

ТЕПЛОТЕХНІКА (144)

УДК 697.92: 697.95

**МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОГІСНОГО СТАНУ ТУНЕЛІВ КП
«КИЇВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН» ВПРОДОВЖ КАЛЕНДАРНОГО РОКУ**

Д-р техн. наук П. Г. Круковський, старш. наук. співроб. А. І. Дейнеко,
інж. В. С. Олійник, мол. наук. співроб. Д. І. Скляренко

**MODELING THE WET CONDITION OF TUNNELS KP «KIEV METRO»
IN THE CALENDAR YEAR**

**D. Sc. (Tech.) P. G. Krukowsky, Senior Research A. I. Deineko,
Senior Research V. S. Oliiynk, Junior Researcher D. I. Skliarenko**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186422>

Проведено аналіз експериментальних значень відносної вологості тунельного повітря службових з'єднувальних гілок (СЗГ) КП «Київський метрополітен» при діючих режимах роботи тунельної вентиляції впродовж 2018 року. З метою дотримання нормованого значення вологості тунельного повітря 75 % побудовано комп'ютерну модель тепловологого стану тунелів, що включає до себе геометричну, фізичну та математичну моделі. Верифікація комп'ютерної моделі була проведена з використанням експериментальних даних за 2018 рік. Моделювання тепловологого стану тунелів СЗГ впродовж календарного року показало, що запропонована зміна режимів роботи вентиляційних установок впродовж літнього періоду з видалення на нагнітання дасть змогу знизити відносну вологість повітря нижче 75 %. Результати моделювання були підтверджені експериментальними випробуваннями в Київському метрополітені та впроваджені для використання впродовж усього календарного року.

Ключові слова: метрополітен, тунелі, службова з'єднувальна гілка, вологість, вентиляція, моделювання.

The analysis of the experimental values of the relative humidity of the tunnel air of the service interconnect lines (SIL) of the Kyiv Metro KP under the existing tunnel ventilation operating modes during 2018. It has been established that during the summer period the value of the relative humidity of the tunnel air exceeds the standard value of 75 % under the current operating modes of tunnel ventilation, when the air is pumped in from the stations and removed from the tunnels into the environment.

To solve the problem, a computer model of the heat and humidity state of the tunnels was built, which includes geometric, physical and mathematical sub models. The geometric model on a 1: 1 scale reflects the length of the 2.5 km tunnels and their spatial orientation and consists of 1.5 million cells. The physical model is a set of physical processes that take place in SIL tunnels: the processes of movement and mixing of external and wet tunnel air, heat transfer between the tunnel air and the rim of the tunnel wall, the processes of evaporation and condensation of water. These physical processes are described by differential equations of heat conduction, motion, energy, heat transfer, which are used to calculate the temperature, velocity fields for three

components along the directions of x , y , z coordinates, pressure and humidity. The thermogasdynamic and humidity model was developed using the Ansys CFD software. Verification of the computer model was carried out using experimental data for 2018. Unknown tunnel air flow rates were determined by the computer model parameters identification. When modeling the heat and humidity state of the tunnels, the thermal inertia of the soil layer around the tunnels was taken into account.

Simulation of the heat and humidity state of the SIL tunnels during the calendar year showed that a change in the operating modes of ventilation units during the summer period, when air from the environment is pumped into the tunnel and removed from the tunnels by station fans, will reduce the relative humidity below 75 %. The simulation results were confirmed by experimental tests in the Kiev metro and introduced for use throughout the calendar year in the future.

Keywords: metro, tunnels, service branch line, humidity, ventilation, modeling.

Вступ. Службові з'єднувальні гілки (СЗГ) призначені для з'єднання різних ліній метрополітену між собою, іноді до СЗГ відносять гілки в депо і ділянки з'єднання з залізницею. У Київському метрополітені СЗГ з'єднують три станції: «Хрещатик», «Майдан Незалежності» та «Кловська» (рис. 1). Для пасажирських перевезень СЗГ в Київському метрополітені не використовуються. Від початку введення в експлуатацію СЗГ-1 з 70-х та СЗГ-2 з 80-х років ХХ століття застосовуються виключно в службових цілях: перегін вагонів з однієї робочої гілки на іншу, проїзд до вагоноремонтного заводу, планове проходження колієвимірального вагона по всіх лініях тощо. Передбачена система тунельної вентиляції СЗГ повинна забезпечувати вологість тунельного повітря не вище нормованого значення 75 % [1]. Проте майже щороку протягом весняно-літнього та частково зимового періодів вологість повітря СЗГ суттєво перевищувала норму. Волога в тунельне повітря надходить від випаровування протікання води через нещільності оправи стінок тунелів, калюж колійних лотків, при митті тунелів, води при вологому прибиранні станцій, від пасажирів.

Реконструкція системи тунельної вентиляції СЗГ, що полягала в заміні вентиляційних установок № 115 і № 229 на сучасні високотехнологічні Zitron, останній раз була проведена у 2004 році, і на основі рекомендацій проектної організації було

складено нові графіки роботи системи тунельної вентиляції для кожної з ліній метрополітену, дотримання яких не вирішило проблеми високої вологості тунелів СЗГ.

З 2007 року для обслуговування зеленої гілки метрополітену додатково було введено в дію депо «Оболонь», після чого інтенсивність руху електричних потягів через СЗГ знизилась від кількох разів на день до двох разів на місяць. Внаслідок цього в літній період відносна вологість стала зростати до 100 % (явище туману) з конденсацією вологи на оправі стінок тунелів та електричному обладнанні, розташованому на цій ділянці.

Внаслідок високої вологості тунельного повітря значно пришвидшуються процеси руйнування оправи стінок тунелів і корозії дорогого обладнання системи електропостачання СЗГ, що у свою чергу призводить до зростання грошових витрат з бюджету метрополітену на ремонти і заміну обладнання. Найбільших збитків через високу вологість тунельного повітря може завдати коротке замикання електрообладнання СЗГ, що у свою чергу може стати причиною зупинки руху потягів на найближчих ділянках робочих колій. Тому в сучасних умовах для КП «Київський метрополітен» гострою проблемою є забезпечення неперевищення нормованого значення вологості тунельного повітря СЗГ.

