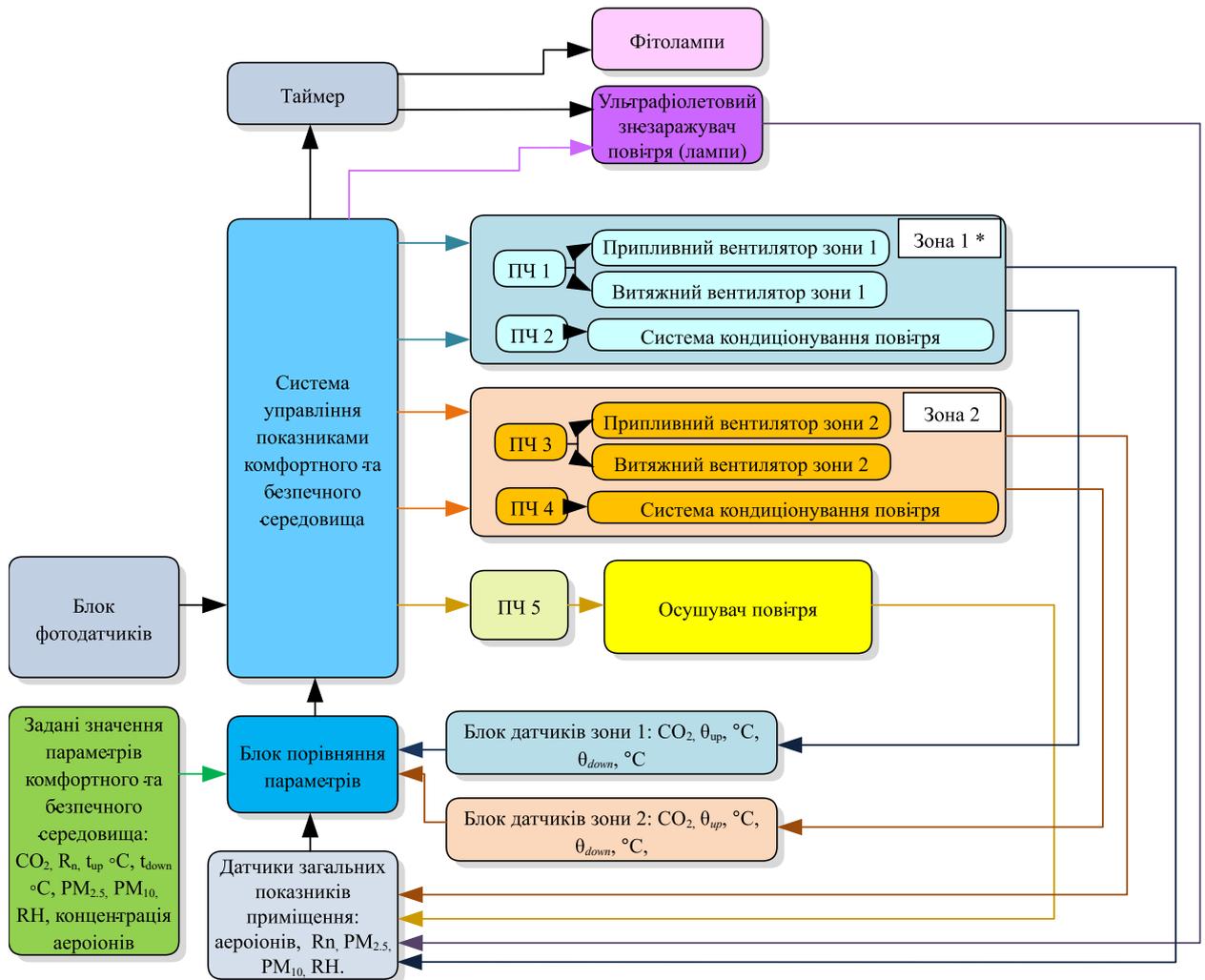


Рис.4.1. Структурна схема системи управління показниками комфортного і безпечного середовища підземних приміщень відкритого планування

Одночасно формування потоку повітрообміну забезпечує задовільні та безпечні концентрації радону шляхом інтенсифікації руху повітряних мас та розбавлення його концентрацій зовнішнім повітрям [124]. При цьому комфортний рівень температурної стратифікації (рис. 4.2) реалізується шляхом регулювання температури повітря (нагрів-охолодження) та керування кутом повороту стулки, яка формує напрям руху кондиціонованого повітря до приміщення [125].

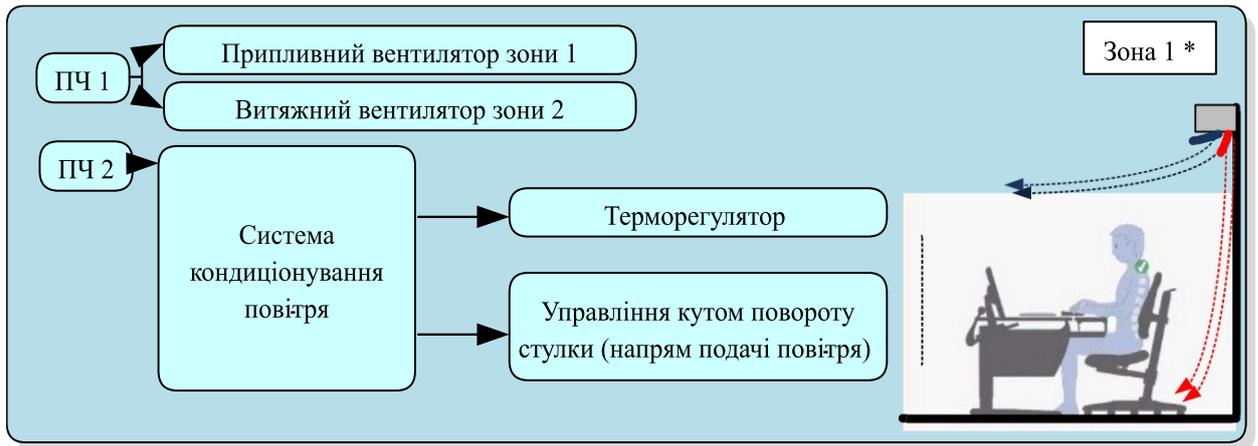


Рис. 4.2. Структурна схема блоку забезпечення показників комфортного і безпечного середовища температурної зони

Регулювання вологості формується сигналом управління на осушувач повітря для зменшення показників відносної вологості повітряного простору приміщення до нормальних значень.

Ультрафіолетові знезаражувачі та лампи для дезінфекції поверхонь приміщення, повітря, осадження пилу та нормалізації аероіонного складу повітря вмикаються блоком управління показниками комфортного і безпечного середовища у неробочий час при відсутності персоналу і керуються налаштуваннями таймера. Додатково лампи можуть вмикатися в робочий час при необхідності штучної іонізації повітря приміщення і унормування аероіонного складу повітря підземного приміщення відкритого планування.

Для підтримання фотосинтезу та життєдіяльності кімнатних рослин, які розміщено для підвищення рівня комфортності та зниження психологічного навантаження, вмикаються фітолампи у неробочий час (керується налаштуванням таймера). Такий підхід зумовлено особливістю спектру випромінювання таких ламп, що може заважати концентрації уваги та негативно впливати на загальний рівень освітленості в приміщенні.

Складні проблеми організації та забезпечення показників комфортного і безпечного середовища підземних приміщень відкритого планування

зумовлені особливостями їх проєктування, розміщення і початкового функціонального призначення. Покращення параметрів середовища підземного простору нерозривно пов'язане з контролем відносної вологості повітря, що впливає на здоров'я людини, зростання мікробів, теплообмін та роботу обладнання.

Дослідження показників мікроклімату та рівня комфорту в приміщеннях підземних споруд з високою вологістю і зниженою температурою внутрішнього повітря, не пристосованих до довготривалого перебування людей, аналіз показників комфорту за результатами анкетування, фізіологічних та психологічних наслідків перебування у підземних приміщеннях, дозволили запропонувати систему управління унормованими показниками повітряного середовища та рівня комфорту. Це забезпечує безпечну та продуктивну роботу людей в підземних приміщеннях відкритого планування.

Система ґрунтується на постійному моніторингу показників датчиків, порівнянні отриманих даних з унормованими показниками і формуванні керувальних сигналів для підтримання мікрокліматичних показників на основі комбінованих систем припливно-витяжної вентиляції з «ентальпійними» рекуперативними теплоутилізаторами з можливістю температурного зонування простору з орієнтуванням на найбільше скупчення людей та можливістю коригування температурної стратифікації, регулювання концентрації радону та його прохідних, а також підтримання аероіонного та мікробіологічного складу повітря підземного простору для підвищення продуктивності роботи та безпеки довготривалого перебування людей у такого типу приміщеннях [126].

## **4.2 Алгоритм управління системою забезпечення показників комфортного і безпечного середовища підземного приміщення відкритого планування**

Основні принципи керування системою забезпечення показників комфортного і безпечного середовища підземного приміщення відкритого планування ґрунтуються на пріоритетності безпеки людини. З метою забезпечення найбільш плавного регулювання та функціонування системи управління показниками безпеки та комфорту приміщення відкритого планування підземного розташування доцільно буде врахувати інерційність систем спрацювання та гістерезис шляхом задання параметрів управління у межах допустимих діапазонів: для температури –  $-/+0.5-1$  °C; 3–5 % для відносної вологості; 50-100 ppm для CO<sub>2</sub>.

При довготривалому перебуванні людей у підземному приміщенні є розповсюдженим явище швидкого збільшення концентрації CO<sub>2</sub> і для збереження здоров'я, продуктивності та задовільного самопочуття необхідно контролювати його вміст у повітрі [127,128].

Пріоритетність налаштування систем контролю і управління слід виконати у такому порядку:

1. Безпека (Rn, CO<sub>2</sub>) – миттєве збільшення повітрообміну, евакуація при критичних рівнях.
2. Захист від вологості – боротися щоб уникнути цвілі/корозії.
3. Температурна нормалізація з урахуванням стратифікації і зонування – енергетично ефективні заходи (зміна розподілу повітря, налаштування температури подачі).
4. Енергоефективність – при нормальних значеннях параметрів переводити систему в економний режим.

Показники радону і CO<sub>2</sub>, а отже і повітрообмін, мають вищий пріоритет перед регулюванням температури за зонами та температурною стратифікацією.

Для реалізації управління показниками повітрообміну для забезпечення унормування пріоритетних показників радону і  $\text{CO}_2$  доцільним буде використання швидкого нарощення повітрообміну з можливістю збільшення чи зменшення продуктивності вентиляційних установок у кожній зоні [128].

Норми параметрів мікроклімату в житлових приміщеннях визначаються різними стандартами та рекомендаціями, але основні параметри зазвичай встановлено так [21]: температура повітря в межах  $20\text{--}24^\circ\text{C}$  узимку та  $23\text{--}26^\circ\text{C}$  влітку, відносна вологість повітря:  $25\text{--}60\%$ . Користувач повинен мати можливість змінювати межі цих параметрів за бажанням. Особливо це важливо, коли працівники підземних приміщень відкритого планування тимчасово залишають будівлю. Зниження температури може призвести до економії енергії. Система повинна автоматично коригувати значення мікроклімату в разі будь-яких відхилень від встановлених норм [129]. Проведений аналіз виявив, що підтримка встановлених кліматичних параметрів у приміщенні є необхідною умовою для належної роботи автоматизованої системи, призначеної для контролю мікроклімату [130].

Для налаштування системи моніторингу й унормування показників визначаємо попередні задані параметри, які характеризуватимуть поточний стан системи управління, а саме:

**Температура (T):** Норма (за ДБН В.2.5-67:2013 [21]):  $20\text{--}24^\circ\text{C}$ ; Попередження:  $<19^\circ\text{C}$  або  $>25^\circ\text{C}$ ; Критично:  $<15^\circ\text{C}$  або  $>30^\circ\text{C}$ .

