

---

doi

УДК 697.92 : 697.95

**П.Г. Круковський**, д-р техн. наук, **О.Ю. Тадля**, канд. техн. наук,  
**А.І. Дейнеко**, **Д.І. Скляренко**, **В.С. Олійник**  
Інститут технічної теплофізики НАН України  
(Україна, 03068, Київ, вул. Желябова, 2а,  
тел. (044) 4569281; e-mail: kruk@i.kiev.ua; olgatad@gmail.com)

## **Моделювання тепловологого стану тунелів Київського метрополітену**

Предметом дослідження є підвищена відносна вологість повітря тунелів службових з'єднувальних гілок (СЗГ) Комунального Підприємства «Київський метрополітен», яка впродовж року з весни до осені при існуючому режимі нагнітання повітря зі станцій у тунелі СЗГ перевищує нормативний рівень вологості 75%. Запропоновано новий спосіб зниження відносної вологості в тунелях СЗГ, що полягає у нагнітанні в тунель повітря з навколишнього середовища, яке має меншу абсолютну вологість, ніж на станціях. Проведено перевірку працездатності запропонованого способу зниження вологості нижче 75% за допомогою моделювання тепловологого стану тунелів СЗГ метрополітену. Отримані прогнозні результати моделювання підтверджено експериментальним випробуванням запропонованого режиму вентиляції тунелів у Київському метрополітені.

*Ключові слова: метрополітен, тунельне повітря, вологість, вентиляція, моделювання.*

В сучасному метрополітені існує ряд проблем, пов'язаних із забезпеченням необхідних параметрів повітря за певними критеріями комфортності (температура, вологість, необхідний повітрообмін, достатність кисню та ін.) [1]. Зазвичай цю проблему розглядають тільки для станцій, де перебувають люди, однак вона існує і для допоміжних об'єктів метрополітену таких, як службові з'єднувальні гілки (СЗГ), що призначені для з'єднання різних ліній метрополітену між собою, гілки в депо, а іноді і ділянки з'єднання із залізницею.

У Київському метрополітені СЗГ з'єднують три станції: «Хрещатик», «Майдан Незалежності» та «Кловська» (рис. 1, а). СЗГ Київського метрополітену умовно ділиться на дві частини: СЗГ-1 («Хрещатик»—«Майдан Незалежності») та СЗГ-2 («Кловська»—СЗГ-1). СЗГ-1 має 19 так званих пікетів (місць, в яких розташовані точки виміру параметрів повітря співро-

© Круковський П.Г., Тадля О.Ю., Дейнеко А.І., Скляренко Д.І., Олійник В.С., 2019

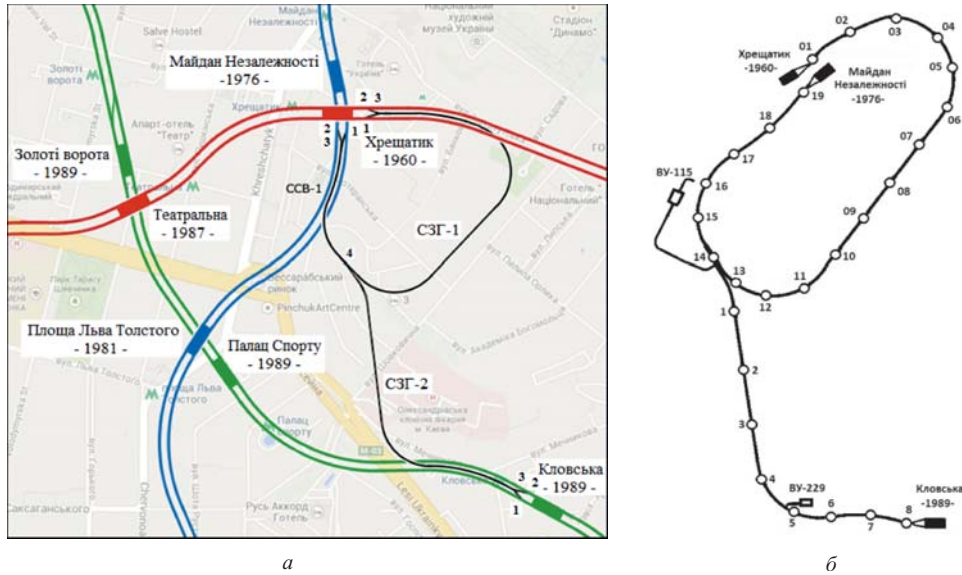


Рис. 1. Схема тунелів СЗГ метрополітену: а — схематичне розташування СЗГ між станціями метрополітену; 1—4 — номери стрілок колій; 1960, 1976, 1989 — роки побудови відповідної станції «Хрещатик», «Майдан Незалежності», «Кловська»; б — 01-19 — номери пікетів СЗГ-1; 1-8 — номери пікетів СЗГ-2

бітниками метрополітену, розташованих одне від одного на відстані 100 м), а СЗГ-2 — 8 пікетів (рис. 1, б). Довжина СЗГ-1 дорівнює 2 км, довжина СЗГ-2 — 900м. Перепад висоти між верхньою на нижньою точками в СЗГ дорівнює 60 м. СЗГ використовуються для технічних цілей та для розташування необхідного електрообладнання і призначені для переведення пасажирських потягів з однієї гілки на іншу.

