

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 697.92: 697.95

**ЗНИЖЕННЯ ВОЛОГОСТІ В ТУНЕЛЯХ КП «КИЇВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН»
ШЛЯХОМ ЗМІНИ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ УСТАНОВОК**

Старш. наук. співроб. А. І. Дейнеко, д-р техн. наук П. Г. Круковський,
мол. наук. співроб. Д. І. Скляренко, М. М. Федотов, канд. техн. наук О. Ю. Тадля

**REDUCTION OF HUMIDITY IN TUNNELS OF KIEV METROPOLITEN, BY
CHANGING THE OPERATION MODES OF VENTILATION INSTALLATIONS**

**A. I. Deineko, D. Sc. (Tech.) P. G. Krukowsky, D. I. Skliarenko, M. M. Fedotov,
PhD (Tech.) O. Yu. Tadlia**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.183.2019.169636>

У статті проаналізовано експериментальні значення відносної вологості тунельного повітря службових з'єднувальних гілок КП «Київський метрополітен» при роботі тунельної вентиляції відповідно до діючих графіків. Для дотримання нормованого значення вологості тунельного повітря запропоновано зміну режимів роботи вентиляційних установок упродовж літнього періоду: з видалення на нагнітання. Експериментально підтверджено зниження вологості тунельного повітря при ввімкненні рекомендованого режиму роботи вентиляційних установок.

Ключові слова: відносна вологість, повітря, мікроклімат, тунель, гілка, метрополітен.

The implementation of the operation modes of the ventilation system in accordance with the current schedules of the service interconnect lines (SIL) of the Kiev Metro consists of forcing air into the tunnels from the stations in the summer period.

The humidity of the tunnel air of the SIL between the Klovska-Maydan Nezalezhnosti-Khreshchatyk metro stations from April to October from 2005 to 2018 exceeds the permissible value of 75 % and sometimes reaches 100 % (fog).

The high humidity of the tunnel air significantly accelerates the processes of destruction of the rim walls of the tunnels and the corrosion of expensive equipment of the power supply system, which can cause a short circuit of the SIL electrical equipment and stop the movement of trains in the nearest worker lines.

The main reason for the high humidity of SIL tunnels in the summer period, as evidenced by the experimental data, is that the tunnel air from metro stations has higher an average absolute humidity at 2 g/kg compared to the air that is delivered from the ventilation tunnels in the SIL tunnels. Therefore, to reduce the relative humidity of the SIL tunnels air, has been proposed to delivery air from the environment into the tunnels, and not from the metro stations.

The analysis of the change in the average monthly value of the relative air humidity from April to August during the delivery of air from the environment into the tunnels has been carried out and it has been established that the relative humidity of the SIL tunnels air will not exceed the permissible value of 75 %.

In the existing schedules of the operation modes tunnel ventilation of SIL tunnels of the Kyiv Metro during the summer period recommended changing the operating modes of the ventilation units so that ambient air is forced into the SZG tunnels by ventilation units 115 and 229, and air from the tunnels is carried out by station fans. Approbation of the recommended operation modes of the ventilation systems was carried out, which led to a decrease in the humidity of the tunnel air in the range from 50 to 75 %.

Keywords: relative humidity, air, microclimate, tunnel, branch, metro.

Вступ. Розбудова міста Київ у мегаполіс спричинила зростання кількості населення, унаслідок чого постійно збільшується величина пасажиропотоку комунального підприємства (КП) «Київський метрополітен», яка на цей час становить близько 1,7 млн осіб/дн, що суттєво відрізняється від проектного значення. Зростання кількості пасажирів метрополітену призводить до збільшення виділення вологи в тунельному повітрі метрополітену і відповідно до підвищення навантаження на систему тунельної вентиляції, яка має забезпечувати нормоване значення відносної вологості тунельного повітря не більше 75 % [1]. За даними В. Я. Цодікова [2] була проведена оцінка виділення вологи від пасажирів: при середньому значенні пасажиропотоку 1816 осіб/год на одній станції метрополітену при диханні та потовиділенні від пасажирів за 18 год робочого дня виділяється вологи 3270 кг/дн (182 кг/год або 1200 т/р.). Крім того, у тунельне повітря додатково надходить волога від випаровування води при вологому прибиранні станцій (кожні 20 хв), митті тунелів (1 раз на рік – 15 т/км), протікання води через нещільності оправи стінок тунелів (постійно), калюж колійних лотків (постійно). Унаслідок інтенсивного виділення вологи в тунельному повітрі службових з'єднувальних гілок (СЗГ) між станціями метрополітену (ст. м.) Кловська–Майдан Незалежності–Хрещатик (рис. 1) з квітня по жовтень від 2005 по 2018 рр. спостерігається рівень вологості, вищий за

нормований: лежить у межах 85–95 % та іноді сягає 100 % (явище туману).