**Відносна вологість повітря (RH або  $\varphi$ ):** Норма (за ДБН В.2.5-67:2013 [21]):  $25\text{--}60\%$ ; Попередження:  $<25\%$  або  $>70\%$ ; Критично:  $>75\%$  (короткочасне) або  $<20\%$

**Радон (Rn):** Рекомендовано:  $\leq 100$  Бк/м<sup>3</sup> (ВООЗ); Попередження / дія:  $> 100$  Бк/м<sup>3</sup> – активувати вентиляцію, перевірити джерела просочення; Критично:  $> 300$  Бк/м<sup>3</sup> – негайні заходи, евакуація, виклик спеціалізованих служб.

**CO<sub>2</sub>:** Норма:  $\leq 1000$  ppm (ASHRAE); Попередження:  $> 1200$  ppm; Критично:  $>1500$  ppm – ризик для здоров'я, негайна евакуація/вентиляція

Алгоритм реалізації системи управління та унормування контролю вмісту шкідливих речовин у повітряному просторі, мікрокліматичних показників та систем життєзабезпечення кімнатних рослин зображено на рис. 4.3. Алгоритм розпочинається з визначення періоду доби та опитування датчиків руху з метою ідентифікування наявності людей у приміщенні та визначення зони перебування.

У вечірній (неробочий) час або в період, коли персонал відсутній у приміщенні, система формує керівний вплив для ввімкнення фітоламп та бактерицидних ламп для підтримання життєдіяльності рослин у підземному просторі та дезінфікування приміщення. При цьому відбувається опитування датчиків рівня  $\text{CO}_2$  і  $\text{Rn}$  для підтримання режимів вентиляції у визначених межах на рівні допустимих значень  $\text{CO}_2$ . У випадку незмінно підвищеного рівня радону у межах  $\text{Rn}$  150–250 Бк/м<sup>3</sup> протягом доби вмикається постійний підвищений (але не максимальний) повітрообмін, додатково необхідно залучити план перевірки герметичності та геологічного обстеження приміщення для усунення місць проникнення.

За наявності людей у приміщенні за допомогою датчиків руху визначається їх зона розташування та скупченість, відбувається зчитування датчиків  $\text{CO}_2$  і  $\text{Rn}$  і порівняння їх поточних значень вже з еталонними показниками, які є найбільш безпечними і комфортними для людини. При цьому корекція повітрообміну відбувається за рахунок увімкнення витяжної загальнообмінної або місцевої вентиляції, після деякого періоду часу відбуваються порівняння даних з датчиків з еталонними. Якщо значення відповідає потрібним, то мікроконтролер відправляє сигнал на вимкнення вентиляторів. У періоди підвищеного відвідування та високої концентрації людей при досягненні вмісту  $\text{CO}_2$  до 900 ppm протягом 2 хв алгоритм підвищує вентиляцію на один ступінь. Якщо через 5 хв  $\text{CO}_2$  не впав — ще один ступінь.

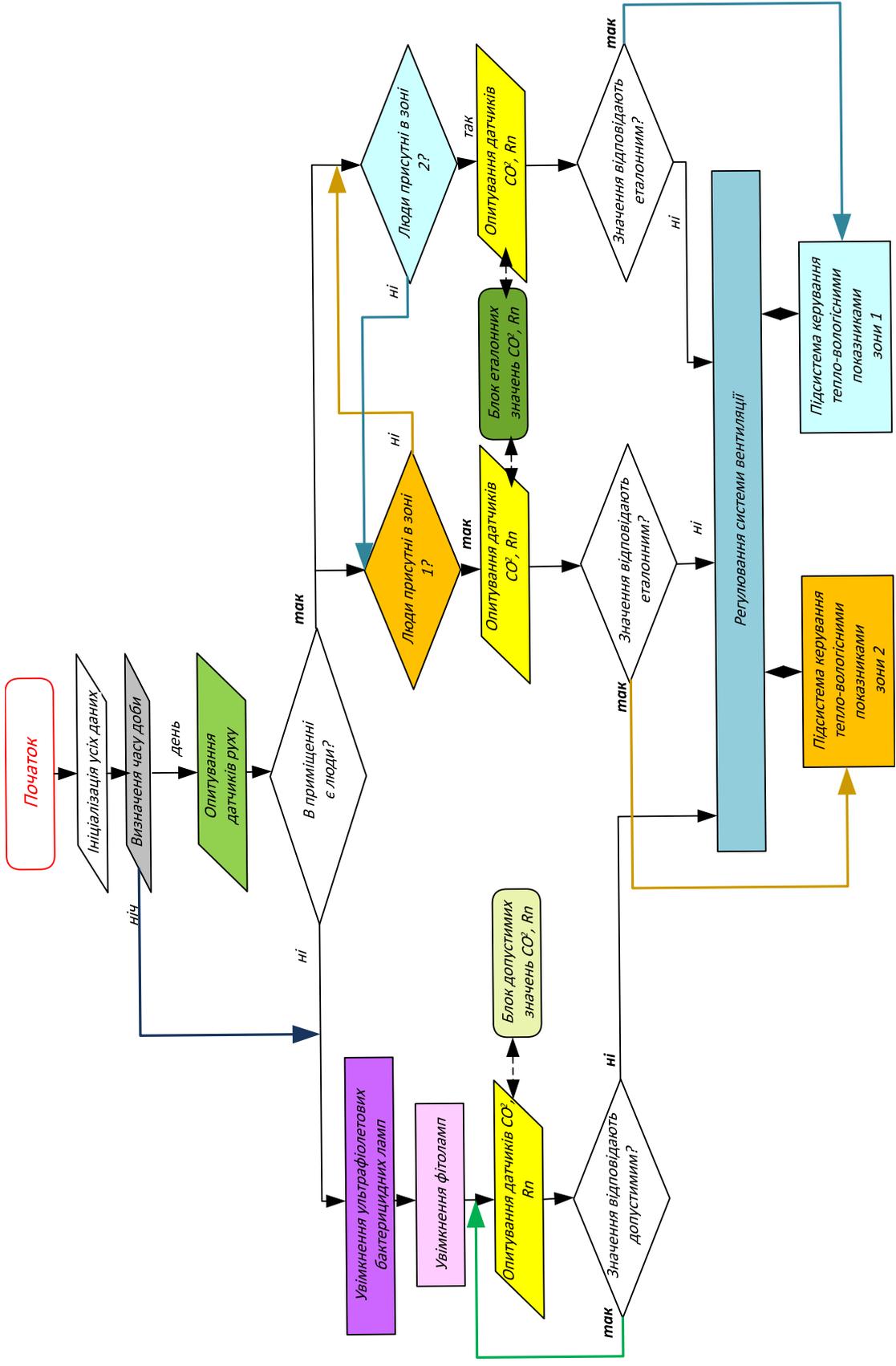


Рис. 4.3. Алгоритм системи управління показниками комфортного і безпечного середовища підземних приміщень/відкритого планування

При досягненні коректних значень показників  $\text{CO}_2$  і  $R_n$  система переходить до підтримання мікрокліматичних показників температури за зонами, відносної вологості та стратифікації.

Система контролю температури приміщення є складовою частиною загальної системи вентиляції та кондиціонування повітря. Підсистема регулювання температури повітря в приміщенні забезпечує автоматичний контроль за температурним режимом в середині приміщення та виконує необхідні дії для підтримання встановленого режиму з урахуванням температурної стратифікації [131,132].

Опитування людей показало різні температурні уподобання, причому трохи більше 52 % людей відчувають спеку, а 48 – комфорт або холод. Це вимагає температурне зонування підземних приміщень, що зумовлено різними фізіологічними та індивідуальними уподобаннями людей щодо мікрокліматичних умов. Організація теплих і прохолодних зон у межах одного простору дозволяє гнучко адаптувати робоче середовище до потреб персоналу, знижує ризик теплового дискомфорту та підвищує загальний рівень задоволеності умовами праці. Такий підхід сприяє оптимізації продуктивності, зменшенню стресових факторів і формуванню індивідуалізованого простору у колективних робочих середовищах підземного розташування.

Підземне приміщення відкритого планування ділиться на дві температурні зони: прохолодна зона 1 (COOL) і тепла зона 2 (WARM). У кожній зоні передбачено двошарова стратифікація за датчиками:  $T_{down}$ ,  $T_{up}$ , (датчики на рівні підлоги, на рівні робочої зони).

Робота системи регулювання температури повітря в приміщенні полягає у взаємодії з датчиками температури повітря, що здійснює постійний моніторинг показників. Відповідно до отриманої інформації, система визначає режим роботи залежно від встановленої температури.

Необхідним параметром налаштування тепло-вологісних показників є орієнтування на пору року, оскільки комфортна температура буде відрізнятися

залежно від одягу та адаптації організму людини до зовнішніх показників температури.

При виборі режиму "Холодна пора року", температура повітря в середині приміщення повинна бути в межах 20-24 °С. Повітря проходить через рекуператор, після чого відбувається порівняння температури датчиків з еталонним значенням [132,133].

Якщо температура відповідає потрібній, повітря спрямовується до приміщення. У разі, якщо температура не відповідає потрібній, вмикається калорифер або кондиціонер з функцією нагрівання повітря, який нагріває припливне повітря. Після цього знову відбувається порівняння з еталонним значенням. Система постійно моніторить показники температури, а отримані дані зберігаються та відображаються на пульті керування або ПК для подальшого аналізу та управління системою [135].

Режим "Тепла пора року" передбачає, що температура повітря в підземному приміщенні відкритого планування повинна перебувати в діапазоні 23-26 °С. Для забезпечення встановленої температури використовується спеціальна система, що містить рекуператор та охолоджувач або кондиціонер.

Повітря після проходження через рекуператор потрапляє на датчик температури, де відбувається порівняння з еталонним значенням. Якщо показники збігаються, то повітря надходить до приміщення. В іншому випадку, система автоматично вмикає охолоджувач, який знижує температуру повітря до необхідного рівня.

Після цього знову проводиться порівняння з еталонним значенням, а далі система знову контролює показники та передає необхідну інформацію на пульт керування для збереження й аналізу. Такий підхід дозволяє оператору системи в режимі реального часу контролювати роботу технологічного процесу та вчасно виявляти та усувати будь-які несправності.

Для підтримання параметрів мікроклімату передбачено застосування спеціальних пристроїв, зокрема кондиціонерів, калориферів, рекуператорів,

зволожувачів та інших [134]. Під час розроблення структурної та функціональної схеми програмного таймера, важливо врахувати вимоги до цих систем. Згідно з поставленим завданням, програмований таймер повинен управляти засобами забезпечення комфорту відповідно до заданої програми з урахуванням сигналів від сенсорів. Система має автоматично коригувати параметри мікроклімату у разі відхилень від установлених значень.

Алгоритм функціонування автоматизованої системи керування мікрокліматом можна представити за допомогою декількох блоків (рис. 4.4).

Після ввімкнення живлення проводиться ініціалізація всіх систем, підготовлення до роботи, налаштування, визначення параметрів. На наступному кроці зчитуються вимірювані значення, отримані від сенсорів. Виміряні дані температури, вологості й атмосферного тиску виводяться на дисплей. Мікроконтролер порівнює ці дані із значеннями задовільного клімату, які вносять на етапі програмування [135]. Також ці значення можна налаштувати в меню. Після аналізу даних мікроконтролер передає сигнал до блоку реле. У разі незадовільного стану мікроклімату реле активує відповідні пристрої, в іншому разі мікроконтролер знову порівнює вхідні дані.

Враховуючи складність процесу оптимізації мікроклімату, обумовлену наявністю багатьох збурювальних впливів і необхідністю безперервного контролю й управління об'єктом, ефективне функціонування таких систем можливе лише при їх автоматизації.

Для забезпечення температурного зонування алгоритм керування температурою зберігається з налаштуваннями на комфортну температуру відповідної зони. Для досягнення якнайкращого зонального температурного регулювання доцільно використовувати децентралізоване керування кожною зоною та розміщення приладів забезпечення показників з протилежних боків задля зменшення перемішування повітряних потоків.