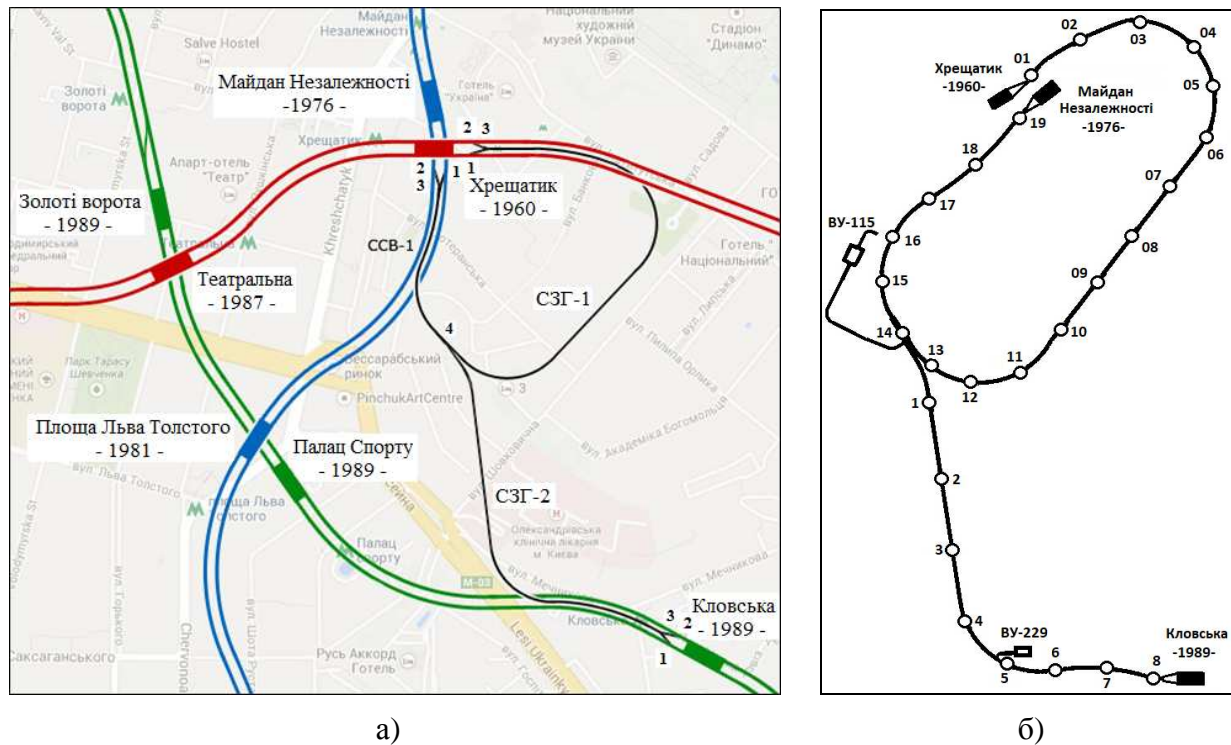


Рис. 1. Схема СЗГ метрополітену: а – схематичне розташування СЗГ між станціями метрополітену: 1-4 – номери стрілок колій; Хрещатик-1960 – назва станції метрополітену та рік побудови відповідно; б – розмітка пікетів СЗГ: 01-19 – номери пікетів СЗГ-1; 1-8 – номери пікетів СЗГ-2

Загалом на будівельних об'єктах з метою зниження вологості повітря застосовують методи адсорбції та конденсації з системами рекуперації енергії [2]. З огляду на обмежене фінансування КП «Київський метрополітен» вказані методи не будуть розглядатися. Таким чином, необхідно зменшити вологість тунельного повітря СЗГ до нормованого значення 75 % або нижче на базі існуючої системи тунельної вентиляції без додаткових затрат – оптимізувати роботу системи тунельної вентиляції СЗГ.

Механічна система тунельної вентиляції СЗГ складається з двох перегінних вентиляційних установок № 115 і № 229 і трьох станційних (рис. 1,б). Робота системи тунельної вентиляції регламентована відповідним графіком, у якому залежно від значень температури і відносної вологості навколишнього середовища для ВШ

регламентовано 8 режимів роботи. Реверсивність механічної системи вентиляції метрополітенів полягає в тому, що зовнішнє повітря в теплий період року нагнітається в тунелі через станційні вентиляційні установки та/або похилі тунелі ескалаторів і видаляється на поверхню через перегінні вентиляційні установки, а в холодний період року навпаки.

З аналізу отриманих від КП «Київський метрополітен» експериментальних даних з абсолютної вологості повітря в тунелях СЗГ за 2004-2017 роки авторами статті висунуто припущення про можливість зниження вологості в тунелях впродовж літнього періоду (з квітня по жовтень) шляхом нагнітання повітря з навколишнього середовища з меншою середньою абсолютною вологістю 7,2 г/кг у тунелі метрополітену, де тунельне повітря має

більше середнє значення абсолютної вологості 10,3 г/кг (рис. 2), що повинно

призвести до зниження вологості тунельного повітря.

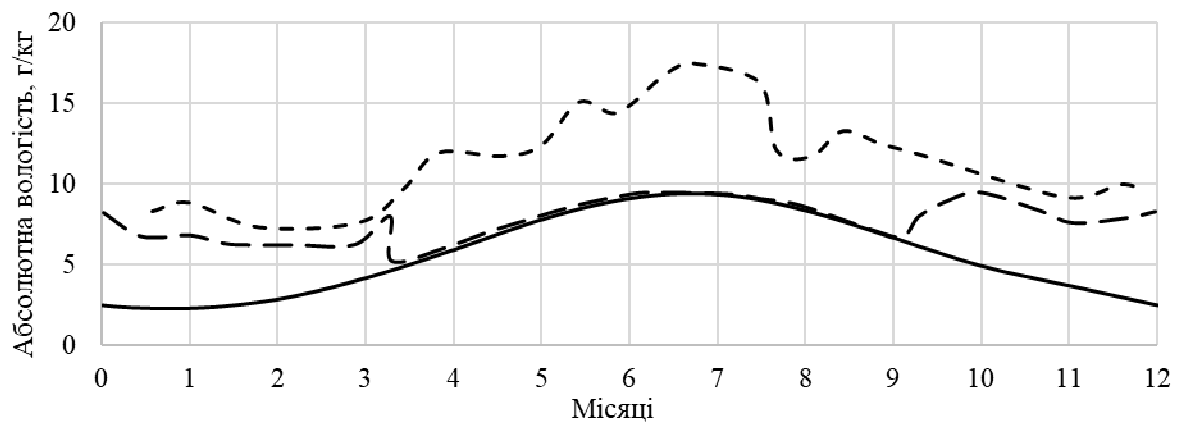


Рис. 2. Зміна абсолютних вологостей у навколишньому (—) і тунельному повітрі впродовж календарного року: - - - — при старому режимі провітрювання; - - - - — при новому режимі провітрювання

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перевірити концепцію запропонованого нового режиму роботи тунельної вентиляції СЗГ можна експериментальним методом, який був доступний, але неочевидний для керівництва КП «Київський метрополітен», тому автори роботи вирішили провести комп'ютерне моделювання, дієвість якого підтверджується наведеним нижче оглядом літератури.