Реконструкція системи тунельної вентиляції СЗГ, що полягала у встановленні вентиляційних установок Zitron, останній раз була проведена у 2005 році та на основі рекомендацій проектної організації було складено нові графіки роботи системи тунельної вентиляції для кожної з ліній метрополітену (червона – Святошинсько-Броварська лінія, зелена – Сирецько-Печерська лінія і синя – Куренівсько-Червоноармійська лінія), дотримання якого не вирішило проблеми високої вологості тунелів СЗГ.

Таким чином, у сучасних умовах постає постійна потреба в дотриманні нормованої вологості тунельного повітря, оскільки високе значення відносної вологості тунельного повітря значно пришвидшує процеси руйнування стінок оправи тунелів та корозії дорогого обладнання системи електропостачання, що у свою чергу призводить до зростання грошових витрат з бюджету метрополітену на ремонти та заміну обладнання відповідно. 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.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі такі фізичні методи зниження вологості: асиміляції, адсорбції та конденсації [3].

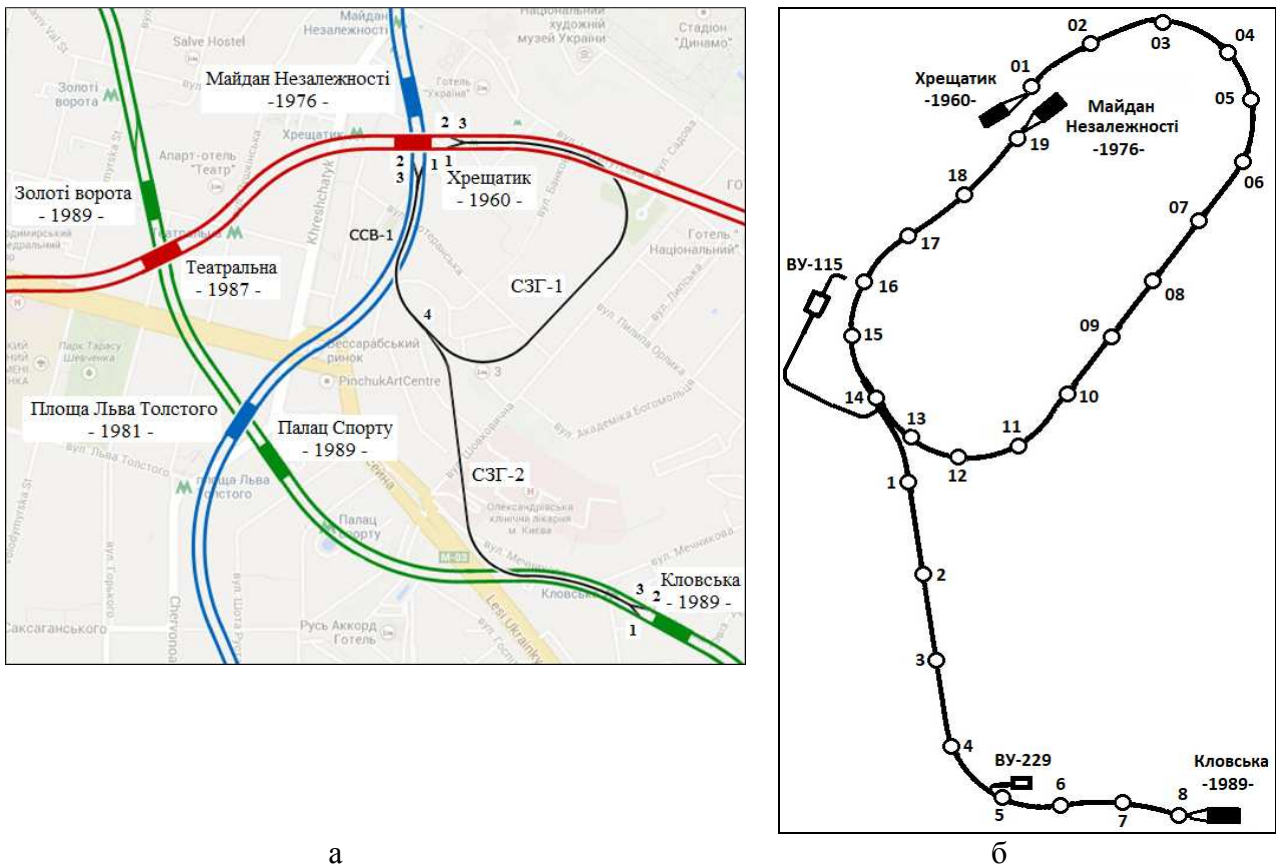


Рис. 1. Схема СЗГ метрополітену: а – схематичне розташування СЗГ між станціями метрополітену: 1-4 – номери стрілок колій; Хрещатик - 1960 - – назва станції метрополітену та рік побудови відповідно; б – розмітка пікетів СЗГ: 01-19 – номери пікетів СЗГ-1; 1-8 – номери пікетів СЗГ-2