На рис. 2 частково показано електричне обладнання СЗГ. Надлишкова волога тунельного повітря в СЗГ (вище нормованого значення відносної вологості  $\varphi = 75\%$  [1]) та її коливання протягом року негативно впливає на властивості матеріалів будівельних конструкцій і є однією з головних причин пошкодження та руйнування оправ стінок тунелів метрополітену, ржавіння металевих виробів і конструкцій, враження корозією контактів електричних пристроїв та обладнання, пониження електричного опору ізоляційних матеріалів.

Система вентиляції метрополітену за проектом повинна забезпечити рівень відносної вологості тунельного повітря нижче нормованого, однак це не вдається через наступне:

недотримання вимог кількості вентиляційних установок (ВУ) для вентиляції тунелю СЗГ-1 при побудові метрополітену, які необхідно споруджувати через кожні 500 м тунелю [2];



Рис. 2. Фото тунелів СЗГ біля стрілки колії 4 (див. рис. 1, а) [3]

збільшення навантаження на систему вентиляції через збільшення кількості людей, що перевозить метрополітен щоденно;  
проникнення вологи у тунелі крізь стінки з масиву ґрунту.

Таким чином, протягом останніх десятиліть експлуатації щороку рівень відносної вологості тунельного повітря перевищений як у тунелі СЗГ-1 (особливо у квітні, червні, жовтні, грудні), так і в тунелі СЗГ-2 (особливо в квітні—червні, вересні, жовтні), а також в обох тунелях (у квітні—червні). Іноді в тунелі спостерігається туман з конденсацією вологи на стінках оправи тунелів та електричному обладнанні, яке розташоване на цій ділянці. Причиною високої вологості або туману в тунелі СЗГ-1 може бути також недостатнє провітрювання внаслідок низької швидкості руху повітря в тунелі.

Система вентиляції тунелів СЗГ з ВУ-115 та ВУ-229 (див. рис. 1, б) має вісім режимів роботи в залежності від температури і відносної вологості повітря навколишнього середовища. Для кожної ВУ можливі три режими ввімкнення: нагнітання повітря в тунелі, видалення повітря з тунелів (коли більш вологе повітря зі станцій, де джерелом вологи є пасажир, надходить у тунелі) та режим, при якому ВУ вимкнено.

На основі аналізу експериментальних даних по температурі та відносній вологості повітря, температурі стінок оправ в тунелях СЗГ за 2004—2017 роки, отриманих від Комунального Підприємства (КП) «Київський метрополітен», було висунуто таке припущення: якщо повітря з навколишнього середовища з середньорічною абсолютною вологістю 7,2 г/кг

нагнітати у тунелі метрополітену, де тунельне повітря має середню абсолютну вологість 10,3 г/кг, відбудеться осушення тунельного повітря і це дозволить зменшити рівень відносної вологості в тунелях нижче нормованого. Це припущення можна було перевірити за допомогою експерименту, підбираючи режими ввімкнення ВУ та перевіряючи рівень вологості в тунелі. Однак для КП «Київський метрополітен» така перевірка здавалася не очевидною. Тому прогноз було зроблено за допомогою моделювання тепловологого режиму тунелів метрополітену, що дозволило швидше вирішити проблему і знайти оптимальні параметри запропонованого способу зниження вологості.

Література про проблеми вентиляції підземних споруд з великими значеннями відносної вологості, таких як тунелі шлюзового обладнання гребель [4], гідроелектростанцій [5], дорожні та пішохідні тунелі [6, 7], підземні сховища та інші, налічує багато робіт, серед яких є результати експериментальних досліджень [8], однак в них вказано на складність та тривалість проведення експерименту.

Існують різні способи осушення повітря: асиміляція (з нагріванням свіжого повітря та без нагрівання), адсорбція і конденсація [9] для підтримання мікроклімату у підземних об'єктах. Методи адсорбції та конденсації вимагають великих затрат на переобладнання системи вентиляції метрополітену та експлуатаційних затрат в процесі їх роботи і наразі вони не можуть бути реалізовані в КП «Київський метрополітен», тому розглянемо спосіб асиміляції.

У роботі [10] досліджено зниження вологості повітря підземного тунелю змішуванням його з зовнішнім повітрям в умовах теплого періоду року. Неабияку зацікавленість викликали можливості моделювання для вирішення задач, пов'язаних зі змінами у роботі систем вентиляції для дослідження вологості. За допомогою моделювання в [11] показано, що нормалізації мікрокліматичних параметрів рудників можна досягати при використанні устаткування, що працюватиме на періодичний нагрів та охолодження вентиляційного повітря. Наведені оціночні розрахунки показують, що через осушення шахтного повітря в теплий період року кількість видаленої вологи може досягати шести тон.