Свого часу для розрахунку систем вентиляції метрополітенів була запропонована спрощена методика інженерних розрахунків системи механічної вентиляції тунелів метрополітенів, викладена в монографії В. Я. Цодікова [3]. Ця методика не дозволяє проводити одночасний аналіз теплових, вологісних і газодинамічних процесів тунельного повітря і його теплообмін з масивом землі в річному циклі.

Відомо, що експериментально-розрахунковий метод поєднує переваги обох методів для найбільш ефективного розв'язання задач прогнозування та оптимізації процесів і об'єктів, що досліджуються на основі обґрунтованої схеми експериментальних вимірювань в об'єкті, побудови моделі об'єкта,

адекватність якої забезпечується шляхом максимального наближення розрахункових та експериментальних значень характеристик параметрів і стану об'єкта [4].

У світовій практиці відома робота [5], у якій автори розробили математичну модель і на її основі дослідили зниження вологості повітря приміщень шлюзового обладнання греблі Інсюван шляхом його змішування з зовнішнім повітрям. У роботі [6] на основі CFD моделювання з метою зниження вологості повітряного простору типового для південного Китаю підземного переходу запропоновано новий режим вентиляції повітря з частковою реалізацією методу асиміляції. Проведені експериментальні дослідження на прикладі Z-подібного підземного пішохідного переходу по вулиці Цуйліну міста Ухань підтвердили отримані результати моделювання. Автори роботи [7] з метою дослідження теплообміну між тунельним повітрям і поверхнею тунелю глибокого залягання і врахуванням явища конденсації при цьому розробили числову модель. Отримані результати моделювання були перевірені експериментально, після чого виконано прогнозування вологісного стану

тунелю впродовж 10 років експлуатації. У результаті виконання роботи розроблено практичні рекомендації щодо заходів з безпеки праці. Також відома експериментальна робота [8], у якій встановлено істотний вплив вхідних швидкості та температури зовнішнього повітря на теплообмін під час протікання повітря по тунелях греблі для різних періодів року. Рекомендовано використовувати головний підземний тунель як аналог «грунтового теплообмінника» в системі кондиціювання повітря, для чого запропоновано відповідні режими роботи. У роботі [9] на основі CFD моделювання проведено дослідження різних режимів роботи системи тунельної вентиляції метрополітену з впливом помпового ефекту і без нього. За отриманими результатами було проведено оптимізацію роботи системи вентиляції щодо мінімізації кількості припливного повітря з метою підтримання необхідної температури тунельного повітря в різні періоди та сезони.

Отже, застосування сучасних CFD (Computation Fluid Dynamic) технологій моделювання для різних об'єктів дозволяє здійснювати одночасно розрахунок фізичних процесів, що дає можливість пошуку оптимальних режимів роботи вентиляційних установок для забезпечення

критерію оптимізації – потрібного значення вологості повітря.

Визначення мети та завдання дослідження. На основі CFD моделювання виконати прогнозування вологісного стану тунелів СЗГ КП «Київський метрополітен» впродовж повного календарного року при реалізації запропонованого режиму роботи вентиляційних установок тунельної вентиляції в літній період та експериментально підтвердити отримані результати.

Основна частина досліджень

Геометрична модель тунелів СЗГ побудована відповідно до отриманої від КП «Київський метрополітен» архітектурно-будівельної документації.

Тунелі СЗГ-1 мають протяжність близько 1950 м, СЗГ-2 – близько 850 м, перепад висот колій між найвищою та найнижчою точками тунелів СЗГ складає 73 м. Глибина вентиляційної шахти (ВШ) № 229 становить 47 м; загальна глибина ВШ-115 – 95 м: до поверхні вентиляційного тунелю 50 м і висота над поверхнею ґрунту 45 м (рис. 3, а). За оцінками В. Я. Цодікова [3], теплоакуюлюючий шар землі навколо тунелів глибокого залягання не перевищує 10 м, тому товщину землі навколо тунелю прийнято 10 м (рис. 3, б). CFD модель СЗГ має близько 1,5 млн комірок (рис. 4).

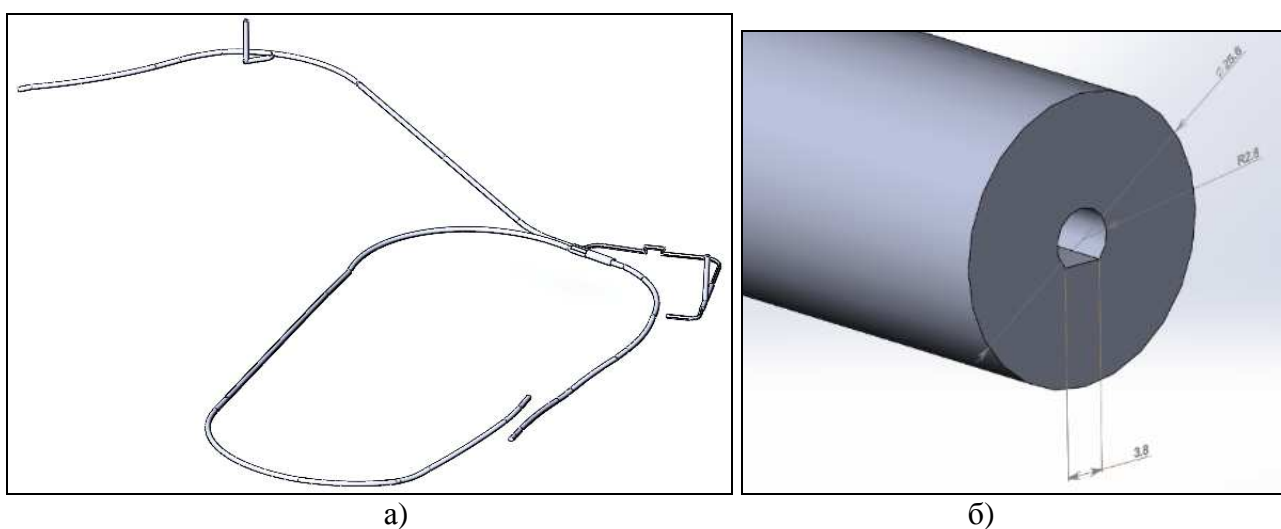
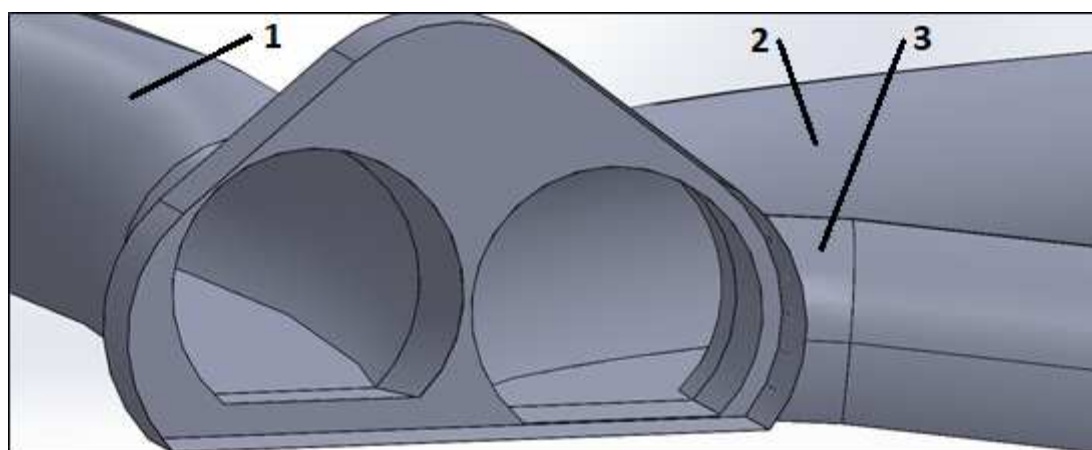