Метод асиміляції ґрунтується на фізичній здатності теплого повітря утримувати більшу кількість водяної пари порівняно з холодним. Цей метод може бути реалізований засобами вентиляції з попереднім підігрівом повітря або в літній період шляхом нагнітання теплішого і сухішого повітря з навколишнього середовища (без попередньої обробки) у холодне приміщення (споруду) з вологішим повітрям. Метод асиміляції повітря використовують при осушуванні басейнів, погребів, складських приміщень, гальванічних цехів тощо. У ряді випадків метод асиміляції є недостатньо ефективним з таких причин: 1) здатність поглинання повітрям водяної пари обмежена і непостійна через залежність від пори року, температури та абсолютної вологості

атмосферного повітря; 2) вказаний метод характеризується підвищеним енергоспоживанням у зв'язку з наявністю безповоротних втрат явної (витрачається на підігрів припливного повітря) і прихованої теплоти (міститься у парі води, яка видаляється з повітрям, – з кожним 1 кг вологи втрачається 2,4 МДж). Головною перевагою методу є дешевизна лише в літній період. У світовій практиці відома робота [4], у якій досліджено зниження вологості повітря приміщень шлязового обладнання гребель шляхом його асиміляції із зовнішнім повітрям. У роботі [5] шляхом асиміляції повітря підземного пішоходного переходу із зовнішнім повітрям зроблено спробу знизити вологість повітряного простору підземного переходу.

Наступний метод адсорбції базується на сорбційних (вологопоглинаючих) властивостях сорбентів, які за рахунок пористо-капілярної структури поглинають водяну пару з повітря. З мірою насичення сорбенту вологою ефективність осушення зменшується, тому сорбент необхідно періодично регенерувати – випаровувати з нього вологу шляхом продування гарячого потоку повітря. Порівняно з методом асиміляції він є більш економічним, оскільки здійснюється нагрівання не всієї кількості вентиляційного повітря, а лише 25–30 % до значно більш високих температур (близько 150 °С). Недоліком методу є обмежений строк служби сорбенту [6].

Метод конденсації оснований на принципі конденсації водяної пари з повітря при його охолодженні нижче точки роси. Метод реалізується з використанням принципу теплового удару, який створюється при роботі холодильного контуру, з розташованими безпосередньо один за одним випарником і конденсатором. У конденсаційних осушувачів повітря з ростом температури повітря збільшується видалення вологи на 1 кВт споживаної енергії. Крім того, ефективність конденсаційних осушувачів різко спадає із зменшенням відносної вологості повітря. У роботі [7] проведено дослідження осушування повітря Тегеранського метрополітену із застосуванням методу конденсації. У роботі [8] проведено порівняння абсорбційного та конденсаційного методів осушування повітря і вказано, що їх ефективність залежить від рівнів температури і вологості.

Слід зазначити, що реалізація методів абсорбції та конденсації тунельного повітря для київського метрополітену вимагає додаткових грошових витрат на проведення підготовчих робіт, виконання проекту, встановлення дорогого технічного обладнання (на цей час є неможливим) та збільшення лімітів споживання електричної

енергії, установлених КП «Київтеплоенерго». Проте метод асиміляції може бути реалізований на базі існуючої вентиляційної системи без додаткових витрат.

Визначення мети та завдання дослідження. На основі аналізу експериментальних значень відносної та абсолютної вологостей зовнішнього і тунельного повітря, яке надходить зі станцій метрополітену в тунелі СЗГ, запропонувати і перевірити шлях зниження відносної вологості тунельного повітря СЗГ нижче нормованого значення 75 % упродовж літнього періоду.

Основна частина дослідження. Графіки роботи тунельної вентиляції всіх гілок КП «Київський метрополітен» поділено на зимовий і літній періоди. Літнім періодом вважається період, під час якого середньодобова температура атмосферного повітря протягом трьох діб дорівнює або вище +8 °С, для зимового періоду температура атмосферного повітря є нижчою +8 °С. Загалом графіки роботи тунельної вентиляції залежно від параметрів атмосферного повітря: температури та відносної вологості поєднують 8 режимів роботи вентиляційних шахт (2 літніх і 6 зимових). Ці режими роботи можна звести до трьох режимів ввімкнення вентиляційних установок (ВУ): приплив повітря в тунелі, видалення повітря з тунелів та режим, при якому ВУ вимкнена (табл. 1).

Починаючи з 2004 р. і до цього часу співробітники вимірювальної лабораторії електромеханічної служби (у 2018 р. сумісно з авторами статті) проводили експериментальні дослідження параметрів мікроклімату тунелів СЗГ з урахуванням «помпового» ефекту від руху потягів, відповідно до рекомендацій В. Я. Цодікова [2]. Під час вимірювань температури тунельного повітря та поверхні оправи стінок тунелів, відносної вологості та швидкості руху тунельного повітря використовувалися пірометр testo 835-T1 і термоанемометр testo 435-T1.

