УДК 614.8; 725.2; 696.3; 613.6
DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.38.1189

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ОФІСНИХ ПРИМІЩЕНЬ ТИПУ OPEN SPACE ПІДЗЕМНОГО РОЗТАШУВАННЯ

БУБОН С. Л.[1*], *асп.*,
РЄЗНІК Д. В.[2], *канд. техн. наук, доц.*

[1*] Кафедра технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, тел. +38 (044) 241–55–80, e-mail: bybon_cergey@ukr.net, ORCID ID: 0009–0009–6916–8374
[2] Кафедра цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, Кременчук, Україна, тел. +38 (097) 523–02–79, e-mail: 2411dimareznik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1258-6136

Анотація. ***Постановка проблеми.*** Стаття присвячена питанню дослідження та організації мікроклімату в приміщеннях підземних споруд з високою вологістю і зниженою температурою внутрішнього повітря при переобладнанні вже існуючих підземних приміщень, в яких не передбачено умов для постійного перебування великої кількості людей у підземні Open Space приміщення для безпечної і безперебійної роботи людей. Окреслено процес формування тепловологісного режиму в приміщеннях, дані рекомендації з організації та проєктування систем вентиляції вологих поміщень із зниженою температурою внутрішнього повітря. ***Мета статті –*** дослідження впливу параметрів технологічних процесів, температури масиву ґрунту, контактуючої поверхні підземної будівлі, прийнятих умов параметрів повітрообміну та кількості людей на температурно-вологісний режим у приміщеннях підземного розташування. ***Висновок.*** Запропоновано підтримання мікрокліматичних показників на основі комбінованих системам притяжно-витяжної вентиляції з рекуперативними осушувачами повітря та можливістю температурного зонування простору з орієнтуванням на найбільше скупчення людей.

Ключові слова: *мікрокліматичні показники; підземні споруди; тепловологісний режим; приміщення відкритого планування; комфортне середовище*

RESEARCH OF MICROCLIMATIC INDICATORS OF OPEN SPACE TYPE OFFICE PREMISES UNDERGROUND

BUBON S. L.[1*], *Postgrad. Stud.*,
RYEZNIK D.V.[2], *Ph.D., Assoc. Prof.*

[1*] Department of Environmental Protection Technologies and Labor Protection, Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Air Force Avenue, Kyiv, Ukraine, tel. +38 (044) 241–55–80, e-mail: bybon_cergey@ukr.net, ORCID ID: 0009–0009–6916–8374
[2] Department of Civil Security, Labor Protection, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Universytetska St., Kremenchuk, Ukraine, tel. +38 (097) 523–02–79, e-mail: 2411dimareznik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1258-6136

Abstract. ***Problem statement.*** The article is devoted to the issue of research and organization of microclimate in underground structures with high humidity and low internal air temperature during the conversion of existing underground premises of other technological purposes, in which conditions are not provided for the constant presence of a large number of people in underground Open Space premises for safe and uninterrupted work of people. Such premises are converted from existing underground structures of buildings. Currently, the issue of organization of microclimate in such premises is not sufficiently disclosed in regulatory and technical documents. The article describes the process of forming the thermal and humidity regime in underground premises, and develops recommendations for the organization and design of insulation, drying and ventilation systems for wet premises with low internal air temperature. ***The purpose of the article*** is to study the influence of technological process parameters, soil mass temperature, contacting surface of the underground building, accepted conditions of air exchange parameters and the number of people on the temperature and humidity regime in underground premises. ***Conclusion.*** Based on the experimental data obtained, it is proposed to implement combined supply and exhaust ventilation systems with recuperative air dehumidifiers and the possibility of temperature zoning of the space, focusing on the largest concentration of people, in underground Open Space premises

that have been converted from buildings for other purposes. This approach will provide comfortable microclimate parameters to maintain staff productivity.

Keywords: *microclimatic indicators; underground structures; heat–humidity regime; open-plan premises; comfortable environment*

Постановка проблеми. Зі значним розвитком підземних просторів все більше людей переносять свою роботу та життя в підземні простори, такі як підземні торгові центри, підземні кінотеатри, метро, шахти, підземні захисні споруди тощо [1]. У разі застосування зброї масового знищення ці споруди необхідно ізолювати та захистити. Закрите робоче середовище, висока температура, висока вологість та висока концентрація CO_2 негативно впливають на організм, 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 та працездатність [2]. Робота в закритому середовищі робить людей схильними до депресії, сонливості, нудьги, втоми, головного болю та інших симптомів, що може легко призвести до значного зниження працездатності [3].

Аналіз публікацій. Дослідження теплового комфорту в підземному будівництві раніше були досить масштабними. Прийнятний діапазон температур демонстрував асиметричний розподіл відносно термічно нейтральної температури. В роботах використовували температуру ґрунту та відчутну теплоту свіжого повітря в різних регіонах як основу зонування та встановили чотири глибоко закопані теплові зони захисту: холодна, суха, волога та гаряча та волога зони.

Водночас, підземне теплове середовище має значний вплив на психологічний стан та ефективність праці персоналу [4]. 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 вологість 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 [5].