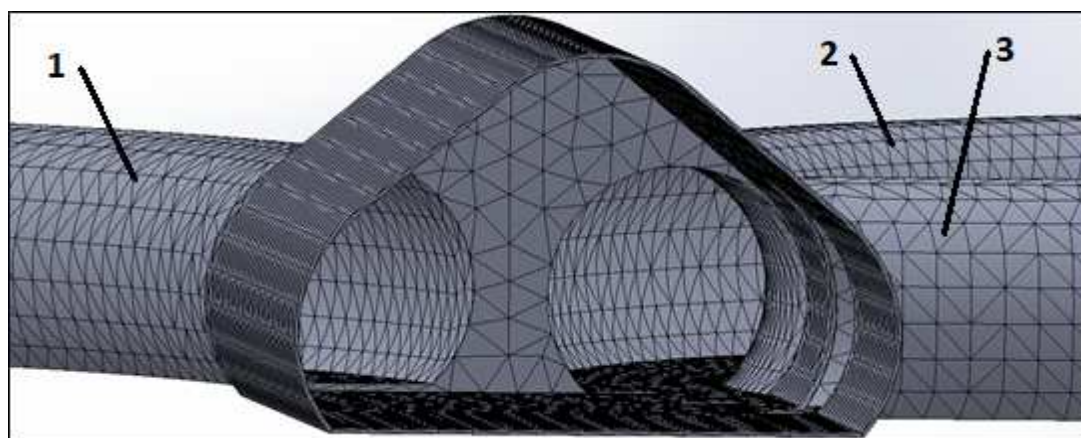
Рис. 3. Геометрична модель СЗГ: а – вигляд геометричної моделі СЗГ зі ст. м. «Хрещатик»; б – вигляд поперечного перерізу моделі тунелю з шаром землі товщиною 10 м навколо нього



а)



б)



в)

Рис. 4. Фрагмент геометричної моделі роз'їзду СЗГ: а – фото роз'їзду між СЗГ-1 та СЗГ-2; б – вигляд роз'їзду СЗГ без сітки, у якому: 1 – напрямок до ст. м. «Хрещатик»; 2 – напрямок до ст. м. «Кловська»; 3 – напрямок до ВШ-115; в – вигляд роз'їзду СЗГ з накладеною сіткою

Фізична модель являє собою сукупність фізичних процесів, які мають місце в тунелях СЗГ: процеси руху і змішування зовнішнього та вологого тунельного повітря, теплообмін між тунельним повітрям та оправою стінки тунелю, процеси випаровування та конденсації води. Вказані фізичні процеси можуть бути описані диференціальними рівняннями теплопровідності, енергії, руху, тепловіддачі [10, 11], за якими розраховуються поля температур, швидкостей за трьома компонентами вздовж напрямків координат x, y, z , тиску і вологості.

Математична модель. Термогазо-динамічна і вологісна модель була розроблена з використанням програмного пакета *Ansys CFD*.

Модель відтворює геометрію гілок СЗГ Хрещатик-Роз'їзд-Майдан-Кловська з вентиляційними шахтами ВШ-229 на гілці Кловська-Роз'їзд та ВШ-115 на Роз'їзді. Самі станції та з'їзди з основних тунелів у тунелі СЗГ не враховуються в моделі, таким чином, 3D модель тунелів СЗГ починається за кілька десятків метрів від станцій. Як граничні умови на кінцях гілок використовувались масова витрата або тиск, які забезпечуються станційними вентиляторами. Помповий ефект від руху поїздів не враховувався. Тунелі ВШ є

відгалуженням від тунелів СЗГ і мають довжину в кілька десятків метрів задля досягнення відносно стабілізованої течії повітря. Граничні умови на кінцях ВШ – масова витрата або статичний тиск – відповідають умовам, які забезпечуються вентиляторами ВШ і самотягою через вентиляційну трубу на поверхню. Оцінювання витрат на кожному кінці тунелів СЗГ відбувалось експериментально через заміри середньої швидкості потоку в окремих гілках у місцях зі стабілізованою течією повітря.

З урахуванням особливостей формулювання задачі, а саме руху мас повітря з помірними швидкостями далеко від стінки, була вибрана стандартна $k-\epsilon$ модель турбулентності. Вибрано Simple алгоритм розв'язання на основі тиску (pressure-based solver) з дискретизації першого порядку (first order upwind discretization) для імпульсу, тиску, енергії, турбулентності і дисипації, що є достатнім для задач такого масштабу [11].

Рівняння перенесення Species transport для другого компонента в повітрі (волога)

Для i -компонента основної фази (волога в повітрі) рівняння нерозривності матиме такий вигляд і буде доповнено дифузійним потоком J компонента i :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_i, \quad (1)$$

$$\vec{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}, \quad (2)$$

де S_i – будь-які джерела, що визначаються дослідником (описано нижче);

Y_i – локальна масова частка кожного компонента;

$D_{i,m}$ – коефіцієнт дифузії маси для частинок i в суміші;

$D_{T,i}$ – коефіцієнт термічної дифузії (у моделі $D_{T,i} = 0$);

Sc_t – турбулентне число Шмідта (величина дорівнює 0,7).

Припускається, що густина повітря постійна (нестисливий газ), тому природньою конвекцією знехтувано, S_i розраховується з використанням UDF.