Таблиця 1

Режими роботи перегінних та станційних вентиляторів ліній КП «Київський метрополітен» (див. рис. 1,б) залежно від температури і відносної вологості атмосферного повітря

Номер ВУ	Місце встановлення	Тип вентилятора	Ввімкнення ВУ				Вимкнення ВУ	
			Приплив повітря		Видалення повітря		t, °C	φ, %
			t, °C	φ, %	t, °C	φ, %		
115	СЗГ-1	Zitron 18	Немає	Немає	$\bar{t} \geq +8$ $0 < \bar{t} < +8$ $-13 \leq t \leq 0$	$0 \leq \varphi \leq 100$ $\varphi < 90$ $\varphi < 90$	$\bar{t} < +8$ $t \leq -13,1$	$\varphi \geq 90$ $\varphi < 90$
229	СЗГ-2	Zitron 14	$0 < \bar{t} < +8$ $t < +8$ $-13 \leq t \leq 0$	$\varphi < 90$ $\varphi \geq 90$ $\varphi < 90$	$\bar{t} \geq +8$	$0 \leq \varphi \leq 100$	$t \leq -13,1$	$\varphi < 90$
230	Ст. м. Кловська	ВОМД-24	$\bar{t} \geq +8$	$0 \leq \varphi \leq 100$	$0 < \bar{t} < +8$ $-5 < t < 0$	$\varphi < 90$ $\varphi < 90$	$t < +8$ $t \leq -5,1$	$\varphi \geq 90$ $\varphi < 90$
116	Ст. м. Майдан Незалежності	ВОМД-24	$\bar{t} \geq +8$	$0 \leq \varphi \leq 100$	$0 < \bar{t} < +8$ $t < +8$ $-5 < t < 0$	$\varphi < 90$ $\varphi \geq 90$ $\varphi < 90$	$t \leq -5,1$	$\varphi < 90$
6	Ст. м. Хрещатик	Аксипал	$\bar{t} \geq +8$	$0 \leq \varphi \leq 100$	$0 < \bar{t} < +8$ $t < +8$	$\varphi < 90$ $\varphi \geq 90$	$t \leq 0$	$\varphi < 90$

Примітка: t – середньодобове значення температури для поточної доби; \bar{t} – середньодобове значення температури протягом 3 діб.

З аналізу експериментальних значень відносної вологості тунельного повітря СЗГ-1 за період з 27.09.2017 р. по 26.12.2018 р. видно, що при діючих режимах роботи вентиляторів є перевищення нормованого значення відносної вологості 75 % з досяганням 100 % в окремі моменти часу: 18.12.2017 р., 26.04.2018 р., 01.06.2018–15.08.2018 р., від пікету (ПК) 07+40 до ПК 18+23 (рис. 1, б і 2). Результати аналізу експериментальних значень відносної вологості тунельного повітря

СЗГ-2 в цей же період за тих же умов роботи вентиляторів теж свідчать про перевищення 75 % відносної вологості з досяганням 100 % в окремі моменти часу: 27.09.2017 р., 26.04.2018 р., 14.06.2018–15.08.2018 р., від ПК 05+09 до ПК 00+57 (рис. 1,б і 3). Відносна вологість станційного повітря ст. м. Хрещатик, Майдан Незалежності і Кловська впродовж повного календарного року відповідає нормативним вимогам [9], за винятком дат, у які проводяться технічні або регламентні роботи.