Завдяки вищезазначеним дослідженням було виявлено, що тепловий дискомфорт, спричинений перегрівом середовища, негативно впливає на психологію, фізіологію та працездатність людей [6].

Мета і задачі. Дослідження впливу параметрів технологічних процесів, температури масиву ґрунту, контактуючої поверхні підземної будівлі, прийнятих умов параметрів повітрообміну та кількості людей на температурно–вологісний режим у приміщеннях підземного розташування.

Викладення основного матеріалу. Незадовільний стан тепловологісного режиму, відсутність рекомендацій щодо проектування систем опалення та вентиляції підземних приміщень зі зниженою температурою внутрішнього повітря, переобладнаних в Open Space офісні приміщення та Co-working центри, вимагають проведення досліджень для створення необхідного і комфортного мікроклімату у цих приміщеннях для забезпечення якнайкращих умов перебування персоналу протягом робочого дня і підтримки подуктивності праці.

Дослідження параметрів мікроклімату підземних підвальних приміщеннях, які переобладнають під підземні офіси та центри, 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.

Рис. 1 Загальний вигляд планування Open Space приміщень підземного розташування

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 і в їх товщі, а також на зовнішній поверхні. При високій відносній вологості внутрішнього повітря (більше 75 %) та підвищеній вологості внутрішньої поверхні огороджувальних 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. Все це зумовлено відносною герметичністю підземного приміщення та непристосованістю систем вентиляції та осушування повітря для умов перебування великої кількості людей протягом тривалого часу.

При організації прямоточної 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.

Для створення необхідних санітарно–гігієнічних умов у підземних приміщеннях приміщеннях, переобладнаних під Open Space офісні приміщення та Co–working центри необхідним є організація примусової припливно-витяжної загальнообмінної вентиляція з температурним регулюванням повітря або організована припливна та витяжна вентиляція з рециркуляційними осушувачами повітря, яка здатна забезпечувати параметри мікроклімату, необхідні для комфортного перебування людей протягом тривалого періоду.

Будівництво підземних, без надземної частини, споруд різного призначення активно розвивається останніми роками. У зв'язку зі специфічними умовами їх експлуатації виникла необхідність розробки адекватних та 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 в якості коворкінг центрів та офісів.

Тепловологісний режим підземних споруд і приміщень без надземної частини обмеженої довжини недостатньо вивчений як згідно технологічного призначення, так і по конструктивно-планувальним рішенням, особливо при переобладнанні такого типу приміщень під об’єкти з постійним перебуванням людей. У нормативних документах та на підставі проведених досліджень зазначається, що у підземних приміщеннях теплообмін із навколишнім середовищем менш інтенсивний порівняно із частково заглибленими спорудами через низьку теплопровідність навколишнього грунту. Встановлено, що при підтримці температури повітря у 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 в залежності 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:

$$Q_s = Q_l \ , \qquad (1)$$

де Q_s – надходження теплоти до підземного приміщення (надлишкова теплота від примусової припливно–витяжної вентиляції, від технологічних процесів, надходження теплоти через покриття), Вт; Q_l – втрати теплоти з приміщення (втрати теплоти приміщенням в навколишній масив ґрунту), Вт.

Складемо рівняння теплового балансу для підземного приміщення відкритого планування:

$$Q_v + Q_e + Q_p = \frac{t_{in} - t_{gr}}{R_{ir} + R_{tc} + R_{gr}} \cdot L_r \, , \qquad (2)$$

Q_v – теплонадходження у споруду з припливним повітрям під час роботи загальнообмінної вентиляції, Вт; Q_e – теплонадходження від технологічних процесів та обладнання (приймається за паспортами на обладнання та коефіцієнтом використання), Вт; Q_p – тепловиділення тіла людини, Вт., t_{in} – температура повітря всередині, ° С; t_{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 1 м довжини приміщення, (м °С) / Вт; R_{tc} – термічний опір огороджувальних конструкцій приміщення (м °С) / Вт; R_{gr} – термічний опір ґрунту, (м °С) / Вт; L_r – приведена довжина замкнутого контуру підземного приміщення, $L_r = L + 2H$, де L – найбільший розмір (довжина) приміщення, H – висота приміщення.

$$Q_v = 0,28 \cdot \rho \cdot V \cdot n \cdot (t_{in} - t_v) \, , \qquad (3)$$

ρ – густина повітря, ρ = 1,2 кг/м^3; V – об’єм приміщення, м^3; n – розрахункова (нормативна) кратність повітрообміну; t_{in}, t_v – відповідно температура внутрішнього повітря та припливного повітря в літній період, °С.

$$Q_p = (Q_{p_k} + Q_{p_r} + Q_{p_v}) \cdot N \, , \qquad (4)$$

де Q_{p_k} – тепловиділення тіла людини за рахунок конвекції, Вт; Q_{p_r} – тепловиділення тіла людини за рахунок випромінювання, Вт; Q_{p_v} – тепловиділення тіла людини за рахунок випаровування, Вт; N – кількість людей у приміщенні.