У роботі [12] показано, що за допомогою шестивузлової моделі системи автоматизованого керування провітрюванням шахт було здійснено керування регулюванням швидкості обертання станційних та перегінних вентиляторів за показниками температури, вологості та концентрації CO<sub>2</sub>. Наскільки точна ця модель не повідомляється. Однак у роботах [13,14] йде мова про складності моделювання та невелику точність отриманих результатів при невеликій кількості вузлів моделі об'єкту (18—20 вузлів). В той

же час, компанії, які спеціалізуються на проектуванні систем вентиляції залізничних колій і метрополітенів, високошвидкісних і дорожніх тунелів і розробляють вузькоспеціалізовані комп'ютерні програми SES [15] та IDA Tunnel 1.2 [16], намагаються підвищити точність моделювання роботи своїх програм для розрахунку температур і вологостей повітря в будь-якій точці станцій, тунелів, вентиляційних шахт.

Проведений огляд літератури показав, що спеціалізовані програми для моделювання систем вентиляції коштують достатньо дорого, тому було прийнято рішення розробити модель та створити програму для розрахунку тепловологого стану тунелів, яка б була, з одного боку, досить проста у розробці та швидка для проведення варіантних розрахунків, а з другого, — достатньо точна для прогнозів та проведення оптимізації режимів вентиляції метрополітенів.

Метою дослідження є перевірка працездатності обраного способу зниження підвищеної вологості в тунелях нагнітанням повітря з навколишнього середовища з меншою абсолютною вологістю, ніж на станціях, розташованих поряд з СЗГ, за допомогою моделювання тепловологого режиму цих тунелів метрополітену.

**Результати моделювання.** Було розроблено модель з зосередженими параметрами тепловологого стану тунелів СЗГ метрополітену (рис. 3). Це означає, що кожен вузол моделюється, подано відповідним вузлом, що відображає інтегральні властивості даної частини об'єкта (наприклад, температура, тиск, вологість та витрати відносяться до всього об'єму частини об'єкта). Всі основні фізичні процеси, що відбуваються в частинах об'єкта, у моделі подано відповідними зв'язками між вузлами. Вузли в моделі можуть бути двох типів: задані, для яких визначено температуру, тиск і вологість, і розрахункові, для яких параметри розраховуються за допомогою складання і розв'язування відповідних систем балансових рівнянь.

Розроблена модель тепловологого стану тунельного повітря складається з 65 вузлів, половина яких стосується повітря, половина — ґрунту тунелю. Задані вузли моделі: повітря на станціях, повітря у ВУ-115 і ВУ-229, та вузли поверхні ґрунту в пікетах. Всі інші вузли в повітрі — розрахункові. Нумери та розташування вузлів відповідають зазначеній схемі ліній СЗГ (див. рис. 3).

Створена модель тепловологого стану тунелів СЗГ метрополітену враховує процеси гідродинамічного руху, теплообміну і вологообміну між вузлами тунельного повітря. Конвективний та радіаційний теплообмін між повітрям та стінками тунелю враховано через коефіцієнт теплообміну. У вузлах ВУ-115 та ВУ-229 в режимі нагнітання повітря в тунелі вико-

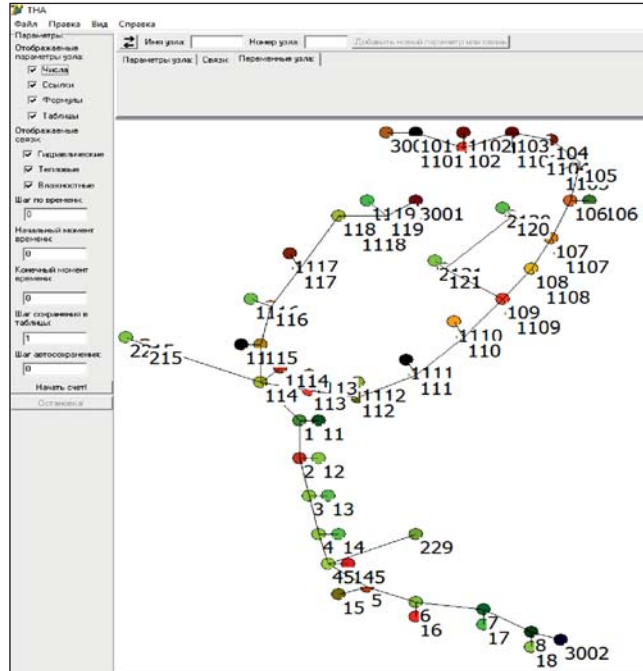


Рис. 3. Узлово-матрична модель тунелю СЗГ метрополітену

ристано середні значення між температурами навколишнього середовища і тунелю та відносна вологість, що розрахована за середнім значенням між температурами навколишнього середовища і тунелю та значенням абсолютної вологості навколишнього середовища. Зміною абсолютної вологості повітря по довжині вентиляційної шахти знехтувано. Оскільки параметри мікроклімату тунелів змінюються дуже швидко під впливом роботи системи механічної вентиляції, будемо використовувати стаціонарні значення параметрів повітря в тунелях СЗГ.