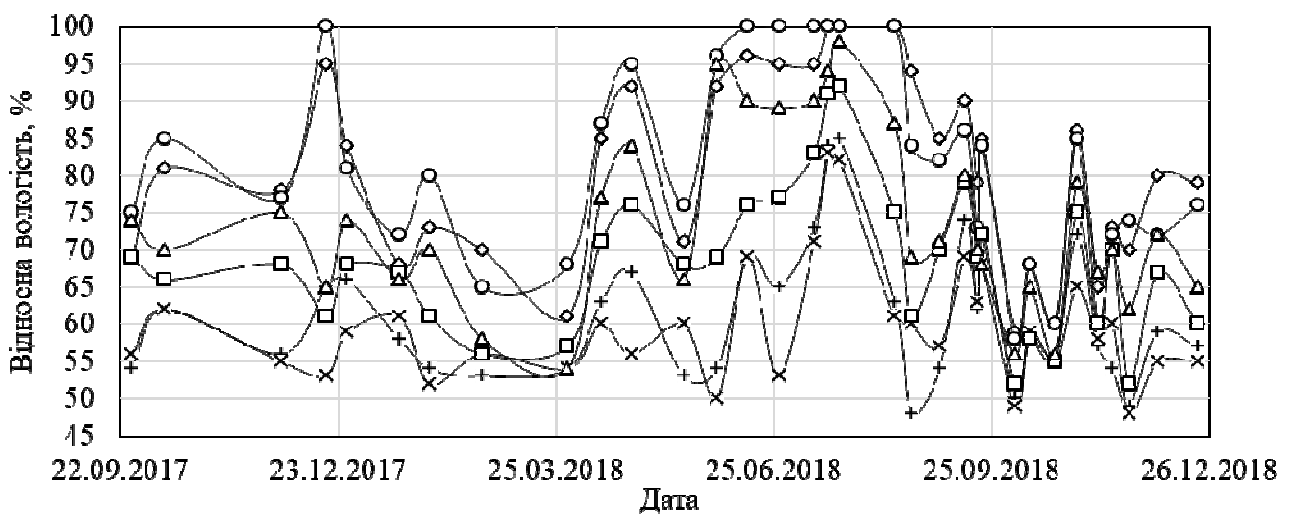


Рис. 2. Зміна відносної вологості тунельного повітря впродовж періоду з 22.09.2017 по 26.12.2018 рр. для СЗГ-1: - + - - ст. м. Хрещатик; -◇- - ПК 07+40 (740 м); -○- - ПК 11+52 (1152 м); -△- - ПК 16+58 (1658 м); -□- - ПК 18+23 (1823 м); - × - - ст. м. Майдан Незалежності

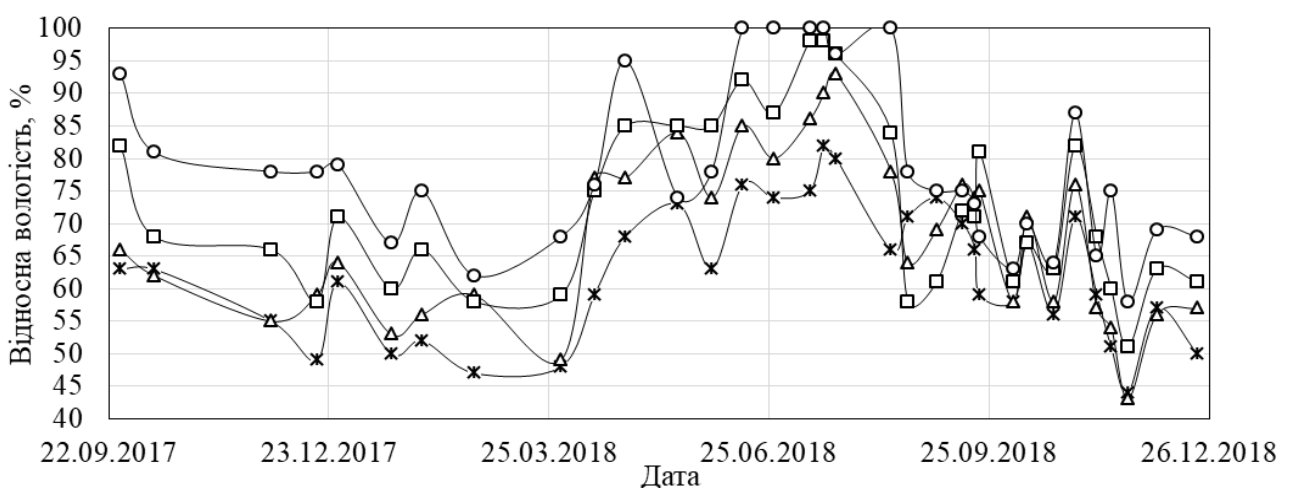


Рис. 3. Зміна відносної вологості тунельного повітря впродовж періоду з 22.09.2017 по 26.12.2018 для СЗГ-2: - ж - - ст. м. Кловська; -○- - ПК 00+57 (57 м); -□- - ПК 05+09 (509 м); -△- - ПК 08+15 (815 м)

З рис. 2 і 3 можна зробити висновок, що реалізація діючих режимів роботи ВУ відповідно до графіків роботи тунельної вентиляції не забезпечує дотримання в тунелях нормованого значення відносної вологості повітря 75 % упродовж літнього періоду з квітня по серпень 2018 р. Основною причиною високої вологості тунелів СЗГ в літній період, як свідчать експериментальні дані, є те, що тунельне повітря від станцій метрополітену в середньому має більшу на 2 г/кг абсолютну вологість порівняно з повітрям, що нагнітається з вентиляційних тунелів у тунелі СЗГ.

Вологість тунельного повітря залежить від вологості зовнішнього повітря, оскільки воно нагнітається в тунелі системою вентиляції без попередньої обробки. Тому необхідно з'ясувати, як буде змінюватися відносна вологість зовнішнього повітря, що нагнітається системою вентиляції в тунелі СЗГ, за умови

сталості абсолютної вологості (у вентиляційних шахтах і тунелях немає додаткових джерел вологи) але за умови, що температура зовнішнього повітря буде зменшуватися за рахунок теплообміну маси повітря й оправи стінки вентиляційних шахт та тунелів (включаючи шар ґрунту навколо них), у результаті чого досягне температури тунельного повітря – консервативний підхід.