$$R_{in} = \frac{1}{3,14 \cdot \alpha \cdot D_{in}} \, , \qquad (5)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до стіни приміщення, α = 7,0 Вт/(м^2 °С); $D_{in} = \frac{4 \cdot S_{in}}{P_{in}}$ – еквівалентний внутрішній діаметр поперечного перерізу приміщення; S_{in} площа внутрішнього перерізу приміщення, м^2 ; P_{in} – периметр внутрішнього перерізу приміщення, м.

$$R_{tc} = \frac{1}{3,14 \cdot \alpha \cdot \lambda} \ln \frac{D_{out}}{D_{in}} \, , \qquad (6)$$

де λ коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м °С); $D_{out} = \frac{4 \cdot S_{out}}{P_{out}}$ – еквівалентний внутрішній діаметр поперечного перерізу приміщення; S_{out} – площа внутрішнього перерізу приміщення, м^2; P_{out} – периметр внутрішнього перерізу приміщення, м.

$$R_{gr} = \frac{1}{3{,}14 \cdot \alpha \cdot \lambda_{gr}} \ln \frac{4h_{gr}}{D_{out}}, \qquad (7)$$

де λ_{gr} – коефіцієнт теплопровідності ґрунту, Вт/(м °С); h_{gr} – висота заглиблення у ґрунт, м.

Для оцінки впливу кількості працівників чи відвідувачів підземних Open Space приміщеннях та Co-working центрах на тепловологісні показники було проведено дослідження зміни температури і вологості на початку та в кінці робочого дня. При цьому вимірювання відбувалося у приміщенні, об'ємом 270 м^2, 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.

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.

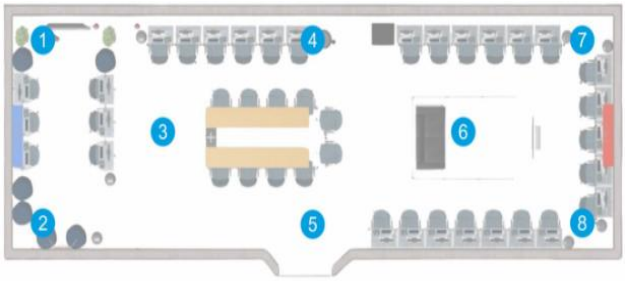

Рис. 2 Схема розташування датчиків для моніторингу тепловологісних характеристик приміщення типу Open Space

При проведенні дослідження вентиляційна приточно-витяжна вентиляція працювала з постійною швидкістю подачі повітря та постійною температурою.

Таблиця 1

Результати вимірювання температури протягом робочого дня

	Час	8.00	11.00	14.00	17.00
Датчик, *t, ◦C*					
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 2

Результати вимірювання вологості протягом робочого

	Час	8.00	11.00	14.00	17.00
Датчик, *h, %*		43	54	59	64
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 притяжно-витяжної вентиляції (рис 3.).

Рис. 3 Схема реалізації комбінованої притяжно-витяжної вентиляції для унормовування тепловологісних показників Open Space приміщень підземного розташування

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.

Висновки

1. Дослідження теплового комфорту підземних приміщень має вирішальне значення для контролю внутрішнього мікроклімату та середовища будівлі. Такий аналіз є особливо актуальним при визначенні стратегій переобладнання вже існуючих підвальних приміщень та підземних приміщень іншого технологічного призначення, в яких не передбачено умов для постійного перебування великої кількості людей, у підземномні Open Space приміщення для безпечної і безперебійної роботи людей в умовах прифронтових територій і загроз обстрілів.

2. Експериментальні дані підтверджують припущення щодо визначення параметрів впливу технологічних процесів, температури масиву ґрунту, контактуючої поверхні підземної будівлі, прийнятих умов параметрів повітрообміну та кількості людей на температурно-вологісний режим у приміщеннях підземного розташування.

3. Для досягнення комфортних і безпечних мікрокліматичних показників доцільно додатково обладнати зазначені приміщення комбінованими системами притяжно-витяжної вентиляції з рекуперативними осушувачами повітря та можливістю температурного зонування простору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.2–5:2023.Захисні споруди цивільного захисту. Київ: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc–page.html?id_doc=104666 (Державні будівельні норми України).

2. 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. Vol. 274. Pp. 112438. URL: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112438

3. 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. Pp. 74–81. URL: https://doi.org/10.1111/j.1600–0668.2004.00276.x

4. 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. Vol. 116. Pp. 45–54. URL: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.003

5. 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. Vol. 218. P. 109134. URL: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109134

6. 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. Vol. 60. P. 102257. URL: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102257

REFERENCES

1. *DBN V.2.2–5:2023.Zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu* [DBNB.2.2–5:2023. Protective structures of civil defense]. Kyiv : Ministry of Community Development, Territories and Infrastructure of Ukraine, 2023. (State Building Standards of Ukraine). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc–page.html?id_doc=104666 (in Ukrainian).

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

3. 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. Pp. 74–81. URL: https://doi.org/10.1111/j.1600–0668.2004.00276.x

4. 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. Vol. 116. Pp. 45–54. URL: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.003

5. 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. Vol. 218. P. 109134. URL: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109134

6. 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. Vol. 60. P. 102257. URL: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102257

Надійшла до редакції: 12.08.2025.