Розглянемо математичну модель трьох описаних вище фізичних процесів. За допомогою рівняння гідродинаміки переносу повітря між вузлами розраховуємо невідомі тиск в вузлах та витрати у зв'язках. Для  $i$ -го вузла, пов'язаного з деякою кількістю  $j$ -х вузлів, рівняння має вигляд

$$\sum_{i,j} g_{i,j} S_{i,j} (p_i - p_j) \pm G_i = 0, \quad i \neq j,$$

де  $g_{i,j}$  — коефіцієнт гідравлічного опору (гідравлічна провідність) між вузлами, м/(с·Па);  $S$  — площа, м<sup>2</sup>;  $p$  — тиск, Па;  $G_i$  — джерело (витрата) повітря, кг/с.

За допомогою рівняння теплообміну між вузлами розраховуємо невідомі температури повітря у вузлах і теплові потоки між ними. Для  $i$ -го вузла, пов'язаного з деякою кількістю  $j$ -х вузлів, рівняння має вигляд

$$c_i \rho_i V_i \frac{(T_i^\tau - T_i^{\tau-1})}{\Delta\tau} = \sum_{i,j} K_{i,j} S_{i,j} (T_i - T_j) + \sum_{i,j} C_i \rho_i G_{i,j} (T_i - T_j) \pm Q_i, \quad i \neq j, \quad (1)$$

де  $c_i$  — теплоємність повітря, Дж/(кг·К);  $\rho_i$  — густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — об'єм вузла, м<sup>3</sup>;  $T$  — температура у вузлі, °С;  $\tau$  — час, с;  $K$  — коефіцієнт теплової провідності, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Q$  — тепловиділення або теплопоглинання у вузлі, Вт;  $G_{i,j}$  — витрата повітря між вузлами, кг/с.

Ліва частина рівняння (1) — це зміна внутрішньої енергії повітря у вузлі в часі, перший доданок у правій частині рівняння визначає підведену або відведену теплоту до даного вузла, другий доданок характеризує зміну енергії розглянутого об'єму повітря внаслідок руху повітряних мас із розглянутого вузла, а третій — тепловиділення або теплопоглинання в самому вузлі.

Для розрахунку вологообміну між вузлами використовують значення витрат, отримані в результаті розв'язку гідравлічної задачі для суміші повітря з вологою, а для розрахунку відносної вологості — значення температур, отримані в результаті розв'язку теплової задачі. Рівняння вологообміну вузла  $i$  можна записати у вигляді

$$V_i \rho_i \frac{(f_i^\tau - f_i^{\tau-1})}{\Delta\tau} = \sum G_{i,j}^\tau f_{i,j}^{\tau-1}, \quad (2)$$

де  $f_i$  — абсолютна вологість повітря у вузлі  $i$ , г/кг;  $f_{i,j}$  — абсолютна вологість повітря, що надходить у вузол  $i$ , або виходить з нього;  $G_{i,j}$  — витрата повітря, яке виходить з вузла  $i$  та надходить у вузол  $j$ , кг/с;  $\rho_i$  — густина повітря, кг/м<sup>3</sup>. У рівнянні (2) ліва частина — це є зміна маси водяної пари за час  $\Delta\tau$  у вузлі  $i$ , а права частина — сума витрат, помножених на абсолютну вологість у вузлі  $i$ , якщо потік виходить з вузла, або на абсолютну вологість вузла  $j$ , пов'язаного з вузлом  $i$ , якщо потік входить у вузол. Відносну вологість повітря у вузлах моделі знаходять як відношення його поточної абсолютної вологості до максимальної абсолютної вологості при даній температурі:  $\phi = (f \cdot 100) / f_{\max}$ .

Граничними умовами у вузлах станцій «Хрещатик», «Майдан Незалежності», «Кловська» та у ВУ-115, ВУ-229 є тиски, значення яких було обрано таким чином, щоб вони відповідали витратам, відомим за даними експериментів. Граничними умовами є експериментальні значення температури у вузлах станцій «Хрещатик», «Майдан Незалежності», «Кловська», у

ВУ-115, ВУ-229 та вузлах поверхні ґрунту. Граничними умовами є також експериментальні значення відносної вологості у вузлах станцій «Хрещатик», «Майдан Незалежності», «Кловська» та ВУ-115, ВУ-229. У вузлах ВУ в залежності від режимів роботи вентиляторів було задано значення витрат для нагнітання повітря з навколишнього середовища або його видалення з тунелів.