Вихідні дані за параметрами атмосферного повітря (температура і відносна вологість) навколишнього середовища (НС), отримані від об'єднаної гідрометеорологічної станції за 2015–2017 рр., були осереднені протягом повного календарного року таким чином, щоб значення параметрів на початку та вкінці року були однакові (рис. 4). Осереднення даних проведено з огляду на те, що параметри атмосферного повітря мають такі тенденції зміни, які повторюються з року в рік.

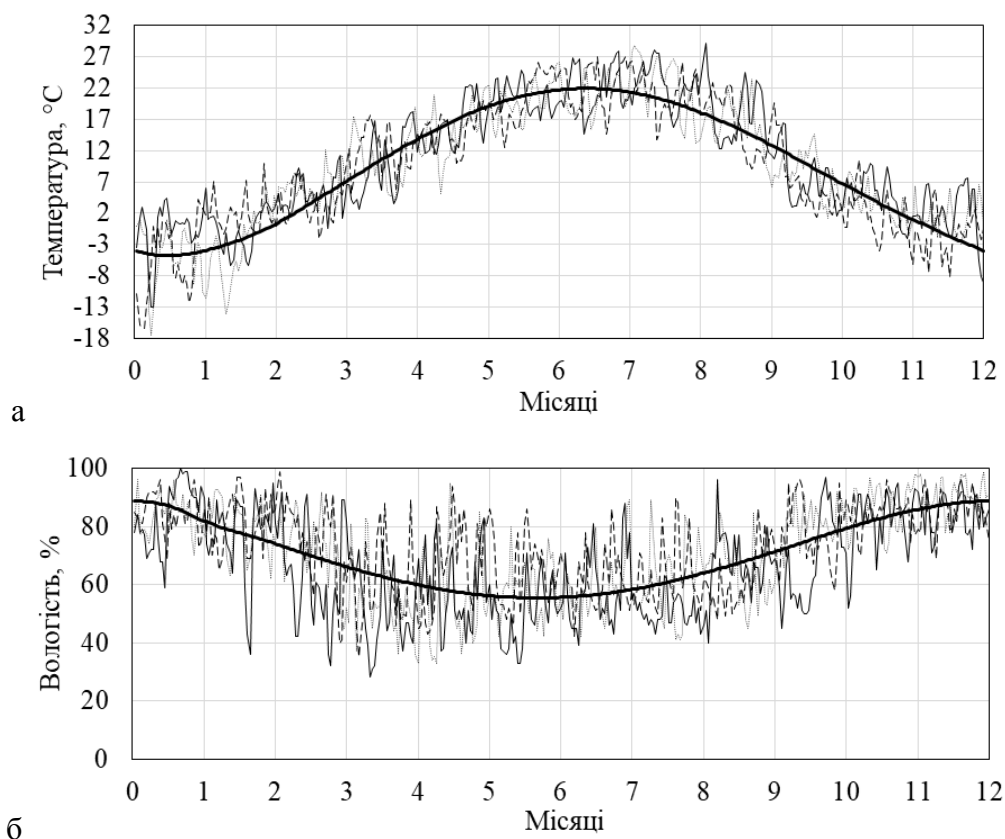


Рис 4. Середні залежності параметрів упродовж повного календарного року:
а – температура НС; б – відносна вологість НС; — — узагальнююча залежність;
— — 2015 р.; --- 2016 р.; 2017 р.

Визначення абсолютної вологості атмосферного повітря виконано за осередненими параметрами атмосферного повітря за формулою $\rho = \varphi \cdot \rho_{\text{нас}}$, де φ – поточне значення відносної вологості атмосферного повітря; $\rho_{\text{нас}}$ – значення

насиченої абсолютної вологості. Таким чином, результуючі значення абсолютної вологості атмосферного повітря, які відповідають осередненим значенням температури та відносної вологості, наведені на рис. 5.

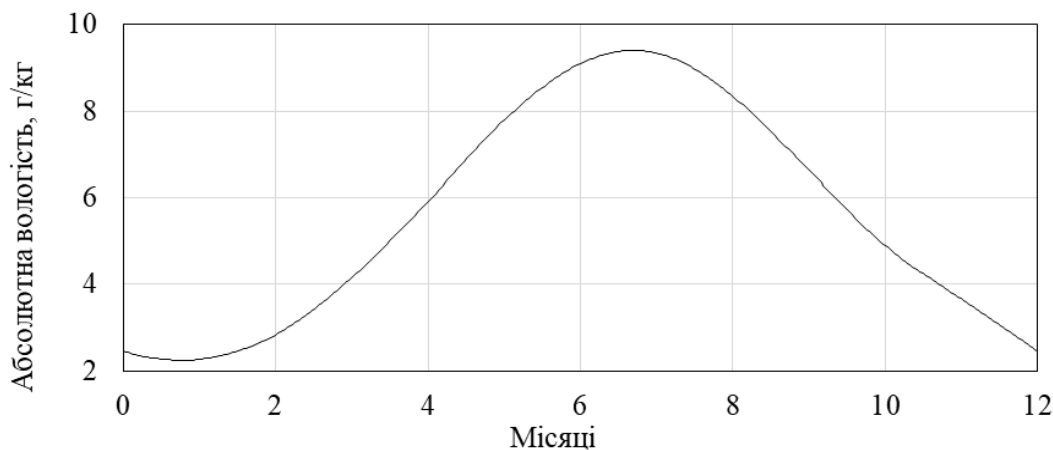


Рис. 5. Залежність абсолютної вологості повітря навколишнього середовища за осередненими значеннями температури та відносної вологості протягом року