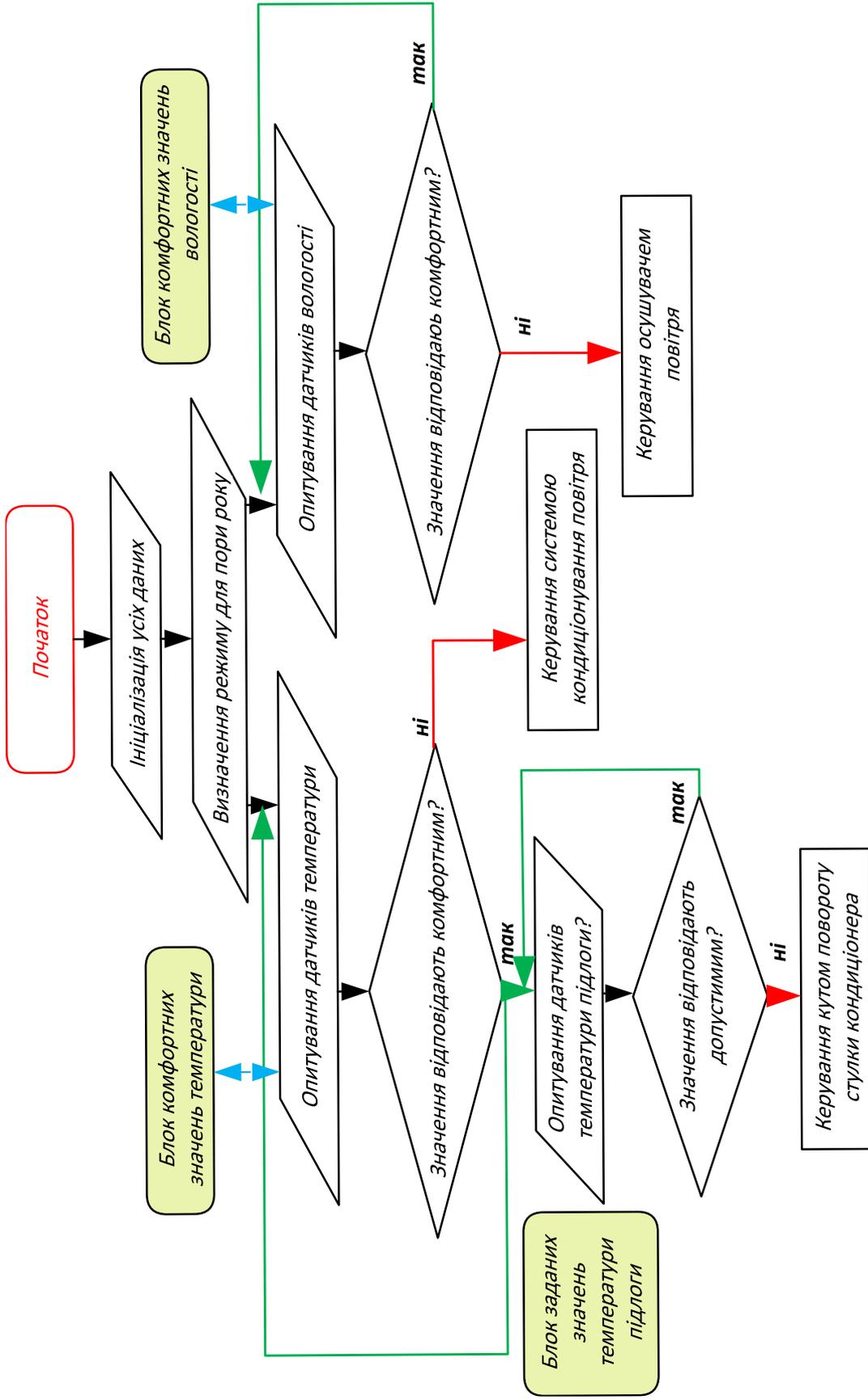


Рис. 4.4. Алгоритм системи управління показниками комфортного і безпечного середовища підземних приміщень відкритого планування

Сьогодні можна виділити два принципи моніторингу розподілених параметрів мікроклімату у підземних приміщеннях: на основі точкових вимірювань стаціонарно встановленими датчиками та на основі мобільних електротехнічних вимірювальних комплексів. Також слід акцентувати увагу на впровадженні інформаційних технологій для отримання та визначення поточних і прогнозних значень контрольованих параметрів мікроклімату методами математичного моделювання [136].

Принцип керування обирається автоматично програмованим-логічним контролером або комп'ютером на основі оброблення даних щодо температури (відносної вологості) – у кожній із умовних зон приміщення. Критерієм вибору способу регулювання є отримання значення дисперсії ( $D^2$ ):

$$D^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T^i - T)^2 \quad (4.1)$$

де  $N$  – число зон приміщення (у нашому випадку  $N=2$  «тепла зона» і «прохолодна зона»);

$T_i$  – значення температури відповідно у кожній з зон та в середньому по приміщенню;

$T$  – середнє значення температури в приміщенні.

Для встановлення потрібних значень температури й відносної вологості у кожній з двох зон встановлюють необхідні значення температури і вологості у кожній зоні приміщення.

При розробленні таких систем мікроклімату слід ураховувати характерні їм певні особливості:

1) залежність основних параметрів (температури, вологості, швидкості руху повітря і т.п.) від зовнішніх і внутрішніх впливів, які змінюються як протягом доби, так і в різні періоди року;

2) наявність технологічного зв'язку систем мікроклімату із біологічними об'єктами.

3) розосередженість у широких межах параметрів, які контролюються й регулюються як в об'ємі, так і в часі.

Наведені особливості знаходять своє відображення у формуванні концепції та структури сучасної автоматичної системи керування (АСК) параметрами температурно - вологісного режиму.

На основі проведених досліджень запропоновано систему автоматизованого керування мікрокліматом житлових приміщень, а також розроблено програмований таймер для регулювання мікроклімату з використанням апаратно-програмної платформи Arduino та сенсорів температури, відносної вологості повітря й атмосферного тиску.

За допомогою розробленого програмованого таймера можна налаштувати необхідні параметри мікроклімату, що сприяє енергоефективному використанню систем опалення та кондиціонування повітря. Порівняння розробленої системи з відомими пристроями на ринку свідчить про її ефективність і конкурентоспроможність.

Отже, структурна схема складається з таких основних блоків:

- мікропроцесорного блока, який збирає, обробляє дані з інших компонентів системи та керує їхньою роботою;
- блока сенсорів температури, вологості та атмосферного тиску, що відповідають за моніторинг показників температури, відносної вологості та тиску повітря в приміщенні;
- блока живлення, який забезпечує електроживлення для мікроконтролера та інших компонентів системи.

Налаштування та навігацію в меню системи дозволяє здійснювати енкадер, увімкнення або вимкнення пристроїв для підтримання мікроклімату відповідно до заданих умов здійснюється через блок реле. Для візуального

відображення інформації про поточні параметри мікроклімату використовується дисплей.

Систему контролю безпечних та комфортних показників підземного приміщення відкритого планування було реалізовано під час переобладнання підвального приміщення під Coworking-центр для молоді в одному з центральних регіонів України.

Для перевірки значень рівня радону було виконано 30-денне цілодобове дослідження його показників за допомогою Vertin Instruments AlphaE і додатково проведено герметизацію та ізоляцію потенційних місць проникнення рис.4.5. Для моніторингу показників та ефективності спрацьовування системи підтримки мікрокліматичних показників було реалізовано цілодобове спостереження датчиків вологості і температури з виведенням на монітор середнього значення (рис. 4.6...4.7, додаток В).

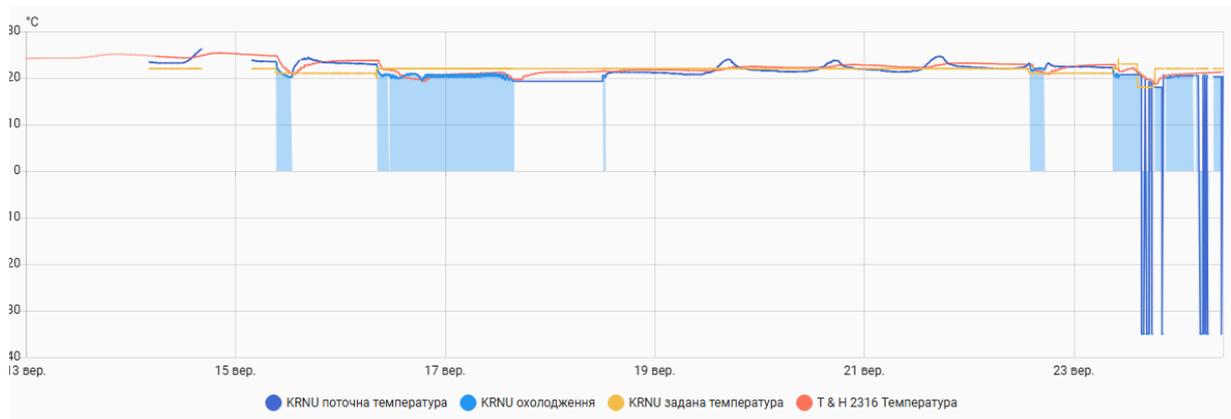
Усі значення обробляються за алгоритмом і формують інформаційну панель SCADA/IoT для віддаленого моніторингу, історії, налаштувань порогів та оновлення ПЗ.

Таким чином, автоматизовані системи моніторингу та регулювання параметрів мікроклімату забезпечують своєчасне виявлення небезпечних відхилень, підтримання оптимальних умов для здоров'я та продуктивності персоналу, а також зниження енергетичних витрат.

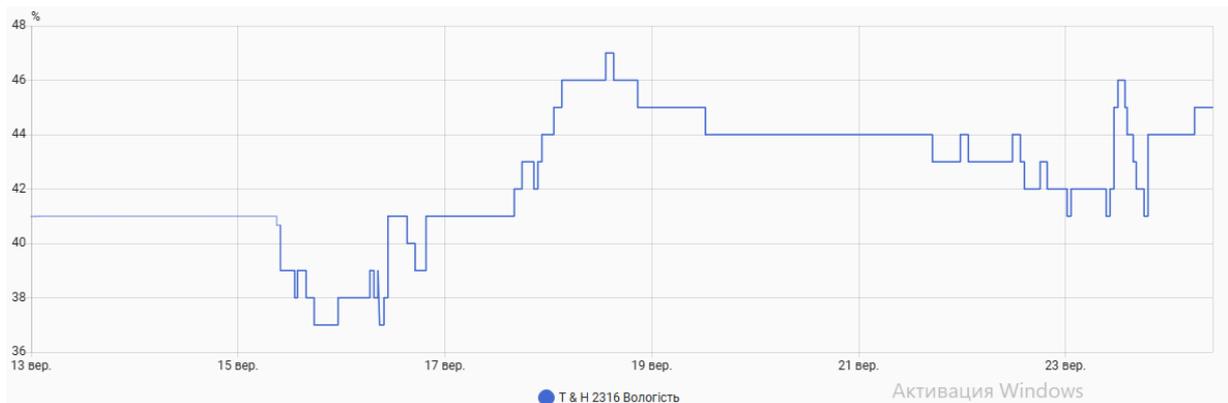
Використання інтегрованих інформаційних панелей для візуалізації даних підвищує прозорість контролю, спрощує прийняття управлінських рішень і дозволяє здійснювати комплексний аналіз показників у режимі реального часу. Такий підхід формує надійну основу для створення безпечних, комфортних та енергоефективних робочих просторів підземного розташування.