Для перевірки запропонованого способу зниження вологості у тунелях СЗГ на основі наведеної математичної моделі розроблено програму ТНА (Thermal and Humidity Analysis) для розрахунку стаціонарного і нестаціонарного тепловологого стану різних об'єктів. Ця програма дозволяє створювати спрощені моделі для розрахунків значень температур, тисків і вологості в обраних користувачем зонах об'єктів (для метрополітену — це станції, тунелі, вентиляційні шахти та ін.).

**Експериментально-розрахункові результати.** Для забезпечення адекватності моделі було застосовано експериментально-розрахунковий підхід, який за допомогою експериментальних вимірювань в об'єкті і побудованої моделі об'єкту забезпечує її адекватність через пошук (ідентифікацію) коефіцієнтів (параметрів) моделі, що дозволяють максимально наблизити розрахункові і експериментальні значення характеристик стану об'єкту.

Експериментально-розрахунковий підхід до моделювання та прогнозування досліджуваних тепломасообмінних процесів в тунелях можна розбити на такі послідовні етапи:

1. Розробка геометричної, фізичної, математичної моделей тепловологого стану тунелів, заснована на врахуванні основних тепло- та масообмінних процесів і програми, що реалізують математичну модель.

2. Ідентифікація параметрів математичної моделі за допомогою розв'язання обернених задач за наявними даними експериментальних вимірювань.

3. Використання уточненої моделі для детального аналізу тепловологого стану досліджуваних тунелів.

4. Перевірка працездатності запропонованого способу зниження рівня вологості повітря в тунелях СЗГ метрополітену.

За допомогою експериментально-розрахункового підходу уточнювали значення наступних параметрів: коефіцієнти гідравлічного зв'язку (гідравлічна провідність) між вузлами моделі, витрати у двох ВУ, тиски на станціях та у ВУ, коефіцієнт тепловіддачі від повітря до стінки тунелю. Для ідентифікації цих параметрів використано експериментальну інформацію за умови, коли в СЗГ-1 та СЗГ-2 відносна вологість досягала 100% і обидві ВУ працювали на видалення повітря з тунелів (витрата ВУ-115 дорівнює 63,79 м<sup>3</sup>/с, витрата ВУ-229 — 41,08 м<sup>3</sup>/с) (рис. 4). Середньоквадратичне відхилення розрахункових і експериментальних значень



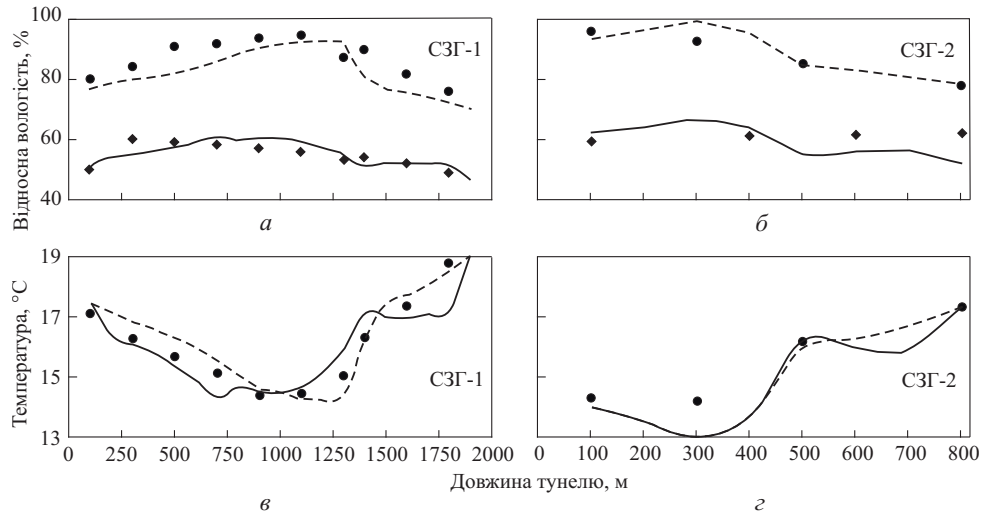


Рис. 4. Розподіл відносної вологості повітря (а, б) та його температури (в, г) по довжині тунелів: --- розрахунок для існуючого режиму роботи системи вентиляції тунелів метрополітену; — розрахунок з використанням запропонованого способу зниження вологості; ● — експериментальні значення для існуючого режиму роботи системи вентиляції тунелів метрополітену; ◆ — експериментально підтвержені значення, отримані запропонованим способом зниження вологості

**Розподіл абсолютної вологості повітря по довжині тунелів СЗГ**

Довжина тунелю, м	Абсолютна вологість, г/кг		
	При існуючому режимі роботи системи вентиляції	Прогнозні розрахункові значення після моделювання	Значення, підтвержені експериментально
СЗГ-1			
100	8,8	7,4	6,5
500	8,4	7,3	6,2
1 600	9,7	7,4	5,5
1 900	10	7,4	5,5
СЗГ-2			
100	9,4	7,4	5,4
300	10,3	7,3	5
500	10,8	7,3	5,5
800	10,8	7,3	8,3

температур повітря не перевищувало  $1^{\circ}\text{C}$ , а вологість повітря в тунелі СЗГ не перевищувала 10% .