Інтенсивність випаровування з поверхні води при русі повітря зі швидкістю V і температурою T через емпіричну залежність, кг/с [12],

$$g = \theta \cdot A \cdot (H_s - H) / 3600, \quad (3)$$

де $\theta = 25 + 19 \cdot V$ – коефіцієнт випаровування;

V – швидкість потоку повітря;

A – площа поверхні дзеркала води;

H – поточна абсолютна вологість повітря;

H_s – абсолютна вологість при $\phi = 100\%$ (при даній температурі), яка справедлива для діапазону температур від 0 до 40 °С, г/м³ [13],

$$H_s = 5,018 + 0,32321 \cdot T + 8,1847 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 3,1243 \cdot 10^{-4} \cdot T^3, \quad (4)$$

Використання формули (3) із формулою (4) передбачає такі припущення:

1) емпіричний коефіцієнт випаровування θ , який був отриманий для випадку випаровування з поверхні дзеркала води, справедливий і для випаровування з поверхні стінок. Проте в тунелях метро розподіл води по периметру поперечного перерізу нерівномірний: знизу можуть бути калюжі, які не поглинаються ґрунтом, а з боків і зверху протічки і тріщини, які пропускають воду, зволожуючи поверхню. Таким чином, джерело вологи за формулою (1) можна назвати еквівалентним. Приведення інтенсивності випаровування в метро до інтенсивності випаровування з площі поверхні дзеркала води можна здійснити, підбравши площу випаровування A ;

2) діапазон температур, у якому методика вважається робочою, – від 0 до 40 °С. Для цього у свою чергу було прийнято, що повітря, яке входить у тунель із ВШ взимку, встигає прогрітись до температури вище 0 °С;

3) якщо повітря на ділянці тунелю насичене вологою ($H_s < H$), то джерело згідно з формулою (1) має бути негативним. У моделі було прийнято, що в такому випадку джерело дорівнює 0.

4) джерело вологи розраховується як об'ємне, а не поверхневе. Тобто волога, яка випаровується з поверхні, вноситься не в комірки, що біля стінки, а рівномірно в об'єм ділянки. Цим припускається, що дифузія вологи в повітрі (другої фази) дорівнює 1 і в деякому наближенні це є

справедливим для турбулізованих течій, якими і є потоки в тунелях.

Далі формулу (3) слід імплементувати до випаровування з поверхні тунелів у метро. Знаючи швидкість потоку та його температуру, абсолютну вологість, невідомим членом залишається площа поверхні випаровування A . Вона не дорівнює загальній площі поверхні тунелю, оскільки стінки зволожені нерівномірно, і тип поверхні, або шорсткість, також впливає на швидкість випаровування. Тому площа поверхні випаровування підібрана в CFD моделі з експериментальних даних, які являють собою планові заміри вологості, температури та швидкості повітря, а також температуру стінок тунелів протягом 2013–2014 та 2017–2018 років.

Для приведення одиниць розмірності джерел води для Fluent потрібно g поділити на об'єм ділянки тунелю метро *Volume*.

Площа A , м, підбирається з виразу, м²,

$$A = (Volume/S_{\Pi}) \cdot a,$$

де S_{Π} – площа поперечного перерізу тунелю;

вираз $Volume/S_{\Pi}$ – довжина ділянки тунелю;

a – коефіцієнт, м²/м (площа поверхні випаровування на одному метрі тунелю), підбирається для випаровування та конденсації, використовуючи експериментальні дані.

Остаточне джерело води для Fluent, кг/м³·с,

$$G = \left(\frac{(25 + 19 \cdot V) \cdot (Volume/S_{II}) \times}{\times a \cdot (H_s/(\rho \cdot 1000)) - H} \right) / Volume,$$

де $(\rho \cdot 1000)$ – приведення максимальної абсолютної вологості з формули (2) до розмірності кілограм води/кілограм повітря.

Рівняння імпульсів (5):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{\vartheta}) + \nabla \cdot (\rho \vec{\vartheta} \vec{\vartheta}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \tag{5}$$

де p – статичний тиск; $\vec{\vartheta}$ – швидкість; $\bar{\tau}$ – тензор напружень (описано нижче); $\rho \vec{g}$ та \vec{F} – сила гравітації та сила зовнішнього тіла відповідно (виникає, наприклад, при

взаємодії з дисперсною фазою). \vec{F} також містить інші джерела, які визначаються дослідником (дорівнюють 0).

Рівняння енергії

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{\vartheta}(\rho E + p)) = \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{\vartheta})) + S_h, \end{aligned} \tag{6}$$

де k_{eff} – ефективна провідність ($k + k_t$), де k – теплопровідність газу; k_t – турбулентна теплопровідність, що визначається у відповідності з використовуваною моделлю турбулентності); \vec{J}_j – дифузійний потік частинок.

Перші три члени у правій частині рівняння являють собою передачу енергії через провідність, дифузію частинок та в'язкість дисипації відповідно. S_h включає до себе об'ємні джерела теплоти, що дорівнюють теплоті пароутворення (конденсування).

Величина E визначається за формулою

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{\vartheta^2}{2},$$

де h – ентальпія, яка визначається для нестисливих газів як

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho},$$

де Y_j – масова частка компонента j в повітрі;

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT,$$

де T_{ref} дорівнює 298,15 К.

Дифузія енергії одночасно з дифузією другої компоненти повітряної фази (вологи) враховується рівнянням

$$\nabla \cdot \left[\sum_{i=1}^n h_i \vec{J}_i \right].$$

Для стандартної к-ε моделі турбулентності рівняння турбулентності к-енергії така:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \tag{7}$$

де σ_k – турбулентне число Прандтля для турбулентної енергії k ;

G_k – генерація кінетичної енергії турбулентності за рахунок середніх градієнтів швидкості;

G_b – генерація кінетичної енергії турбулентності за рахунок плавучості;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (8)$$

де $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ – константи;

σ_ϵ – турбулентне число Прандтля для енергії дисипації ϵ ;

S_ϵ – додаткові джерела, які можуть бути додатково задані користувачем (дорівнюють 0).

Такий підхід дозволив обійти ресурсні обмеження програмного забезпечення Fluent при повному врахуванні цих ефектів як динамічної зміни теплового стану об'єкта залежно від температурного режиму навколишнього середовища та параметрів тунельного повітря на станціях метрополітену.

Прийняті припущення при моделюванні:

1. Припускається, що теплофізичні властивості ґрунту незмінні протягом року [5-9]: густина 1500 кг/м^3 , теплопровідність $1,75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, середня питома ізобарна масова теплоємність $880 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

2. Абсолютна вологість повітря на вході в роз'їзд з ВШ-115 дорівнює абсолютній вологості повітря на вулиці (джерела вологи в тунелі ВШ-115 не враховані).

3. При моделюванні нагнітання свіжого повітря припускається, що температура повітря, яке виходить із вентиляційних тунелів і надходить у тунелі СЗГ, відразу набуває значення температури тунельного повітря відповідно до значень експериментальних даних.

Y_M – внесок флуктуацій розширення стиснуваного середовища до загальної швидкості дисипації;

S_k – додаткові джерела, які можуть бути додатково задані користувачем (рівні 0).