Рис. 4.5. Процес переобладнання підвального приміщення у підземний Coworking-центр з впровадженням системи управління показниками комфортного і безпечного середовища



а)



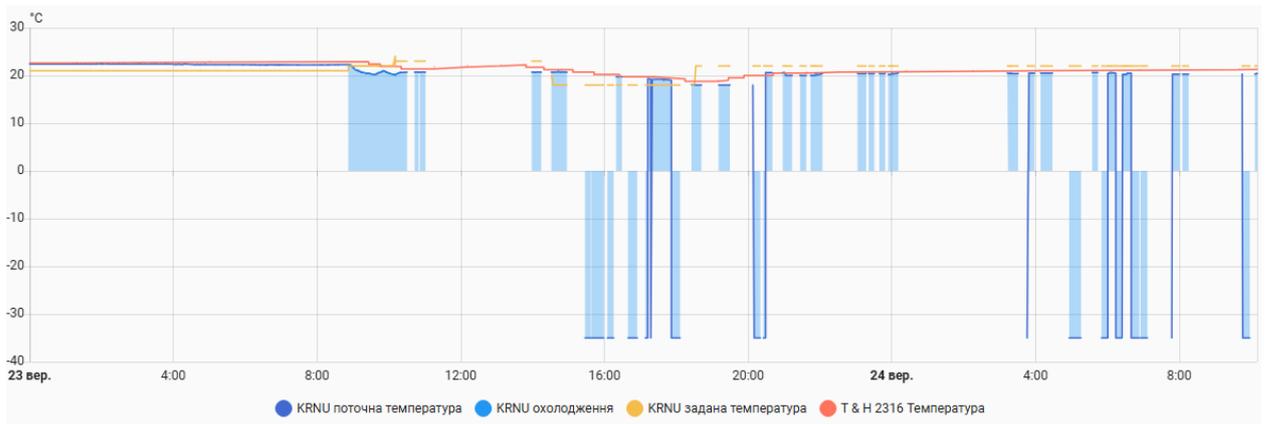
б)

Рис. 4.6. Щодобовий моніторинг системи управління показниками комфортного та безпечного середовища:

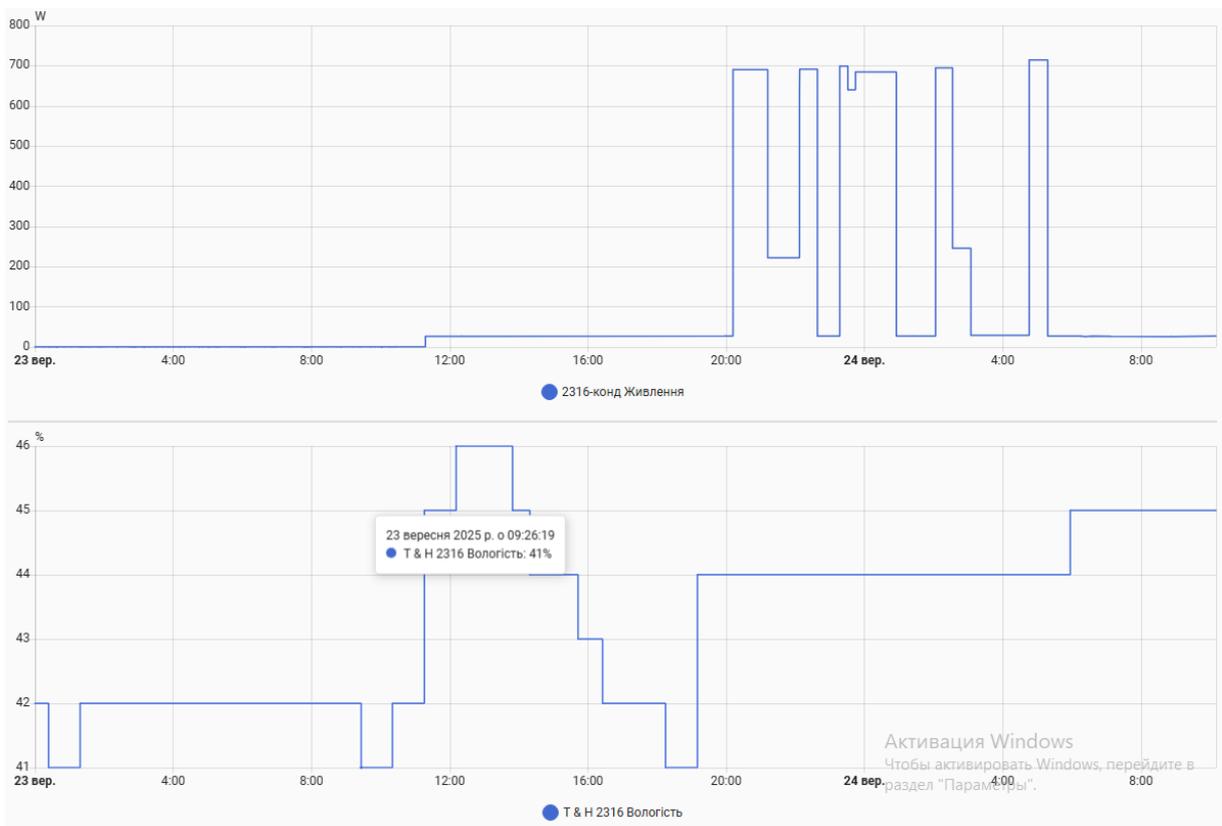
а) сукупність параметрів мікроклімату: заданих і поточних з можливістю відслідковування похибки регулювання; б) виокремлений показник відносної вологості повітря

### 4.3. Висновки за розділом 4

Реалізація системи управління параметрами комфортного та безпечного середовища у підземних приміщеннях відкритого планування є необхідною з огляду на специфіку таких об'єктів, де природна вентиляція обмежена, а ризик накопичення радону та вуглекислого газу є особливо високим. Це має не лише санітарно-гігієнічне, але й соціально-економічне значення з забезпеченням відповідності міжнародним стандартам та національним нормативам.



а)



б)

Рис. 4.7. Щогодинний моніторинг системи управління показниками комфортного та безпечного середовища: а) сукупність параметрів мікроклімату: заданих і поточних з можливістю відслідковування похибки регулювання; б) виокремлені показники відносної вологості повітря й енергоспоживання системи.

Окрім контролю та унормування концентрацій радону та  $\text{CO}_2$ , а також відносної вологості й температури повітря, важливе значення має врахування температурного зонування приміщення, оскільки перерозподіл повітряних мас

у великих підземних залах спричиняє утворення зон локального перегрівання або переохолодження, що призводить до зниження рівня термічного комфорту та енергоефективності систем вентиляції та кондиціонування повітря.

У великих підземних просторах із високими стелями та значною площею часто спостерігається температурна стратифікація – нерівномірний розподіл теплоти по вертикалі та горизонталі. Це призводить до формування зон перегріву чи переохолодження, що викликає термічний дискомфорт для користувачів і знижує ефективність системи кондиціонування.

Таким чином, інтеграція контролю температурної стратифікації у систему управління мікрокліматом підземних приміщень відкритого планування є критично важливою не лише з огляду на ергономіку та санітарно-гігієнічних вимоги, але й у контексті енергоефективності та відповідності міжнародним стандартам комфорту.

Ключовим елементом підвищення ефективності системи управління мікрокліматом є візуалізація та аналіз даних, що забезпечують можливість відстеження параметрів у реальному часі, виявлення відхилень від нормативних значень, прогнозування тенденцій та оптимізації роботи обладнання. Інтегрування аналітичних інструментів та інформаційних панелей дозволяє підвищити точність регулювання мікроклімату, мінімізувати енерговитрати та формувати умови, які відповідають сучасним критеріям безпеки та комфорту.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У роботі вирішено важливу задачу розроблення системи контролю та унормування показників середовища для створення здорових і безпечних умов в приміщеннях відкритого планування підземного розташування. Воєнні дії на території України актуалізували необхідність адаптації підземних приміщень, первісно призначених для інших функцій (складських, транспортних, інженерних тощо), під робочі простори. Такий підхід обумовлений потребою забезпечення безпеки персоналу від обстрілів і вибухових загроз, а також підтриманням безперервності управлінських і виробничих процесів.

2. На основі аналізу літератури було визначено, що підземні приміщення відкритого планування характеризуються специфічними мікрокліматичними умовами, зокрема температурною стратифікацією, підвищеним ризиком накопичення вуглекислого газу та радону, а також обмеженим природним освітленням і вентиляцією, що створює ефект «хворої будівлі» для людей, які перебувають в таких робочих приміщеннях протягом тривалого часу. З метою структурування таких особливостей було запропоновано класифікацію факторів, які найбільше впливають на організм людини при перебуванні у підземних приміщеннях. Ці фактори потребують впровадження спеціалізованих систем моніторингу та регулювання для забезпечення безпеки, комфорту та продуктивності користувачів.

3. Результати вимірювання параметрів повітряного середовища показали, що у приміщеннях відкритого планування підземного розташування температура, відносна вологість повітря й уміст CO<sub>2</sub> значною мірою залежать від кількості людей та тривалості їх перебування. У приміщенні формується температурне розшарування, зокрема на рівні підлоги температура знижується до 16 °C. Спостерігається значна зміна параметрів внутрішнього середовища протягом робочого дня – відносна вологість повітря від 44 до 65 % та уміст вуглекислого газу від 520 до 1400 ppm. Зростання щільності та часу присутності персоналу призводить до підвищення теплового навантаження,

надходжень вологи та накопичення вуглекислого газу, що потребує безперервного моніторингу та автоматизованого регулювання мікроклімату. Рівень запиленості підземних просторів відкритого планування має незначні відхилення від нормативних показників і в основному зумовлений концентрацією пилових частинок притяжного повітря, що можна регулювати за допомогою встановлення спеціальних фільтрів при подачі повітря у приміщення.

4. На основі проведеного опитувань серед користувачів підземних приміщень було встановлено найбільш вагомні фактори, що впливають на їхнє самопочуття та ефективність діяльності. Зазначена методика дозволила оцінити суб'єктивне сприйняття параметрів мікроклімату (температури, вологості, якості повітря), рівня шуму, освітленості та психологічного комфорту. Лише 21 % респондентів задоволений внутрішніми умовами приміщення, 52 % відзначають перегрівання, а 27 % – переохолодження. Температурне розшарування не створює дискомфорт лише для 33 % респондентів, а 39 % відчувають значний дискомфорт. Понад половину респондентів відчувають високу вологість і запахи та оцінили якість повітря як погану. У результаті більше половини респондентів наприкінці робочого дня відчувають сильну втому, а 36 % – середній рівень втоми. 72 % респондентів оцінили освітленість робочого місця як комфортне, проте 74 % відчувають помірну зорову втому й 11 % – значну. Отримані результати створили підґрунтя для виявлення критичних проблем, встановлення пріоритетів заходів щодо оптимізації середовища та розробки комплексних систем управління мікрокліматом у підземних просторах. Через те, що більше половини людей відчувають спеку, а біля половини – комфорт і холод, постає необхідність температурного зонування підземних приміщень для забезпечення умов для продуктивної праці.

5. Математичне моделювання теплообміну у підземних приміщеннях відкритого планування дозволяє оцінити стратифікацію температури, локальні зони перегрівання або переохолодження та ефективність вентиляційних і

опалювальних систем. Дослідження процесів теплообміну у підземних приміщеннях відкритого планування передбачає комплексну оцінку взаємодії повітря, поверхонь та присутніх людей для забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов. Основними джерелами теплоти виступають як інженерні системи (опалення, освітлення, обладнання), так і люди, що формує локальні термічні поля та впливає на розподіл температури у приміщенні. Особливістю підходу є врахування теплових властивостей ґрунту та поверхонь приміщення, які впливають на кондуктивний та випромінювальний теплообмін. Отримані дані є необхідними для проектування комфортного середовища праці, оптимізації енергоспоживання та забезпечення психо-емоційного і фізичного комфорту персоналу при тривалому перебуванні у підземних робочих просторах.

6. Для нормалізування мікробіологічного стану внутрішнього середовища ефективним є використання ультрафіолетових ламп. Рекомендується використовувати ультрафіолетові лампи типу UV-C з довжиною хвилі 254 нм потужністю 15...30 Вт на 20...30 м<sup>2</sup> площі. Час експонування становить 2...100 с залежно від виду мікроорганізмів.

7. Розміщення кімнатних рослин у підземних приміщеннях має важливе значення для психо-емоційного комфорту та покращення внутрішнього середовища підземних приміщень. Використання тіньюлюбних і невибагливих видів рослин дозволяє підтримувати їх життєздатність та сприяє створенню комфортного та здорового середовища в підземних просторах, зокрема дозволяє знизити тривожність і підвищити продуктивність праці. Через відсутність денного світла для рослин повинно забезпечуватися штучне освітлення з відповідним спектром, контроль вологості та температури ґрунту.