Як бачимо на рис. 4, вологість повітря у тунелях СЗГ за режимом роботи системи вентиляції КП «Київський метрополітен» перевищує нормативні показники на 20—25 %. Розраховані середні значення вологості повітря у гілках СЗГ-1 і СЗГ-2 при існуючому режимі роботи системи вентиляції метрополітену досягають значень 96,6% для ділянки між ВУ-115 та ВУ-229 (на інших ділянках коливаються від 68,5 до 85,0 %).

Згідно з запропонованою ідеєю зміни напрямів руху повітря в тунелях СЗГ, яка полягає у видаленні та нагнітанні повітря з меншою абсолютною вологістю з навколишнього середовища, повинне відбуватись зменшення відносної вологи у суміші тунельного повітря (асиміляція вологи). На основі цього припущення проведено оцінку можливого зниження відносної вологості тунельного повітря при нагнітанні свіжого повітря через ВУ-115 та ВУ-229 з метою осушування тунелів СЗГ (див. рис. 4, суцільні лінії). Зниження вологості повітря при нагнітанні з навколишнього середовища по окремих гілках СЗГ досягає 32% від рівня вологості при існуючому режимі роботи системи вентиляції метрополітену.

Дані, наведені у таблиці, підтверджують ефективність запропонованої ідеї зміни напрямів руху повітря в тунелях СЗГ з метою їх осушування. Прогнозні розрахункові значення абсолютної вологості свідчать про те, що абсолютна кількість вологи в повітрі при температурі навколишнього середовища менша за кількість вологи в повітрі тунелів СЗГ при їх температурі, тобто відбувається зменшення вологості суміші тунельного повітря. При цьому абсолютна вологість повітря з навколишнього середовища складає 7,2 г/кг, а середня абсолютна вологість тунельного повітря після змішування дорівнює 7,4 г/кг. Розрахункові дані абсолютної вологості повітря не змінюються по довжині тунелю тому, що не враховано джерела та стоки вологи в тунелях.

Проведені оціночні розрахунки кількості води, яка буде видалятись завдяки запропонованому режиму системи вентиляції, показали, що при зниженні абсолютної вологості навіть на 1г/кг за добу з тунелів метрополітену буде видалятись до 5,2 т води, а при зниженні абсолютної вологості на 3г/кг за добу буде видалятись до 15,6 т води, що і забезпечує осушення тунельного повітря.

Таким чином, за допомогою розробленої моделі показано можливість зниження вологості повітря в тунелях СЗГ Київського метрополітену при застосуванні нагнітання повітря з навколишнього середовища в тунелі через ВУ-115 та ВУ-229. Розрахункова відносна вологість тунельного повітря при цьому не перевищує 75%. Запропонований новий спосіб зни-

ження вологості в тунелях СЗГ було випробувано протягом двох тижнів в КП «Київський метрополітен». У результаті розрахунків зниження відносної вологості тунельного повітря виявилось нижче 75%.

В подальшому планується розробка більш складних моделей з урахуванням нестационарних змін параметрів повітря протягом року і режимів роботи ВУ. При цьому буде враховано зміни не тільки параметрів навколишнього середовища, а також теплову інерцію ґрунту, що оточує тунелі. Це дасть змогу прогнозувати режими вентиляції, що дозволить знизити відносну вологість повітря у тунелях СЗГ нижче нормованого рівня протягом календарного року.

### Висновки

За допомогою розробленої комп'ютерної моделі тепловологого стану повітря в тунелях СЗГ було здійснено перевірку та підтверджено працездатність обраного способу зниження вологості в тунелях. Уточнена модель засвідчила близькість розрахункових і експериментальних значень температур і вологостей повітря в тунелях.

Результати розрахунків показали, що застосування запропонованого способу зниження вологості повітря в тунелях СЗГ дає змогу знизити відносну вологість тунельного повітря нижче 75%. Отримані результати моделювання тепловологого режиму тунелів підтверджені експериментальним випробуванням у Київському метрополітені.

*Автори висловлюють подяку КП «Київський метрополітен» за фінансову підтримку цієї роботи.*

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени. Чинний від 2011-10-01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011, 299 с.
2. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1975, 560 с.
3. ССВ : веб-сайт. URL: <https://tov-tob.livejournal.com/106822.html> (дата звертання 06.03.2019).
4. Hughes C., Johnson S., Payne M. The Evaluation and Design of the Ventilation System Within Mansfield Dam (Lake Travis). Lower Colorado River Authority. Austin: The University of Texas at Austin, 1997, 119 p.
5. YU, Yan Shun, QIAN, Pu Hua, ZHANG, Shao Fan. Development and Validation of Mathematical Model for Tailrace Tunnel Ventilating Process in Hydropower // Applied Mechanics and Materials, 2011, Vol. 71-78, p. 4069—4073.
6. Li X., Qin Y., Wang Y. Natural Ventilating Behavior of Z-Shaped Pedestrian Underpass in Wuhan. Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Tunnelling and Underground Construction, 2018, p. 633—641.
7. Moncef K., Kreider J.F. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel // Energy conversion and management, 1996, Vol. 37, N. 10, p. 1561—1574.