Рівняння ϵ -енергії дисипації

Для безпосереднього виконання числового розв'язання диференціальних рівнянь – комп'ютерного моделювання – необхідне задавання граничних умов, які характеризують протікання процесів на границях комп'ютерної моделі. З наданої вихідної інформації від КП «Київський метрополітен» і проведених додаткових експериментальних досліджень можна сформулювати граничні умови на межах СЗГ для всіх режимів роботи ВУ: задаються температура, вологість і швидкість тунельного повітря. У результаті моделювання необхідно визначити нестационарні поля температур і відносної вологості тунельного повітря, витрати повітряних потоків за різних режимів роботи тунельної вентиляції.

Аналіз експериментальних даних, отриманих від КП «Київський метрополітен». Починаючи з 2004 року і до сьогодні співробітниками виміральної лабораторії електромеханічної служби (у 2018 році сумісно з авторами статті) проводилися експериментальні дослідження параметрів мікроклімату тунелів СЗГ з урахуванням «помпового» ефекту від руху потягів відповідно до рекомендацій В. Я. Цодікова [3]. Під час вимірювань температури тунельного повітря та поверхні оправи стінок тунелів, відносної вологості та швидкості руху тунельного повітря використовували пірометр testo 835-T1 і термоанемометр testo 435-T1.

З початку 2018 року і до 15 серпня зміна відносної вологості тунельного повітря для різних пікетів по довжині СЗГ відбувалася в досить широких межах – від 60 до 100 %. Такий характер зміни середньої відносної вологості пояснюється нерівномірними розподілами температур тунельного повітря і стінок оправи тунелів і відносної та абсолютної вологості по довжині тунелів СЗГ для вибраних моментів часу, що обумовлювалися можливістю проведення експериментальних робіт. Основною причиною такої зміни досліджуваних параметрів є зміна витрат і напрямку тунельного повітря СЗГ, на що додатково впливає «помповий» ефект і робота системи тунельної вентиляції відповідно до графіка роботи тунельної вентиляції (рис. 2, 5).

Після ввімкнення ВУ 115 в режим нагнітання повітря навколишнього середовища в тунелі СЗГ з 15 серпня 2018 року по 13 листопада 2018 року було досягнуто рівності по довжині тунелів значень температур тунельного повітря і оправи стінок тунелів і відносної та абсолютної вологості, що врешті-решт призвело до меншої зміни параметрів мікроклімату по довжині тунелів СЗГ. Також у період нагнітання повітря ВУ115 наприкінці жовтня відносна середня вологість тунельного повітря знову перевищує нормоване значення і зростає до рівня 80 % (рис. 5, 6), що пояснюється надходженням більш нагрітого вологого повітря зі станцій метрополітену в холодніші тунелі СЗГ.

Як видно з рис. 5, 6, під час осіннього періоду після перемикавання ВУ-115 з режиму нагнітання в режим видалення повітря в кінці вересня та на початку жовтня відбулося зростання вологості тунельного повітря вище нормованого значення. Дане явище можна пояснити тим, що запропонований оптимальний режим роботи тунельної вентиляції, з точки зору зниження відносної вологості тунельного повітря, був реалізований у короткі терміни – не з початку квітня по кінець вересня

(суцільна лінія), а фактично з 15 серпня по 13 листопада 2018 року (штрихова лінія).

Таким чином, під час апробації рекомендацій ІТТФ НАНУ з 15 серпня по 13 листопада 2018 року за рахунок нагнітання повітря з навколишнього середовища в тунелі СЗГ вдалося підвищити температуру тунельного повітря, відповідно до цього підвищити температуру оправи стінок тунелів і зменшити абсолютну вологість тунельного повітря. Внаслідок такого поєднання впливу зміни параметрів мікроклімату СЗГ за вказаний період і відбулося зниження відносної вологості.

Результати CFD моделювання.

Оскільки експериментальні дані параметрів мікроклімату були визначені дискретно по довжині тунелів СЗГ (на деяких пікетах) у певні моменти часу, то для комп'ютерного моделювання середні арифметичні значення параметрів мікроклімату були перераховані на середні об'ємні значення. CFD модель була верифікована на накопичених експериментальних даних за 2018 рік. Як видно з рис. 5, 6, результати комп'ютерного моделювання зміни значень параметрів мікроклімату по ділянках тунелів СЗГ добре узгоджуються з середніми об'ємними значеннями відповідних величин, визначених експериментально. Таким чином, після проведення процедури налаштування (верифікації) комп'ютерної моделі за експериментальними даними була отримана модель, на якій можна проводити прогнозування зміни параметрів мікроклімату тунелів СЗГ і впровадження рекомендацій ІТТФ НАНУ з організації роботи механічної системи тунельної вентиляції впродовж повного календарного року.

На рис. 5, 6 наведені результати комп'ютерного моделювання при роботі системи тунельної вентиляції СЗГ впродовж повного календарного року відповідно до рекомендацій ІТТФ НАНУ. З цих рисунків видно, що в разі дотримання рекомендованих нових режимів роботи

тунельної календарного вентиляції року впродовж середня відносна вологість тунельного повітря СЗГ не буде перевищувати 80 %.