8. Реалізація автоматизованої системи управління параметрами комфортного та безпечного середовища у підземних приміщеннях відкритого планування є необхідною з огляду на специфіку таких об'єктів, зокрема особливо високий ризик накопичення радону та вуглекислого газу. Алгоритм керування такою системою ґрунтуються на пріоритетності безпекових

показників над комфортними. Фактори комфорту досягаються шляхом температурного зонування, зниженням вертикальної температурної стратифікації та орієнтації системи на місця скупчення людей у приміщенні. Ключовим елементом є візуалізація та аналіз даних, що забезпечують можливість відстеження параметрів у реальному часі, виявлення відхилень від нормативних значень, прогнозування тенденцій та оптимізації роботи обладнання. Інтегрування аналітичних інструментів та інформаційних панелей дозволяє підвищити точність регулювання мікроклімату, мінімізувати енерговитрати та формувати умови, які відповідають сучасним критеріям безпеки та комфорту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Єрменчук О. П. Основні підходи до організації захисту критичної інфраструктури в країнах Європи: досвід для України : монографія / О. П. Єрменчук. Дніпро : ДДУВС, 2018. – 180 с.
2. Верховна Рада України. Про критичну інфраструктуру. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20>
3. Кудрицький В. Енергетична інфраструктура України матиме три рівні захисту від російських атак – голова «Укренерго» Кудрицький. *Radio Свобода*. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-enerhetyka-zakhystataky-rf/32634122.html>
4. Залужний В. Перспективи забезпечення воєнної кампанії 2023 року: український погляд [Електронний ресурс] Режим доступу : <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3566162-ak-zabezpeciti-voennu-kampaniu-u-2023-roci-ukrainskij-poglad.html>.
5. Микола Мацала Деякі економічні аспекти із улаштування захисту критичної інфраструктури, *International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2024"November 2024, Kyiv, Ukraine*, с. 381-382. <https://doi.org/10.59647/978-617-520-936-3/1> .
6. Бобро Д.Г. Визначення критеріїв оцінки та загрози критичній інфраструктурі, *Стратегічні пріоритети. Серія «Економіка»*. 2015. № 4 (37). – С. 83-93.
7. Use of Underground Facilities to Protect Critical Infrastructures [Електронний ресурс] : *Summary of a Workshop / National Research Council. Washington, DC* : The National Academies Press, 1998. Режим доступу : <https://doi.org/10.17226/6285>.
8. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки

будівель і споруд : ДБН В.1.2-14:2018 / Мінрегіон України, УкрНДІпроектстальконструкція. – К. : Укрархбудінформ, 2018. С. 30 с.

9. В. І. Коцюруба, А. С. Білик, А. О. Веретнов, Методика розрахунків та обґрунтування вимог до інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від БПЛА типу баражуючий боеприпас. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2022. № 109. С.164–183.

10. Кодекс цивільного захисту України. Документ 5403-VI, чинний, поточна редакція – Редакція від 31.03.2023]

11. ДБН В.1.2-4:2019 Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони) – Чинний від 2019-08-01. – Київ, Мінрегіон 2019

12. ДБН В.2.2-5-97 Захисні споруди цивільної оборони. Будинки і споруди– Чинний від 2019-01-01. –Київ: Мінрегіон, 2018

13. Деякі питання використання захисних споруд цивільного захисту. Постанова Кабінету Міністрів України від 10 березня 2017 р. № 138. Документ 138-2017-п, чинний, поточна редакція – Редакція від 18.02.2023, підстава - 134-2023-п

14. ДСТУ Б А.2.2-7:2010. Проектування. Розділ інженерно-технічних заходів цивільного захисту (цивільної оборони) у складі проектної документації об'єктів. Основні положення. – Чинний від 2010 -01-19. Київ: Мінрегіон, 2010.

15. М. В. Коваль, В. В. Коваль, В. І. Коцюруба, А. С. Білик, Організаційно-технічні засади побудови системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України, *Актуальні питання національної безпеки і оборони*. № 3-4 (2022), С.11-16. DOI: <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2022-20-3-4-11-16>.

16. Evron Y. Israel's defence industry: adaptation and growth in a changing arms market. *Defence Studies*. 2025. 25(2). P. 301–321. <https://doi.org/10.1080/14702436.2025.2472720/>

17. Meir, I. A., I. Gilead. Underground dwellings and their microclimate under arid conditions. In *GRECO & ACAD (eds.) Design With the Environment, Proc. 19th PLEA 2002 Int. Conf. Toulouse, France. Vol.2. Pages 618-624.*

18. Fang L., Wyon David., Clausen Geo, Fanger P. Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality. SBS symptoms and performance. *Indoor air.* 2004. 14 Suppl 7. P.p. 74-81. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00276.x>.

19. ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту». Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 10.08.2023 року № 702.

20. Yong Li, Shibin Geng, Xiaosong Zhang, Hua Zhang. Study of thermal comfort in underground construction based on field measurements and questionnaires in China. *Building and Environment.* 2017. Volume 116. Pages 45-54, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.003>.

21. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування». – Чинний від 2014-01-01. – Київ, Мінрегіон 2013

22. Bo Lan, Zhun (Jerry) Yu, Gongsheng Huang. Study on the impacts of occupant distribution on the thermal environment of tall and large public spaces. *Building and Environment.* 2022. Volume 218. 109134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109134>.

23. О.Т. Возняк Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини. *Львівська політехніка.* 2010 <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/25766abb-4d8c-449b-8f99-2ce8496242de/content>.

24. Sarah C. Dornberger, Alessandro F. Rotta Loria, Manlu Zhang, Leimin Bu, Jean-Luc Epard, Pascal Turberg, Heat exchange potential of energy tunnels for different internal airflow characteristics, *Geomechanics for Energy and the Environment*, Volume 30, 2022, 100229, ISSN 2352-3808, <https://doi.org/10.1016/j.gete.2020.100229>.

25. Ping Cui, Weibo Yang, Wenke Zhang, Ke Zhu, Jeffrey D. Spitler, Mingzhi Yu, Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling: Review and perspectives, *Energy and Built Environment*, Volume 5, Issue 2, 2024, Pages 255-269, ISSN 2666-1233, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.10.002> .
26. Nie, L.; Liu, H.; Wang, J.; Tong, S.; Ji, X. Underground Space and Climate Synergy Wind–Heat Environmental Response in Cold Zones. *Buildings* 2025, 15, 2151. <https://doi.org/10.3390/buildings15132151> .
27. Yang B., Yao H., Wang F. A Review of Ventilation and Environmental Control of Underground Spaces. *Energies*. 2022. Volume 15. Issue 2. 409. <https://doi.org/10.3390/en15020409>.
28. Kim, K., Kim, J., Lee, Y.G. et al. Revitalizing subterranean spaces: a comprehensive study on enhancing air quality in underground shopping malls for sustainable urban living. *Sustain Environ Res*. 2024. 34, 25. <https://doi.org/10.1186/s42834-024-00231-z>.
29. Yap H.S., Roberts A.C., Luo C., et al. The importance of air quality for underground spaces: An international survey of public attitudes. *Indoor Air*. 2021. Volume 31. Pages 2239–2251. <https://doi.org/10.1111/ina.12863>.
30. G.S.N.V.K.S.N. Swamy. Development of an indoor air purification system to improve ventilation and air quality. *Heliyon*. 2021. Volume 7. Issue 10. e08153. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08153>.
31. Nicola Carslaw. A new detailed chemical model for indoor air pollution. *Atmospheric Environment*. 2007. Volume 41. Issue 6. Pages 1164-1179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.09.038>.
32. Hong Yuan, Yuan He, Yuanyuan Wu. A comparative study on urban underground space planning system between China and Japan. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Volume 48. 101541. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101541>.
33. Sung, H. J., Kim, S. H., & Kim, H. Analysis of Building Retrofit, Ventilation, and Filtration Measures for Indoor Air Quality in a Real School Context: A Case Study in Korea. *Buildings*, 2023, 13(4), 1033. <https://doi.org/10.3390/buildings13041033>.

34. Angui Li, Risto Kosonen, Arsen Melikov, Bin Yang, Thomas Olofsson, Bjørn Sørensen, Linhua Zhang, Ping Cui, Ou Han. *Ventilation and environmental control of underground spaces: a short review*. E3S Web Conf. 2019. 111 01039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911101039>.
35. Tsiuriupa Y. Biosafety Provision in Large Halls. Case Study. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2024. Vol. 13, no. 2. P. 6–14. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-2-13-6-14>.
36. Wang, M., Li, L., Hou, C., Guo, X., & Fu, H. Building and Health: Mapping the Knowledge Development of Sick Building Syndrome. *Buildings*, 2022, 12(3), 287. <https://doi.org/10.3390/buildings12030287>.
37. Лізогуб В.Г., Савченко О.В., Запека Ю.С., Баайцер М.С. Роль вуглекислого газу в організмі людини. *Перший незалежний науковий вісник*. 2015. № 4. С. 29-32.
38. ASHRAE. Ventilation for acceptable indoor air quality: ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022. *Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 2022. 70 p.
39. Павленко Т. О., Фризюк М. А., Тарасюк О. Є. До питання впливу радону на робочих місцях в існуючій ситуації опромінення. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2024. Вип. 29. С. 152-162. Режим доступу: [https://radiationproblems.org.ua/29\\_2024/NRCRMHO\\_2024\\_Article\\_9.pdf](https://radiationproblems.org.ua/29_2024/NRCRMHO_2024_Article_9.pdf).
40. Шелест З.М., Корбут М.Б., Герасимчук О.Л., Кальчук С.В. Оцінка радіаційного фону в житлових приміщеннях, зумовленого техногенно підсиленими джерелами природного походження. *Технічна інженерія*. № 1 (91). 2023. С. 398-406. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-398-406](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-398-406).
41. Sources and Effects of Ionization Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: *UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annex*. New York : UN, 2000. – 657 p. Access mode : [https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf)

42. Skrypka, H., Naydich, O., Piven, O., Pshychenko, V., & Dankevych, N. Моніторинг рівню радіаційного фону на ринках м. одеси. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2025. (114). С. 58-70. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2025.114.06>.
43. Фризюк М.А., Аксьонов М.В., Федоренко О.В. Оцінка рівнів радону у дитячих навчальних закладах м. Кропивницький для впровадження протирадонових заходів. *Довкілля та здоров'я*. 2018. № 3. С. 56–62.
44. Beihul, I. O. (2020). Negative impact of radioactive radiation on human health. Biological, medical and scientific-pedagogical aspects of human health: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 139-140). Astraia. <https://surl.li/kaoabs>.
45. Abdollah Khorshidi, Assessment of radon gas level in underground stations of Tehran-Karaj plain in Iran. *Results in Chemistry*. Volume 15. 2025. 102195. ISSN 2211-7156. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102195>.
46. Grygier, A., Skubacz, K., Piech, A. et al. Two-year assessment of radon exposure in the underground tourist route in the Historic Silver Mine in Tarnowskie Góry (Poland). *Sci Rep*. 2025. 15. 8828. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89424-z>.
47. Yijune Choi, Soonjae Lee. Apportioning radon contamination sources in underground spaces using a grey-box model. *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Volume 484. 136707. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136707>.
48. Полякова І. Радон як один з найбільш небезпечних факторів впливу на шахтарів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2018. № 18. С. 132-138. <https://doi.org/10.32447/20784643.18.2018.15>.
49. Anastasios Kallianiotis, Despina Papakonstantinou, Ilias C. Toliias, Andreas Benardos, Evaluation of fire smoke control in underground space, *Underground Space*, Volume 7, Issue 3, 2022, Pages 295-310, ISSN 2467-9674, <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.07.010>.

50. Jia, J., Tian, X. & Wang, F. Research on smoke control for an underground mall fire, based on smoke barrier and mechanical smoke exhaust system. *Sci Rep* 12, 13071 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16067-9>.

51. Dybwad M, Granum PE, Bruheim P, Blatny JM. Characterization of airborne bacteria at an underground subway station. *Appl Environ Microbiol.* 2012 Mar;78(6):1917-29. <https://doi.org/10.1128/AEM.07212-11>. Epub 2012 Jan 13. PMID: 22247150; PMCID: PMC3298144.

52. Kaoruko Seino, Takehito Takano, Keiko Nakamura, Masafumi Watanabe, An evidential example of airborne bacteria in a crowded, underground public concourse in Tokyo, *Atmospheric Environment*, Volume 39, Issue 2, 2005, Pages 337-341, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.030>.

53. Hiroyuki Yamaguchi, Torahiko Okubo, Eriko Nozaki, Takako Osaki, Differential impact of environmental factors on airborne live bacteria and inorganic particles in an underground walkway, *Published: March 21, 2024*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300920>.