8. Tong R., Li A., Lv W. Field and Laboratory Tests and Analyses on Temperature and Relative Humidity in Underground Multi-tunnels // *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 205, p. 27—34.
9. Богословский В.Н., Пирумов А.И., Посохин В.Н. Внутренние санитарно-технические устройства: Справочник проектировщика. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1992, 319 с.
10. Россовский В.Г. Электромеханические устройства метрополитена. М.: Имперіум Пресс, 2004, 608 с.
11. Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Шалимов А.В., Зайцев А.В. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ // *Записки Горного института*, 2017, **223**, с. 116—124.
12. Ледовских А.В., Старжинская В.С., Бахвалова А.В. и др. Разработка автоматизированной системы управления моделью вентиляционной установки Новосибирского метрополитена // *Современные проблемы науки и образования*, 2014, № 6, с. 1—6. <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16703> (дата звернення: 06.03.2019).
13. Красюк А.М., Лугин И.В., Павлов С.А. Математическое моделирование воздухо-распределения в вентиляционной сети метрополитена с учетом поршневого действия поездов // *Горный информационно-аналитический бюллетень. Тематическое приложение. Аэрология*, 2009, с. 48—57.
14. Сметанин Ю.В., Тиснек В.Н. Автоматизация расчета вентиляции и дымоудаления метрополитенов // *Проблемы управления рисками в техносфере*, 2007, № 1, с. 85—91.
15. Ruiz-Jimenez Ana M., Torralb S., Silvan D. et al. Emergency Ventilation Design for Chicago Union Station North and South Tracks and Platforms // *Proc. from the Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security*, 2016, p. 259—270.
16. Riess I., Altenburger P., Sahlin P. On the design and control of complex tunnel ventilation systems applying the HIL tunnel simulator // *12th Int. Symp. Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, 2006, p. 713—722.

Отримано 22.03.19

## REFERENCES

1. SBC V.2.3-7-2010 (2011), *Sporudy transportu. Metropoliteny* [Constructions of transport. Metropolitan], Kyiv, Ukraine.
2. Tsodikov, V.Ya. (1975), *Ventilyatsiya i teplosnabzheniye metropolitenov* [Ventilation and heat supply of metro], Nedra, Moscow, Russia.
3. SCB, available at :<https://tov-tob.livejournal.com/106822.html> (accessed April 6, 2019).
4. Hughes, C., Johnson, S. and Payne, M. (1997), *The Evaluation and Design of the Ventilation System Within Mansfield Dam (Lake Travis)*, Lower Colorado River Authority: The University of Texas, Austin, Texas, USA.
5. Yan Shun, YU, QIAN, Pu Hua and ZHANG, Shao Fan (2011), "Development and Validation of Mathematical Model for Tailrace Tunnel Ventilating Process in Hydropower Station", *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications*, Vol. 71-78, pp. 4069-4073.
6. Li, X., Qin, Y. and Wang, Y. (2018), "Natural Ventilating Behavior of Z-Shaped Pedestrian Underpass in Wuhan", *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Tunneling and Underground Construction*, 2018, pp. 633-641.
7. Moncef, K. and Kreider, J.F. (1996), "Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel", *Energy conversion and management*, Vol. 37, no. 10, pp. 1561-1574.
8. Tong, R., Li, A. and Lv, W. (2017), "Field and Laboratory Tests and Analyses on Temperature and Relative Humidity in Underground Multi-tunnels", *Procedia Engineering*, Vol. 205, pp. 27-34.