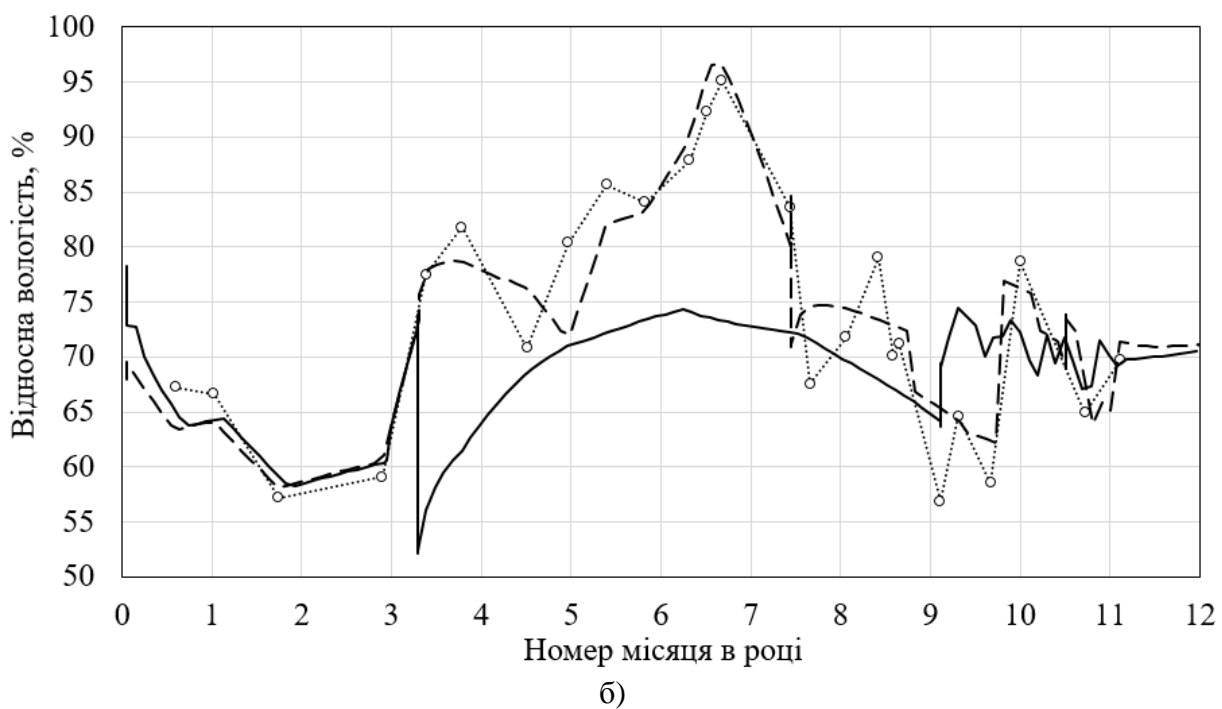
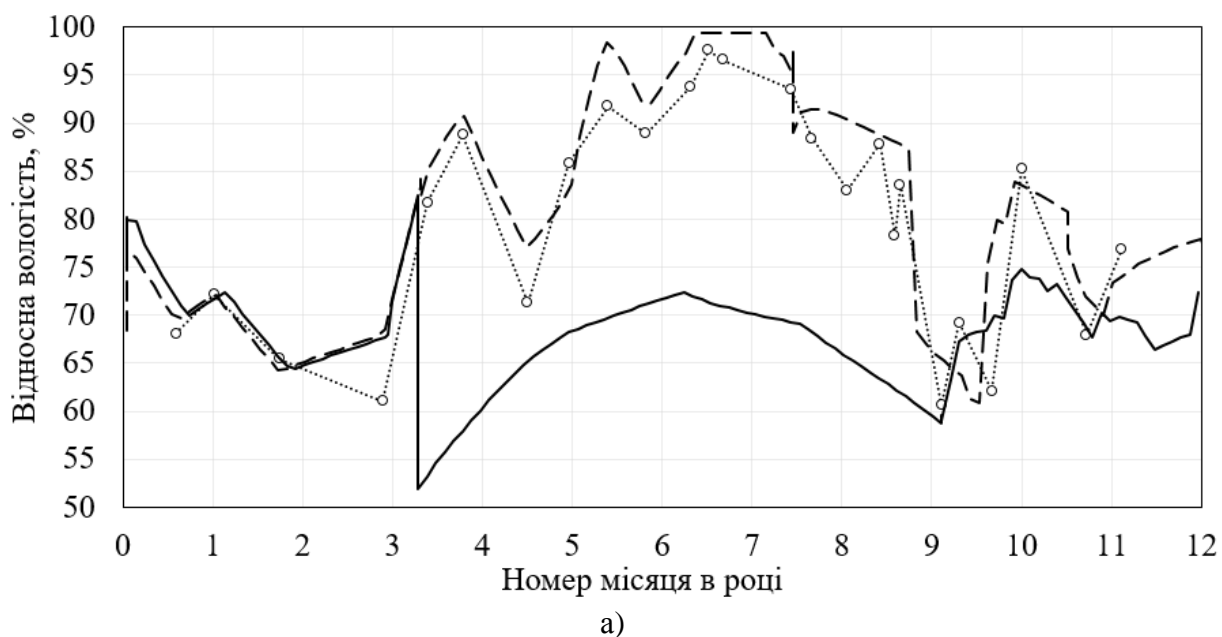


Рис. 5. Зміна середніх об'ємних значень відносної вологості тунельного повітря протягом року на ділянці СЗГ-1:
 а – від ст. м. «Хрещатик» до Роз'їзду; б – від ст. м. «Майдан Незалежності» до Роз'їзду;
 - o - – експериментальні значення; - - - – розрахункові значення для старого режиму вентиляції; — – розрахункові значення для нового режиму вентиляції

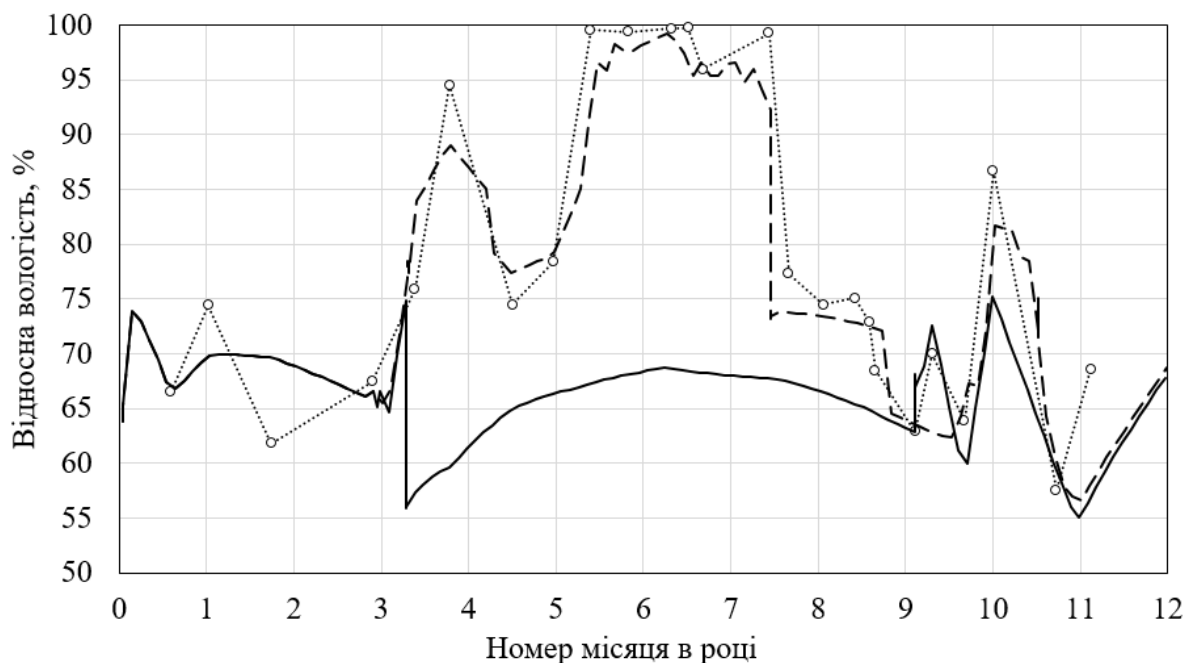


Рис. 6. Зміна середніх об'ємних значень відносної вологості тунельного повітря протягом року на ділянці СЗГ-2 від ст. м. «Кловська» до Роз'їзду:

- ○ - - експериментальні значення; - - - - розрахункові значення для старого режиму вентиляції; — - розрахункові значення для нового режиму вентиляції

Для періоду календарного року, що має межі від початку року до сотого порядкового дня в році (10 квітня), спостерігається поступове зростання середнього значення відносної вологості СЗГ до рівня 80 %. Це пояснюється тим, що на кінець зимового періоду оправа стінок тунелів і шар ґрунту навколо тунелів мають нижчу температуру, ніж температура навколишнього повітря. До того ж під кінець зимового періоду одночасно з цим зростатиме вологість навколишнього повітря, тому при вентиляції тунелів буде відбуватися зниження температури до значення температури тунельного повітря (у випадку переохолодження шару ґрунту навколо тунелів нижче середньої температури можливе зниження температури до значення температури точки роси – явище туману) і, як наслідок, зростання відносної вологості тунельного повітря.