54. Elena Romanova, Negative Influence of Underground Constructions on Mental Health of the Person, *Procedia Engineering*, Volume 165, 2016, Pages 1176-1183, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.836>.

55. Yuji Wada, Hinako Sakugawa, Psychological effects of working underground, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 5, Issues 1–2, 1990, Pages 33-37, ISSN 0886-7798, [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(90\)90060-W](https://doi.org/10.1016/0886-7798(90)90060-W).

56. Цюрюпа Ю., Бубон С. Розроблення класифікації факторів, що визначають появу та перебіг «синдрому хворої будівлі». Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. 2025, с.356-358.

[https://www.researchgate.net/publication/391850615\\_Materiali\\_IV\\_Miznarodnoi\\_naukovo-](https://www.researchgate.net/publication/391850615_Materiali_IV_Miznarodnoi_naukovo-)

prakticnoi konferencii Green Construction Zelene budivnictvo Kiiv 13-14 travna 2025 r.

57. Xian Dong, Yeyu Wu, Zhijun Tu, Bin Cao, Xianting Li, Zixu Yang, Fei Liu, Zheli Xing. Influence of ambient temperature on personnel thermal comfort and working efficiency under isolation condition of underground engineering. *Energy and Buildings*. 2022. Volume 274. 112438. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112438>.

58. Hardin BD, Kelman BJ, Saxon A. Adverse human health effects associated with molds in the indoor environment. *J Occup Environ Med*. 2003 May;45(5):470-8. <https://doi.org/10.1097/00043764-200305000-00006>. PMID: 12762072.

59. Kajtár, László & Herczeg, Levente. 2012. Influence of carbon-dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work. *Időjárás*. 116. PP.145-169.

60. Landvreugd A, Nivard MG, Bartels M. The Effect of Light on Wellbeing: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Happiness Stud*. 2025;26(1):1. <https://doi.org/10.1007/s10902-024-00838-4>. Epub 2024 Dec 9. PMID: 39664799; PMCID: PMC11628446.

61. Ticleanu, Cosmin. Impacts of home lighting on human health. Lighting Res Hassan, Najmaldin. (2024). Noise pollution and its effects on human health: A REVIEW. *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR)*. <https://doi.org/10.1177/14771535211021064>.

62. J.G. Walker, M.F.K. Chan, Human response to structurally radiated noise due to underground railway operations, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 193, Issue 1, 1996, Pages 49-63, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0245>.

63. Isabelle Y.S. Chan, Zhao Dong, Hao Chen, Impacts of connections to the outside on underground space occupants' psychophysiological health: A virtual reality-based experimental approach, *Tunnelling and Underground Space*

*Technology*, Volume 147, 2024, 105675, ISSN 0886-7798, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105675>.

64. Данілов М. П., Григор'єв Л. Н., Мерещук А. В. Теплостійкість та тепловий режим будівель, інженерних комунікацій та промислових об'єктів. Дніпропетровськ: *РВВ ПДАБА*, 2001. 122 с.

65. Requist K.B., Momayez M. An Algorithm for the Efficient Placement of Air Quality Sensors in Underground Mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2025. 42. P. 1929–1944. <https://doi.org/10.1007/s42461-025-01241-0>.

66. Borchers AT, Chang C, Eric Gershwin M. Mold and Human Health: a Reality Check. *Clin Rev Allergy Immunol*. 2017 Jun;52(3):305-322. <https://doi.org/10.1007/s12016-017-8601-z> . PMID: 28299723.

67. Peter McGarry, Lidia Morawska, Savinda Arambawatta Lekamge, Simon Witts, Addressing actual and community expectations on CO<sub>2</sub> concentrations within indoor spaces – A reasonably practicable methodology using CO<sub>2</sub> concentration to assess ventilation quality to indoor spaces, *Indoor Environments*, Volume 2, Issue 3, 2025, 100101, ISSN 2950-3620, <https://doi.org/10.1016/j.indenv.2025.100101>.

68. Методика проведення моніторингу радону, Наказ Міністерства охорони здоров'я України 13 жовтня 2023 року N 1786, <https://ips.ligazakon.net/document/RE40931?an=1>

69. Joanna Kubiak, Małgorzata Basińska, A novel method for analysing indoor radon concentration measurements, *Building and Environment*, Volume 277, 2025, 112940, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112940>.

70. Бубон С.Л., Визначення показників комфортності підземних приміщень на основі опитування працівників. *Комунальне господарство міст*, 2025, том 6, випуск 191. С. 394-398. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-394-398> .

71. Long Song, Lei Huang, Yanfeng Liu, Yu Dong, Xiaojun Zhou, Jiaping Liu, Effects of indoor thermal exposure on human dynamic thermal adaptation

process, *Building and Environment*, Volume 179, 2020, 106990, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106990>.

72. Xiaojun Fan, Pawel Wargocki, Alberto Silvestri, Esther Borkowski, Arno Schlueter, Mediating effects of ventilation on the impacts of temperature on human comfort, health and cognitive performance: *A living lab study*, *Building and Environment*, Volume 285, Part B, 2025, 113587, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113587>.

73. Luo, P.; Liu, Y.; Wang, H. Experimental Study on the Effect of Temperature Up-Step on Human Thermal Perception and Skin Temperature between Activity Intensities at Low Ambient Temperatures. *Energies* 2022, 15, 4411.

74. Teyton A, Tremblay M, Tardif I, Lemieux MA, Nour K, Benmarhnia T. A Longitudinal Study on the Impact of Indoor Temperature on Heat-Related Symptoms in Older Adults Living in Non-Air-Conditioned Households. *Environ Health Perspect*. 2022 Jul;130(7):77003. <https://doi.org/10.1289/EHP10291>. Epub 2022 Jul 14. PMID: 35857398; PMCID: PMC9282277.

75. Optimization of ventilation system in the open office space. Dariusz Suszanowicz. *MATEC Web Conf*. 2018. 174. 01009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817401009>.

76. Yueming Wen, Jiawei Leng. A spatial prototype of natural ventilation in underground public spaces combining courtyard with wind tower. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2021. 703. 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/703/1/012003>.

77. Abdullah HK, Alibaba HZ. Open-plan office design for improved natural ventilation and reduced mixed mode supplementary loads. *Indoor and Built Environment*. 2020. 31(8). Pages 2145-2167. <https://doi.org/10.1177/1420326X20953458>

78. Yueming Wen, Siu-Kit Lau, Jiawei Leng, Kai Zhou, Shi-Jie Cao. Passive ventilation for sustainable underground environments from traditional underground buildings and modern multiscale spaces. *Tunnelling and Underground*

*Space Technology*. 2023. Volume 134. 105002.  
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105002> .

79. Elsaid A.M., Zahran M.S., Abdel Moneim S. et al. A recent review on ventilation and cooling of underground high-voltage cable tunnels. *J Therm Anal Calorim*. 2024. 149. P. 8927–8978. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13299-x>

80. Sun J., Zhang H., Huang M., Chen Q., & Chen S. Reasonable Paths of Construction Ventilation for Large-Scale Underground Cavern Groups in Winter and Summer. *Sustainability*. 2018. 10(10). 3768.  
<https://doi.org/10.3390/su10103768/>

81. С. Л. Бубон, Т. О. Негрій. Дослідження параметрів якості повітря приміщень типу Open Space підземного розташування. *Комунальне господарство міст*, 2025, том 3, випуск 191. С. 580-583.  
<https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-580-585>.

82. Wei, J., Xu, X. & Jiang, W. Influences of ventilation parameters on flow field and dust migration in an underground coal mine heading. *Sci Rep* 10, 8563 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65373-7>

83. Yang, B.; Yao, H.; Wang, F. A Review of Ventilation and Environmental Control of Underground Spaces. *Energies* 2022, 15, 409.  
<https://doi.org/10.3390/en15020409>

84. Loxham, M., Nieuwenhuijsen, M.J. Health effects of particulate matter air pollution in underground railway systems – a critical review of the evidence. *Part Fibre Toxicol* 16, 12 (2019). <https://doi.org/10.1186/s12989-019-0296-2>.

85. Grzywa-Celińska A, Krusiński A, Mazur J, Szewczyk K, Kozak K. Radon-The Element of Risk. The Impact of Radon Exposure on Human Health. *Toxics*. 2020 Dec 14;8(4):120. <https://doi.org/10.3390/toxics8040120>.

86. Nunes, L.J.R.; Curado, A.; Graça, L.C.C.d.; Soares, S.; Lopes, S.I. Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 3929. <https://doi.org/10.3390/ijerph19073929>.

87. Joshi S. M. The sick building syndrome. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 2008, 12(2), Pages 61–64. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.43262>.
88. Redlich C. A., Sparer J., Cullen M. R. Sick-building syndrome. *The Lancet*. 1997. Vol. 349. Issue 9057. P. 1013–1016. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(96\)07220-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(96)07220-0).
89. Bourbeau J., Brisson C., Allaire S. Prevalence of the sick building syndrome symptoms in office workers before and after being exposed to a building with an improved ventilation system. *Occupational and Environmental Medicine*. 1996. Vol. 53, no. 3. P. 204–210. <https://doi.org/10.1136/oem.53.3.204>.
90. Indoor air quality and sick building syndrome symptoms in administrative office at public university / A. A. Mansor et al. *Dialogues in Health*. 2024. P. 100178. <https://doi.org/10.1016/j.dialog.2024.100178>.
91. Синдром хворої будівлі: причини, ознаки та профілактика | Центр громадського здоров'я. Центр громадського здоров'я України | МОЗ. Режим доступу: <https://phc.org.ua/news/sindrom-khvoroi-budivli-prichini-oznaki-ta-profilaktika>.
92. Sayan HE, Dülger S. Evaluation of the relationship between sick building syndrome complaints among hospital employees and indoor environmental quality. *Med Lav*. 2021 Apr 20;112(2):153-161. doi: 10.23749/mdl.v112i2.11012. PMID: 33881009; PMCID: PMC8095327.
93. Nakayama Y, Nakaoka H, Suzuki N, et al. Prevalence and risk factors of pre-sick building syndrome: characteristics of indoor environmental and individual factors. *Environ Health Prev Med*. 2019;24(1):77. <https://doi.org/10.1186/s12199-019-0830-8>. doi: 10.1186/s12199-019-0830-8.
94. Straus DC. Molds, mycotoxins, and sick building syndrome. *Toxicol Ind Health*. 2009;25(9):617–35. doi: 10.1177/0748233709348287. <https://doi.org/10.1177/0748233709348287>.
95. Jeonghoon Kim, In-Keun Shim, Soo Ran Won, Eun Seol Hwang, Yumi Lee, Sujung Park, Jungmin Ryu, Jongchun Lee, Indoor air quality and its

determinants in underground shopping malls in Korea, *Environment International*, Volume 183, 2024, 108395, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108395>.

96. Бубон С.Л., Рєзник Д.В. Дослідження мікрокліматичних показників офісних приміщень типу open space підземного розташування, *Український журнал будівництва та архітектури*, No 5 (029), 2025, С.38-44 .

97. Xu Li, Haiming Yu, Xin Qiao, Wang Li, Han Qi, Enhanced atomization for dust suppression in underground spaces: a variable design based on annular microchannel disturbance, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 165, 2025, 106900, ISSN 0886-7798, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106900>.

98. Роговенко О., студ., Бубон С., студ, Горбенко О. Дослідження впливу показників повітряного простору офісних приміщень типу Open Space на рівень комфортності працівників, *Тези XXXII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених "Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства"*, Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2025. С. 302-304. <https://doi.org/10.32782/2079-5009.krnu25.11.10>.

99. Бубон С. Л., Роговенко О. О., Рєзник Д. В. Системи вентиляції й очищення повітря в Open Space приміщеннях підземного розташування, *Тези II міжнародної науково-методичної конференції, 22 - 23 травня 2025 року, Київ*, Державний університет «Київський авіаційний інститут», 2025. С. 30.

100. Guangpeng Yao, Zhijian Liu, Haiyang Liu, Chuan Jiang, Yabin Li, Jia Liu, Junzhou He, Air disinfection performance of upper-room ultraviolet germicidal irradiation (UR-UVGI) system in a multi-compartment dental clinic, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 477, 2024, 135383, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135383>.