9. Bogoslovskiy, V.N., Pirumov, A.I. and Posokhin, V.N. (1992), *Vnutrenniye sanitarno-tekhnicheskiye ustroystva : Spravochnik proyektirovshchinka* [Internal sanitary-technical devices: Reference design engineer], Stroyizdat, Moscow, Russia.
10. Rossovskiy, V.G. (2004), *Elektromekhanicheskiye ustroystva metropolitena* [Electromechanical devices metro], Imperium Press, Moscow, Russia.
11. Kazakov, B.P., Levin, L.Yu., Shalimov, A.V. and Zaitsev, A.V. (2017), "Development of energy-saving technologies for providing comfortable microclimatic conditions for mining", *Zapiski Gornogo instituta*, Vol. 223, pp. 116-124.
12. Ledovskikh, A.V., Starzhinskaya, V.S., Bakhvalova, A.V., Gurova, E.G. and Makarov, S.V. (2014), "Development of an automated system for managing the model of the ventilation system of the Novosibirsk Metro", *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, no. 6, pp. 1-6, available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16703> (last accessed May 6, 2019).
13. Krasnyuk, A.M., Lugin, I.V. and Pavlov, S.A. (2009), "Mathematical modeling of air distribution in the ventilation network of the metro, taking into account the piston action of trains", *Aerologiya*, pp. 48-57.
14. Smetanin, Yu.V. and Tisnek, V.N. (2007), "Automation of the calculation of ventilation and smoke removal of metro", *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, no. 1, pp. 85-91.
15. Ruiz-Jimenez, Ana M., Torralba, S. and Silvan, D. (2016), "Emergency Ventilation Design for Chicago Union Station North and South Tracks and Platforms", *Proceedings from the Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security*, 2016, pp. 259-270.
16. Riess, I., Altenburger, P. and Sahlin, P. (2006), "On the design and control of complex tunnel ventilation systems applying the HIL tunnel simulator", *Proceeding of the 12th Int. Symp. Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, 2006, pp. 713-722.

Received 22.03.19

П.Г. Круковский, О.Ю. Тадя,  
А.И. Дейнеко, Д.И. Склярченко, В.С. Олейник

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ ТУННЕЛЕЙ КИЕВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Предметом исследования является повышенная относительная влажность воздуха туннелей служебных соединительных ветвей (ССВ) Киевского метрополитена, которая на протяжении года, с весны до осени, при существующем способе нагнетания воздуха из станций в туннели ССВ превышает нормативный уровень влажности 75%. Предложен новый способ снижения относительной влажности в туннелях ССВ посредством нагнетания в туннели воздуха из окружающей среды с меньшей абсолютной влажностью, чем на станциях. Проведена проверка работоспособности предложенного режима снижения влажности ниже 75% с помощью моделирования тепловлажностного состояния туннельного воздуха метрополитена. Полученные прогнозные результаты моделирования подтверждены экспериментальным испытанием нового режима вентиляции туннелей в Киевском метрополитене.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* метрополитен, туннельный воздух, влажность, вентиляция, моделирование.

*P.H. Krukovskiy, O.Yu. Tadia, A.I. Deineko, D.I. Sklyarenko, V.S. Oliinyk*

#### KYIV SUBWAY TUNNELS THERMAL AND HUMIDITY STATE MODELING

It is shown the increased relative humidity of the tunnels of the service connecting branches (SCB) of the Kiev subway, which during the year from spring to autumn when the air inlets from the stations in the SCB tunnels exceeds the normative level of humidity up 75%. It is proposed to reduce the SCB tunnels relative humidity by air inlets in the tunnel from the environment with less absolute humidity than at the stations. The purpose of the work is to test the performance of the proposed path to lower the humidity below 75% by simulating the tunnels thermal and humidity state. The obtained simulation results are confirmed by experimental test in the Kiev subway.

*Key words: subway, tunnel air, humidity, ventilation, modeling.*

*КРУКОВСЬКИЙ Павло Григорович, д-р техн. наук, професор, зав. лабораторією моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях Ін-ту технічної теплофізики НАН України. У 1973 р. закінчив Одеський ін-т холодильної промисловості. Область наукових досліджень — математичне моделювання, створення комп'ютерних програм для моделювання, розвиток методів та програмного забезпечення для моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях.*

*ТАДЛЯ Ольга Юліївна, канд. техн. наук, ст. наук. співроб. лабораторії моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях Ін-ту технічної теплофізики НАН України. У 1998 р. закінчила Київський національний університет будівництва і архітектури. Область наукових досліджень — математичне моделювання, створення комп'ютерних програм для моделювання, розвиток методів та програмного забезпечення для моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях.*

*ДЕЙНЕКО Андрій Іванович, ст. наук. співроб. лабораторії моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях Ін-ту технічної теплофізики НАН України. У 2004 р. закінчив Національний технічний університет України «Київський політехнічний ін-т». Область наукових досліджень — математичне моделювання, створення комп'ютерних програм для моделювання, розвиток методів та програмного забезпечення для моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях.*

*СКЛЯРЄНКО Дмитро Ігорович, мол. наук. співроб. лабораторії моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях Ін-ту технічної теплофізики НАН України. У 2013 р. закінчив Національний технічний університет України «Київський політехнічний ін-т». Область наукових досліджень — математичне моделювання, створення комп'ютерних програм для моделювання, розвиток методів та програмного забезпечення для моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях.*

*ОЛІЙНИК Владислав Сергійович, інж. першої кат. лабораторії моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях Ін-ту технічної теплофізики НАН України. Студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний ін-т». Область наукових досліджень — математичне моделювання, створення комп'ютерних програм для моделювання, розвиток методів та програмного забезпечення для моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики та теплотехнологіях.*