Для найгірших умов, можливих у тунелях СЗГ, визначених на основі накопичених експериментальних даних, за відомими середньомісячними значеннями абсолютної вологості зовнішнього повітря

та найнижчою температурою тунельного повітря СЗГ 12 °С визначено за консервативним підходом відповідну відносну вологість тунельного повітря, яку подано на рис. 6.

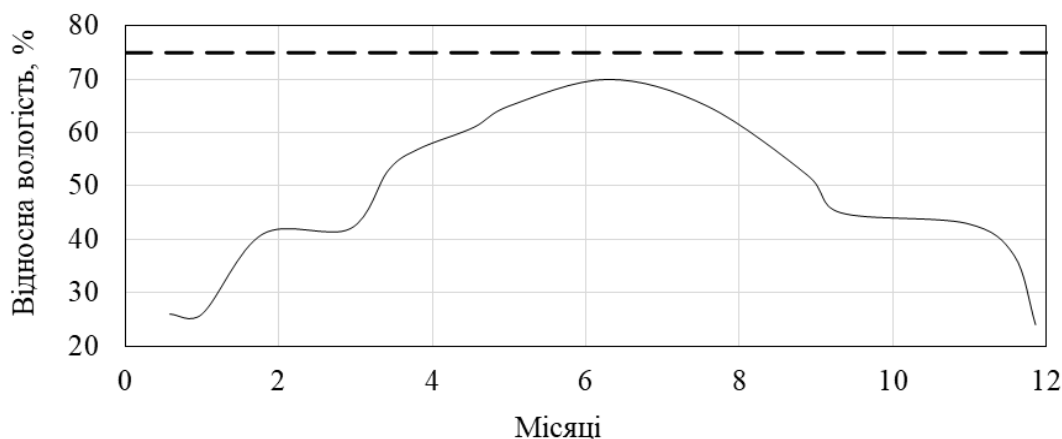


Рис. 6. Залежність середньомісячної відносної вологості повітря НС при температурі тунельного повітря впродовж року: — — нормоване значення 75 %; — — повітря навколишнього середовища за найнижчою температурою тунельного повітря 12 °С

З рис. 6 можна зробити висновок, що слід здійснювати осушення тунельного повітря шляхом асиміляції зі свіжим повітрям при безпосередньому нагнітанні його в ділянки з відносною вологістю вище 75 % (СЗГ-1: від ПК 07+40 до ПК 16+58 та СЗГ-2: від ПК 00 до ПК 05+09) існуючими

вентиляційними установками впродовж літнього періоду. На основі отриманих результатів електромеханічній службі КП «Київський метрополітен» було рекомендовано режими роботи тунельної вентиляції СЗГ, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Рекомендація (сірий колір рядків) з організації режимів роботи тунельної вентиляції СЗГ для літнього періоду порівняно з чинними від 30.12.2016 р. графіками (білий колір рядків)

Місце розташування	Режими роботи вент/шахт залежно від температури та відносної вологості атмосферного повітря	
	I	II
Кловська	П	П
Кловська	В	В
Перегін	В	В
Перегін	П	П
Перегін	В	В
Перегін	П	П
МН	П	П
МН	В	В
Хрещатик	П	П
Хрещатик	В	В

Примітка. Умови переключення ВУ ті ж самі (див. табл. 1).

Апробація рекомендованого режиму роботи тунельної вентиляції була проведена 15 серпня 2018 р. Як видно з експериментальних даних відносної вологості тунельного повітря (рис. 2 і 3) після 15 серпня до кінця жовтня 2018 р. спостерігається різке зниження вологості від 100 % до рівня нижче нормованого значення, після чого робота тунельної вентиляції була переведена у режим видалення повітря із СЗГ. До того ж на кінець терміну нагнітання повітря з навколишнього середовища в тунелі відбулося вирівнювання параметрів мікроклімату по довжині тунелів СЗГ. Таким чином, експериментально було підтверджено дієвість запропонованого шляху щодо зниження вологості

тунельного повітря СЗГ за рахунок асиміляції із зовнішнім повітрям.