101. Albertini R., Colucci M. E., Coluccia A., Mohieldin Mahgoub Ibrahim M., Zoni R., Veronesi L., Affanni P., & Pasquarella C. An overview on the use of

ultraviolet radiation to disinfect air and surfaces. *Acta bio-medica: Atenei Parmensis*. 2023. 94(S3). e2023165. <https://doi.org/10.23750/abm.v94iS3.14666>.

102. Reed N. G. The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Public health reports* (Washington, D.C.: 1974). 2010. 125(1). P. 15–27. <https://doi.org/10.1177/003335491012500105>

103. Семенов А. О., & Кожушко Г. М. Device for germicidal air disinfection by ultraviolet radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 3(10(69)). P. 13–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24822>

104. Glyva V., Nazarenko V., Burdeina N., Leonov Y., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Krasnianskyi G., Petrunok T., & Biruk Y. Determining the efficiency of using led sources of ultraviolet radiation for ionization and disinfection of room air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 3(10 (123)). P. 23–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282784>

105. Escombe A. R., Moore D. A., Gilman R. H., Navincopa M., Ticona E., Mitchell B., Noakes C., Martínez C., Sheen P., Ramirez R., Quino W., Gonzalez A., Friedland J. S., & Evans C. A. Upper-room ultraviolet light and negative air ionization to prevent tuberculosis transmission. *PLoS medicine*. 2009. 6(3). e43. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000043>.

106. Xuecong Liu, Kun Zhao, Xinyang Miao, Zhaohui Meng, Honglei Zhan, Ultrafast ultraviolet laser-induced voltage of air. *Optics & Laser Technology*. 2023. Volume 166. 109678. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109678>.

107. Menzies, D., Popa, J., Hanley, J. A., Rand, T., & Milton, D. K. (2003). Effect of ultraviolet germicidal lights installed in office ventilation systems on workers' health and wellbeing: double-blind multiple crossover trial. *The Lancet*, 362(9398), 1785–1791. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(03\)14897-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(03)14897-0).

108. Słabicka-Jakubczyk, A., Lewandowski, M., Pastuszak, P. et al. Influence of UV nail lamps radiation on human keratinocytes viability. *Sci Rep* 13, 22530 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49814-7>.

109. Khaiwal R., Suman M. Phytoremediation potential of indoor plants in reducing air pollutants. *Frontiers in Sustainable Cities*. 2022. Vol. 4. P. 25. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.1039710>.

110. Kryvomaz T., Tyshchenko, O., & Suleimanov, I. Plants for biophilic design in green building. *Theory and Practice of Design*. 2022. (25). P. 236–248. <https://doi.org/10.18372/2415-8151.25.16801>.

111. Tina Bringslimark, Terry Hartig, Grete G. Patil. The psychological benefits of indoor plants: A critical review of the experimental literature. *Journal of Environmental Psychology*. 2009. Volume 29. Issue 4. Pages 422-433. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2009.05.001>.

112. Hall, C. & Knuth, M. An Update of the Literature Supporting the Well-Being Benefits of Plants: A Review of the Emotional and Mental Health Benefits of Plants. *Journal of Environmental Horticulture*. 2019. 37(1). P. 30–38. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-37.1.30>.

113. Ткаченко Т. М., Прокопенко І. А. Оздоровлення повітряного середовища закритих приміщень за допомогою фітодизайну фітонцидними рослинами. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2021. Т. 37. С. 54–61. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.54-61>.

114. Han KT, Ruan LW, Liao LS. Effects of Indoor Plants on Human Functions: A Systematic Review with Meta-Analyses. *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Jun 17;19(12):7454. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127454>. PMID: 35742700; PMCID: PMC9224521.

115. El-Tanbouly R., Hassan Z., & El-Messeiry, S. The Role of Indoor Plants in air Purification and Human Health in the Context of COVID-19 Pandemic: A Proposal for a Novel Line of Inquiry. *Frontiers in molecular biosciences*. 2021. 8. 709395. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.709395>.

116. Mukesh Budaniya, Aakash C. Rai. Effectiveness of plants for passive removal of particulate matter is low in the indoor environment. *Building and Environment*. 2022. Volume 222. 109384. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109384>.

117. Han KT., Ruan LW. Effects of indoor plants on air quality: a systematic review. *Environ Sci Pollut Res.* 2020. 27. P. 16019–16051. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08174-9>
118. Indira, I & Herdiansyah, Herdis. Green open space implementation on the underground building. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021. 755. 012023. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/755/1/012023>.
119. Jeonghwan Kim, Seung Hyun Cha, Choongwan Koo, Shiu-keung Tang. The effects of indoor plants and artificial windows in an underground environment. *Building and Environment.* Volume 138. 2018. Pages 53-62. ISSN 0360-1323. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.029>.
120. Nicola Carslaw. A new detailed chemical model for indoor air pollution. *Atmospheric Environment.* 2007. Volume 41. Issue 6. P. 1164–1179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.09.038>.
121. N.F.Nor Ruslan, S.E.Zakaria, N.F.Malik, R.Kardi, R.Osman. Effects of Air Temperature, Humidity and Lighting on Workers' Comfort and Health in Call Centre Department. *Int.J.Curr.Res.Aca.Rev.* 2014. Special Issue (1): 82-89.
122. Xiaofang Shan, Na Luo, Kaiyu Sun, Tianzhen Hong, Yi-Kuen Lee, Wei-Zhen Lu. Coupling CFD and building energy modelling to optimize the operation of a large open office space for occupant comfort. *Sustainable Cities and Society.* 2020. Volume 60. 102257. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102257>.
123. Негрій Т.О., Бубон С.Л. Розроблення системи управління рівнем комфорту приміщень типу open space підземного розташування, *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, No 4, 2025, С. 340-345. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-47>.
124. Renlu Qiao, Xiangyu Li, Shuo Gao, Xiwen Ma. Improvement of thermal comfort for underground space: Data enhancement using variational autoencoder. *Building and Environment.* 2022. Volume 207, Part A. 108457. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108457>.
125. Yanan Liu, Yimin Xiao, Jianli Chen, Godfried Augenbroe, Tiecheng Zhou. A network model for natural ventilation simulation in deep buried

underground structures. *Building and Environment*. 2019. Volume 153. P. 288-301. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.045>.

126. А. Г. Винничук, В. В. Гринюк «Розроблення інформаційно-вимірювальної системи Контролю мікроклімату тепличних приміщень» // *Методи та прилади контролю якості* № 2 (43) 2019, с. 32-40. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2019-2\(43\)-32-40](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2019-2(43)-32-40)

127. Pistoichini, T., Ellis, M., Meyers, F., et al. (2023). Method of test for CO<sub>2</sub>-based demand control ventilation systems: benchmarking the state-of-the-art and the undervalued potential of proportional-integral control. *Energy and Buildings*, 301, 113717. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113717.

128. Li, C., Cui, C., & Li, M. (2023). A proactive 2-stage indoor CO<sub>2</sub>-based demand-controlled ventilation method considering control performance and energy efficiency. *Applied Energy*, 329, 120288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120288>.

129. Москвітіна А., Приймаченко О., Бистров Д. Використання нечіткої логіки для управління VAV-системою кондиціонування повітря в поєднанні з зеленою стіною. *Просторовий розвиток*. 2024. № 10. С. 389–406. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.389-406>.

130. А. Кузьмук Розумне керування мікрокліматом, 2022. – Доступно: <https://aw-therm.com.ua/keruvannyamikroklimatom-u-primishenni/> [28.04.25].

131. Liu, F., Qian, H., Luo, Z., & Zheng, X. (2021). The impact of indoor thermal stratification on the dispersion of human speech droplets. *Indoor Air*, 31(2), 369–382. <https://doi.org/10.1111/ina.12737>.

132. Longhitano, A., Costanzo, V., Evola, G., & Nocera, F. (2024). Microclimate investigation in a conference room with thermal stratification: an investigation of different air conditioning systems. *Energies*, 17(5), 1188. <https://doi.org/10.3390/en17051188>.

133. О. Колодій Рекуператор повітря: здоровий мікроклімат та збереження тепла, 2022. – Доступно: <https://aw-therm.com.ua/rekuperator-povitrya-zdorovij-mikroklimat-ta-zberezhennya-tepla/>.

134. Lin F. Construction Network Ventilation System for Underground LPG Storage Cavern. *Civil Engineering Journal*. 2018. 4(7). P. 1521–1541. <https://doi.org/10.28991/cej-0309192>

135. O. Svystun, I. Yurchak. (2021), «Recommendation Dialog System for Selecting the Computer Hardware Configuration» *Advances in Cyber-Physical Systems*, Volume 6, Number 1, pp. 70 - 76. <https://doi.org/10.23939/acps2021.01.070> .

136. А. Р. Купінський, І. Ю. Юрчак «Принципи побудови метеостанції для спостереження за мікрокліматом у приміщенні на платформі Arduino», *Computer systems and networks*, Vol. 3, No. 1, 2021. с.68-79. <https://doi.org/10.23939/csn2021.01/068>

**ДОДАТОК А**  
**ПУБЛІКАЦІЇ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Статті у наукових фахових виданнях України**

1. **Бубон С. Л.,** Негрій Т. О., Розроблення системи управління рівнем комфорту приміщень типу Open Space підземного розташування, *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, № 4, 2025, С. 340-345., DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-47>.

*Особистий внесок здобувача полягає в розробленні концепції системи управління рівнем комфорту підземних приміщень відкритого планування.*

2. **С. Л. Бубон,** Т. О. Негрій. Дослідження параметрів якості повітря приміщень типу Open Space підземного розташування. *Комунальне господарство міст*, 2025, том 3, випуск 191. С. 580-583. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-580-585>.

*Особистий внесок здобувача полягає у визначенні показників вуглекислого газу, радону, дрібнодисперсного пилу респірабельної фракції та запропоновано заходи унормування зазначених параметрів.*

3. **Бубон С.Л.,** Резнік Д.В. Дослідження мікрокліматичних показників офісних приміщень типу open space підземного розташування, *Український журнал будівництва та архітектури*, No 5 (029), 2025, С.38-44. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.051125.38.1189>.

*Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні підтримання мікрокліматичних показників на основі комбінованих систем припливно-витяжної вентиляції з рекуперативними осушувачами повітря та можливістю температурного зонування простору з орієнтуванням на найбільше скупчення людей.*

4. **Бубон С.Л.,** Визначення показників комфортності підземних приміщень на основі опитування працівників. *Комунальне господарство міст*,

2025, том 6, випуск 191. С. 394-398. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-394-398>

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

5. Роговенко О., студ., Бубон С., студ, Горбенко О. Дослідження впливу показників повітряного простору офісних приміщень типу Open Space на рівень комфортності працівників, *Тези XXXII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених "Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства"*, Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2025. С. 302-304. <https://doi.org/10.32782/2079-5009.krnu25.11.10>.

*Особистий внесок здобувача полягає у визначенні впливу параметрів якості повітря підземних офісних приміщень відкритого планування на рівень комфортності працівників.*

6. **Бубон С. Л.**, Роговенко О. О., Резнік Д. В. Системи вентиляції й очищення повітря в Open Space приміщеннях підземного розташування, *Тези II міжнародної науково-методичної конференції, 22 - 23 травня 2025 року, Київ, Державний університет «Київський авіаційний інститут»*, 2025. С. 30.

*Особистий внесок здобувача полягає у визначенні та ранжуванні шкідливих факторів у підземних приміщеннях відкритого планування з метою розроблення систем вентиляції.*

7. Tsiuriupa Y., **Bubon S.** Development of a classification of factors that determine the occurrence and course of "sick building syndrome". *Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Green Construction"*. Kyiv: Kyiv National University of Construction and Architecture. 2025, Київ, 2025. С. 249-251.

URL:

[https://www.researchgate.net/publication/391850107\\_Proceedings\\_of\\_the\\_IV\\_International\\_Scientific\\_and\\_Practical\\_Conference\\_Green\\_Construction\\_Kyiv\\_13-14\\_May\\_2025](https://www.researchgate.net/publication/391850107_Proceedings_of_the_IV_International_Scientific_and_Practical_Conference_Green_Construction_Kyiv_13-14_May_2025).