У період календарного року, що починається від сотого дня (10 квітня) по 277 день (5 жовтня), рекомендовано

нагнітати повітря з навколишнього середовища в тунелі СЗГ. Для даного періоду характерним є зростання абсолютної вологості зовнішнього повітря до максимуму та зменшення до рівня весняного, тому відповідно буде змінюватися відносна вологість тунельного повітря СЗГ (рис. 2, 5, 6).

До кінця календарного року в період від 277 дня (5 жовтня) до 365 дня (31 грудня) спостерігається впродовж першого місяця поступове зростання середнього значення відносної вологості до рівня, близького до нормованого значення. Це пояснюється тим, що температура зовнішнього повітря поступово знижується та при вентиляції тунелів СЗГ охолоджуватиме шар ґрунту навколо тунелів. При надходженні більш нагрітого і вологішого повітря зі станцій метрополітену в СЗГ буде відбуватися охолодження такого повітря, що призведе до підвищення середньої відносної вологості (див. рис. 2, 5, 6).

Висновки

1. Накопичені експериментальні значення параметрів мікроклімату з урахуванням «помпового ефекту» при роботі механічної системи тунельної вентиляції СЗГ відповідно до чинного (старого) графіка роботи тунельної вентиляції, коли провітрювання тунелів СЗГ здійснюється повітрям від станцій метрополітену впродовж календарного року, свідчать про зростання вологості тунельного повітря в літній період до 80-95 %, іноді 100 %.

2. Впродовж літнього періоду запропоновано змінити режими роботи вентиляційних установок тунельної вентиляції СЗГ таким чином, щоб більш сухе і нагріте повітря навколишнього середовища перегінними вентиляційними установками нагніталось в тунелі СЗГ, а видалялося з тунелів станційними.

3. Розроблено CFD модель термогазодинамічного та вологого станів тунелів СЗГ, що являє собою сукупність геометричної моделі та математичний опис фізичних процесів тепломасообміну двофазного середовища. Адекватність CFD моделі була забезпечена використанням експериментальних даних параметрів мікроклімату за 2018 рік. Уточнена модель показала близькість розрахункових і експериментальних значень відносної

вологості тунельного повітря СЗГ при старому режимі роботи вентилювань.

4. На основі верифікованої CFD моделі здійснено прогнозування зміни параметрів мікроклімату впродовж повного календарного року за умови реалізації розроблених рекомендацій ІТТФ НАНУ з організації нового режиму роботи системи тунельної вентиляції СЗГ. На основі аналізу результатів комп'ютерного моделювання встановлено, що для зимового та осіннього періодів середня відносна вологість тунельного повітря СЗГ може досягати нормованого значення 75 або 80 %, впродовж літнього періоду відносна вологість буде нижче 75 %.

5. Отримані результати моделювання термогазодинамічного і вологісного режимів тунелів СЗГ впродовж календарного року підтверджені експериментальним випробуванням в Київському метрополітені.

6. На основі аналізу експериментальних та отриманих розрахункових результатів шляхом комп'ютерного моделювання можна зробити висновок про відсутність необхідності зниження відносної вологості тунельного повітря СЗГ додатковим або іншим обладнанням.

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

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. МЕТРОПОЛІТЕНИ. [Чинний від 2011-10-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 299 с. (Національний стандарт України).
2. Зниження вологості в тунелях КП «Київський метрополітен» шляхом зміни режимів роботи вентиляційних установок / А. І. Дейнеко, П. Г. Круковський, Д. І. Склярєнко та ін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 183. С. 35-45.
3. Цодиков В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Недра, 1975. 56 с.
4. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (Общий инженерный подход). Киев: НАНУ, Институт технической теплофизики, 1998. 224 с.
5. YU Yan Shun, QIAN Pu Hua, ZHANG Shao Fan. Development and Validation of Mathematical Model for Tailrace Tunnel Ventilating Process in Hydropower Station. *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications*. 2011. Vol. 71-78. P. 4069-4073.

6. Li X., Qin Y., Wang Y. Natural Ventilating Behavior of Z-Shaped Pedestrian Underpass in Wuhan. In: Zhang D., Huang X. (eds) Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Tunnelling and Underground Construction. GSIC 2018, Springer, Singapore. P. 633-641.
7. Liu X., Xiao Y., Inthavong K., Tu J. A fast and simple numerical model for a deeply buried underground tunnel in heating and cooling applications. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 62. P. 545-552.
8. Ren T., 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. Guan1 X., Jiang1 Y., Yao1 Y. CFD simulation of a novel ventilation system of subway station in Harbin. Proceedings: Building Simulation. 2007. P. 432-436. URL: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p445_final.pdf (Last accessed 24.04.2018).
10. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учеб. для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. Москва: Энергоиздат, 1981. 416 с.
11. ANSYS FLUENT 17. Documentation. URL: <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%202015.pdf> (Last accessed 24.04.2018).
12. Engineering ToolBox, (2004). Evaporation from Water Surface. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d_690.html [Last accessed 28.02.2019].
13. Hyperphysics, (1998). Relative Humidity. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/relhum.html> [Last accessed 28.02.2019].

Круковський Павло Григорович, головний науковий співробітник, завідуючий лабораторією моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки, інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: kruk_2@ukr.net.

Дейнеко Андрій Іванович, старший науковий співробітник, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки, інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: andriideineko@gmail.com.

Олійник Владислав Сергійович, інженер I категорії, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки, інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: oliinyk-vlad@ukr.net.

Склярєнко Дмитро Ігорович, молодший науковий співробітник, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки, інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81.

E-mail: cklyr90@bigmir.net.

Krukovskiy Pavlo Grihorovich, chief scientist, Head of the laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: kruk_2@ukr.net.

Deineko Andrii Ivanovich, senior research, laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: andriideineko@gmail.com.

Oliinyk Vladyslav Serhiyovich, engineer of 1st category, laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: oliinyk-vlad@ukr.net.

Skliarenko Dmytro Igorovich, junior researcher, laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: cklyr90@bigmir.net.

Статтю прийнято 04.09.2019 р.