Експериментальний метод дослідження дає змогу отримати необхідну інформацію про об'єкт дослідження з точністю, обумовленою використовуваними для цього приладами. Проте недоліками експериментального методу дослідження є його висока вартість (прилади і обладнання для вимірювання, тривалість періоду вимірювання, проведення підготовчих робіт) та обмеженість прогнозування. Тому задачею подальших досліджень із застосуванням експериментально-розрахункового методу та комп'ютерного моделювання є вивчення питань: 1) необхідної кратності повітрообміну тунелів СЗГ з дотриманням нормованого значення відносної вологості

тунельного повітря впродовж повного календарного року; 2) забезпечення нормованого значення відносної вологості тунельного повітря СЗГ при нижчих коефіцієнтах завантаження вентиляційного обладнання (аж до повної зупинки однієї з ВУ) порівняно з коефіцієнтами завантаження вентиляційного обладнання, які встановлені на цей час, з метою економії електроенергії.

Висновки:

1. При реалізації діючих режимів роботи вентиляційних установок відповідно до графіків роботи тунельної вентиляції службових з'єднувальних гілок КП «Київський метрополітен» з квітня по серпень 2018 р. здійснювалося нагнітання повітря в тунелі від станцій, при цьому відносна вологість тунельного повітря перевищувала допустиме значення 75 %.

2. Для зниження відносної вологості тунельного повітря СЗГ запропоновано нагнітання повітря з навколишнього середовища в тунелі, а не від станцій метрополітену, оскільки тунельне повітря від станцій метрополітену має в

середньому на 2 г/кг більшу абсолютну вологість.

3. Проведено аналіз зміни середньомісячного значення відносної вологості повітря з квітня по серпень при нагнітання повітря з навколишнього середовища в тунелі і встановлено, що відносна вологість тунельного повітря СЗГ не перевищуватиме допустимого значення 75 %.

4. У діючих графіках роботи тунельної вентиляції гілок КП «Київський метрополітен» упродовж літнього періоду рекомендовано змінити режими роботи ВУ таким чином, щоб нагнітання навколишнього повітря в тунелі СЗГ відбувалося ВУ115 та ВУ229, а видалення повітря з тунелів здійснювалося станційними вентиляторами. Проведена апробація рекомендованих режимів роботи ВУ привела до зниження вологості тунельного повітря в межах від 50 до 75 %.

Вдячність. Автори статті вдячні КП «Київський метрополітен» за фінансову підтримку цієї роботи і можливість проведення відповідних експериментальних досліджень.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени. Чинний від 01.10.2011. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 299 с.
2. Цодиков В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Недра, 1975. 560 с.
3. Богословский В. Н., Пирумов А. И., Посохин В. Н. Внутренние санитарно-технические устройства: справочник проектировщика. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Стройиздат, 1992. 319 с. : ил. (В 3 ч. Ч.3. Вентиляция и кондиционирование воздуха).
4. Россовский В. Г. Электромеханические устройства метрополитена. Москва: Имперіум Пресс, 2004. 608 с.
5. YU, Yan Shun. Development and Validation of Mathematical Model for Tailrace Tunnel Ventilating Process in Hydropower. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications. 2011. Vol. 71-78. p. 4069-4073.
6. Li X. 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. Голдаев С. В. Моделирование процесса осушения воздуха слоем силикагеля, используемого при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС. *Научный вестник НГТУ*. 2014. № 2, т. 55. С. 166-175.

8. Abbaspour M. Thermal comfort evaluation in Tehran metro using Relative Warmth Index. *International Journal of Environmental Science & Technology*. 2008. Vol. 5, Is.3. P. 297-304.

9. Хмельнюк М. Г. Современные технологии осушения воздуха. *Холодильна техніка і технологія*. 2004. № 3, т. 149. С. 15-21.

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.

Круковський Павло Григорович, д-р техн. наук, професор, 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.

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.

Федотов Михайло Миколайович, начальник вимірювальної лабораторії електромеханічної служби КП «Київський метрополітен». Тел.: (044) 238-48-10. E-mail: m.fedotov@metro.kiev.ua.

Тадля Ольга Юліївна, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, 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: olgatad@gmail.com.

Deineko Andrii Ivanovich, Senior Research, Laboratory of Heat and Mass Transfer Modeling for Energy Objects and Thermal Technologies, Department of High-Temperature Thermogasdynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: andriideineko@gmail.com.

Krukovskyi Pavlo Grihorovich, chief scientist, Head of the Laboratory of Heat and Mass Transfer Modeling for Energy Objects and Thermal Technologies, Department of High-Temperature Thermogasdynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel: (044) 456-92-81. E-mail: kruk_2@ukr.net.

Skliarenko Dmytro Igorovich, Junior Researcher, Laboratory of Heat and Mass Transfer Modeling for Energy Objects and Thermal Technologies, Department of High-Temperature Thermogasdynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: cklyr90@bigmir.net.

Fedotov Mihaylo Mikolayovich, Head of the measuring laboratory of the electromechanical service of KP "Kyiv Metro". Tel.: (044) 238-48-10. E-mail: m.fedotov@metro.kiev.ua.

Tadlia Olga Yuliyivna, senior research, laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogasdynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: olgatad@gmail.com.

Статтю прийнято 04.03.2019 р.