*Особистий внесок здобувача полягає у визначенні актуальності систематизації та класифікації факторів «синдрому хворого будинку» для різних типів приміщень.*

8. Цюрюпа Ю., Бубон С. Розроблення класифікації факторів, що визначають появу та перебіг «синдрому хворої будівлі». *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»)*. Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. 2025, с.356-358.  
[https://www.researchgate.net/publication/391850615\\_Materiali\\_IV\\_Miznarodnoi\\_naukovo-practicnoi\\_konferencii\\_Green\\_Construction\\_Zelene\\_budivnictvo\\_Kiiv\\_13-14\\_travna\\_2025\\_r](https://www.researchgate.net/publication/391850615_Materiali_IV_Miznarodnoi_naukovo-prakticnoi_konferencii_Green_Construction_Zelene_budivnictvo_Kiiv_13-14_travna_2025_r)

*Особистий внесок здобувача полягає у адаптуванні та застосуванні систематизації та класифікації факторів «синдрому хворого будинку» при визначенні стратегії покращення умов перебування у різних типах приміщень.*

**ДОДАТОК Б**  
**ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ**

**Д О В І Д К А**  
**про передавання результатів дисертаційного дослідження**  
**Бубона Сергія Леонідовича**  
**«ФОРМУВАННЯ КОМФОРТНОГО ТА БЕЗПЕЧНОГО**  
**СЕРЕДОВИЩА ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕНЬ ВІДКРИТОГО**  
**ПЛАНУВАННЯ»**  
**на здобуття наукового ступеня доктора філософії**

Цю довідку видано про те, що науково-технічні результати дисертаційного дослідження Бубона Сергія Леонідовича «Формування комфортного та безпечного середовища підземних приміщень відкритого планування» було передано для впровадження в дизайні адміністративної будівлі ФГ «Енергія-1» у Бориспільському районі Київської області.

Результати досліджень дозволять обладнати укриття з офісними приміщеннями задля неперервної роботи та одночасного уникнення військової та біологічної небезпек, особливо під час масованих атак ворога та щорічних епідемій респіраторних захворювань. Це дозволить забезпечити надійну та стабільну діяльність фермерського господарства.

**Голова ФГ “Енергія-1”**



**Петро ЛІВИЙ**



**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ  
«КРЕМЕНЧУЦЬКА ТЕХНІЧНА ЛАБОРАТОРІЯ»**

39600, Полтавська обл., м. Кременчук, вул. Івана Мазепи, 45-А  
р/р UA09331489000026003249912001 в АТ «Полтава-банк»  
Код ЄДРПОУ 45336320, платник єдиного податку 3 група  
тел. (0536) 75-75-35, e-mail: nmc2009@meta.ua

Акт впровадження результатів  
дослідження Бубона Сергія Леонідовича  
«ФОРМУВАННЯ КОМФОРТНОГО ТА БЕЗПЕЧНОГО СЕРЕДОВИЩА  
ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕНЬ ВІДКРИТОГО ПЛАНУВАННЯ»  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Результати наукового дослідження впроваджено у практичну діяльність підприємства шляхом використання методичних рекомендацій та науково обґрунтованих заходів щодо підвищення безпеки й комфортності підземних приміщень відкритого планування. У результаті впровадження підвищено рівень пожежної, техногенної та евакуаційної безпеки, а також покращено умови перебування персоналу та відвідувачів.

Отримані напрацювання можуть бути використані під час розроблення проектних рішень, внутрішніх нормативних документів і заходів у сфері цивільного захисту та охорони праці. Результати дослідження мають практичну значущість, відповідають профілю діяльності підприємства та рекомендовані до подальшого використання.

Керівник ТОВ «КТЛ»



Сергій САПА

**КремПромЗІЗ**

Товариство з обмеженою відповідальністю  
«Кременчуцькі промислові засоби індивідуального захисту»

Україна, 39701, Полтавська обл.,  
Кременчуцький район, с. Піщане,  
пров. Новоселівський, 8.  
тел. +380975813191  
e-mail: krempromziz@ukr.net cafiTimaska-ruta.com  
ЄДРПОУ 37411214  
ПІН 374112116037

Р/р № UA133808050000000026007317192  
АТ «Райфайзен Банк Аваль»  
МФО 380805, ЄДРПОУ 14305909

Від 11.12.2025р. №62

Лист підтримки  
результатів дисертаційного дослідження  
Бубона Сергія Леонідовича  
«ФОРМУВАННЯ КОМФОРТНОГО ТА БЕЗПЕЧНОГО СЕРЕДОВИЩА  
ПІДЗЕМНИХ ПРИМІЩЕНЬ ВІДКРИТОГО ПЛАНУВАННЯ»  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Запропонований Бубоном С.Л. підхід до контролю та унормування параметрів підземних просторів та система температурного зонування за результатами проведеного наукового дослідження є практично значущими і такими, що здатні покращити умови перебування персоналу в укриттях. Окремі положення та рекомендації дослідження частково впроваджено у діяльність і на об'єктах господарювання підприємства. Отримані результати рекомендовані до подальшого використання та поетапного впровадження в практичну діяльність підприємства.

С повагою, директор ТОВ «КремПромЗІЗ»



Книш І.М.

## ДОДАТОК В

### СИСТЕМА КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

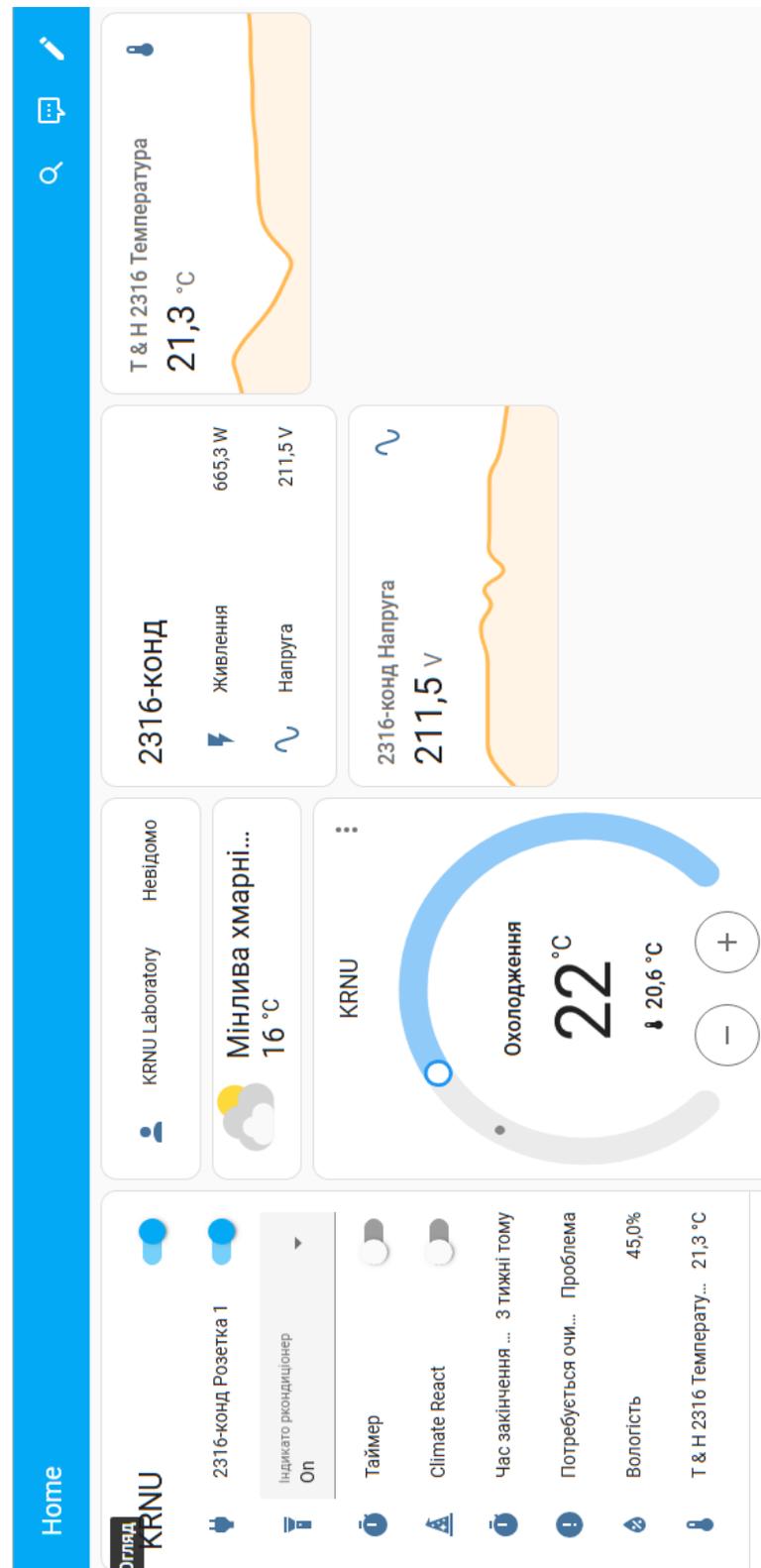


Рис. В.1. Інформаційна панель візуалізації даних температурно-вологісних показників

X history (2).csv								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1796	climate.kmu	off	2025-09-18T19:23:2	21.2				22
1797	climate.kmu	off	2025-09-18T19:26:2	21.2				22
1798	climate.kmu	off	2025-09-18T19:27:2	21.2				22
1799	climate.kmu	off	2025-09-18T19:29:2	21.2				22
1800	climate.kmu	off	2025-09-18T19:32:2	21.2				22
1801	climate.kmu	off	2025-09-18T19:36:2	21.2				22
1802	climate.kmu	off	2025-09-18T19:42:2	21.2				22
1803	climate.kmu	off	2025-09-18T20:00:2	21.2				22
1804	climate.kmu	off	2025-09-18T20:03:2	21.2				22
1805	climate.kmu	off	2025-09-18T20:12:2	21.1				22
1806	climate.kmu	off	2025-09-18T20:14:2	21.2				22
1807	climate.kmu	off	2025-09-18T20:21:2	21.2				22
1808	climate.kmu	off	2025-09-18T20:24:2	21.1				22
1809	climate.kmu	off	2025-09-18T20:26:2	21.2				22
1810	climate.kmu	off	2025-09-18T20:27:2	21.1				22
1811	climate.kmu	off	2025-09-18T20:30:2	21.2				22
1812	climate.kmu	off	2025-09-18T20:35:2	21.1				22
1813	climate.kmu	off	2025-09-18T20:36:2	21.1				22
1814	climate.kmu	off	2025-09-18T20:38:2	21.1				22
1815	climate.kmu	off	2025-09-18T20:41:2	21.2				22
1816	climate.kmu	off	2025-09-18T20:44:2	21.1				22
1817	climate.kmu	off	2025-09-18T20:45:2	21.2				22
1818	climate.kmu	off	2025-09-18T20:48:2	21.1				22
1819	climate.kmu	off	2025-09-18T20:54:3	21.2				22
1820	climate.kmu	off	2025-09-18T20:56:3	21.1				22
1821	climate.kmu	off	2025-09-18T21:00:3	21.1				22
1822	climate.kmu	off	2025-09-18T21:02:3	21.1				22
1823	climate.kmu	off	2025-09-18T21:03:3	21.1				22
1824	climate.kmu	off	2025-09-18T21:05:3	21.2				22
1825	climate.kmu	off	2025-09-18T21:06:3	21.1				22
1826	climate.kmu	off	2025-09-18T21:08:3	21.2				22
1827	climate.kmu	off	2025-09-18T21:09:3	21.1				22
1828	climate.kmu	off	2025-09-18T21:14:3	21.2				22
1829	climate.kmu	off	2025-09-18T21:15:3	21.1				22
1830	climate.kmu	off	2025-09-18T21:17:3	21.1				22
1831	climate.kmu	off	2025-09-18T21:24:3	21.1				22
1832	climate.kmu	off	2025-09-18T21:26:3	21.1				22
1833	climate.kmu	off	2025-09-18T21:27:3	21.1				22
1834	climate.kmu	off	2025-09-18T21:49:4	21.1				22
1835	climate.kmu	off	2025-09-18T22:12:4	21.1				22
1836	climate.kmu	off	2025-09-18T22:42:4	21.1				22

Рис. В.2. Фрагмент таблиці даних