

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 697.92: 697.95

**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ОСУШЕННЯ ТУНЕЛЬНОГО ПОВІТРЯ
МЕТРОПОЛІТЕНУ ПРИ РОЗТАШУВАННІ ОБЛАДНАННЯ В ОБВІДНИХ ХОДКАХ**

Д-р техн. наук П. Г. Круковський, старш. наук. співроб. А. І. Дейнеко,
мол. наук. співроб. Є. В. Дядюшко

**ANALYSIS OF EFFICIENCY OF METHODS DRYING OF THE METRO POLYETH AIR
WITH THE EQUIPMENT IN THE BYPASS WAY**

D. Sc. (Tech.) P. G. Krukowsky, Senior Research A. I. Deineko,
Junior Researcher Ye. V. Diadushko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213923>

***Анотація.** Дана стаття є продовженням трьох попередніх статей [1-3], присвячених вибору та обґрунтуванню методу зниження вологості тунельного повітря службових з'єднувальних гілок (СЗГ) глибокого залягання КП «Київський метрополітен» з довжиною 1400 м шляхом вибору оптимального режиму роботи вентиляційних установок на нагнітання з навколишнього середовища в тунелі в теплу пору року більш сухого повітря, ніж від станцій. В 2018 р. цей метод дав позитивний результат, однак в 2019 р., коли стінки тунелю були взимку переохолоджені, такого підходу стало недостатньо, тому постало завдання пошуку інших шляхів зниження вологості за допомогою розташування додаткового обладнання в обвідному ходку, який знаходиться приблизно на 1/3 найдовшої гілки СЗГ. В статті за допомогою моделювання тепловологого стану всієї СЗГ розглядаються три наступних способи: прискорення основного потоку за допомогою додаткового вентилятора, спеціального осушувального обладнання та додаткового вентилятора з підігрівом повітря. Показано, що останній спосіб є найбільш ефективний і економічно вигідний для додаткового осушення тунельного повітря.*

***Ключові слова:** метрополітен, підземний тунель глибокого залягання, обвідний ходок, вологість повітря, асиміляція, нагрівання, осушування.*

***Abstract.** Ensuring the normalized parameters of the microclimate of tunnel air of service connecting branches (SCB) of the deep underground utility company "Kiev Metro" with a length of 1400 m is a priority, through avoiding damage to the insulating materials of the contact flights, which can cause a short circuit. The location of ventilation equipment or drainage or heating installations in a single-track tunnel of the connecting branch is impossible due to limited space, therefore the only place where such equipment can be located is a bypass tunnel.*

With the optimized operation of the mechanical tunnel ventilation system in energy-saving modes, in 2019, for technical reasons, the soil layer around the tunnels was cooled, resulting in a decrease in the temperature of the tunnel air and an increase in relative humidity above the normal level, which sometimes reached 95 %.

The value of the relative humidity of the tunnel air in underground tunnels of deep underground utility company "Kiev Metro" depends on the temperature and absolute humidity of

the tunnel air, the temperature of the rim of the walls of the tunnels and the presence of possible additional sources of moisture in the tunnels.

The decrease in the relative humidity of the tunnel air during the implementation of the assimilation method by increasing the air exchange SCB-1 in the line to the station. m. Khreschatyk with a length of 1400 m due to the installation of an additional ventilation unit in the bypass tunnel (in the area of PK09 + 40) and means of directing the air flow into the tunnel can lead to an increase in the flow rate of tunnel air to 30 and 26 kg/s, respectively, while the relative humidity will decrease by 5 %. To implement this method, it is necessary to expend an electric power of 40 kW.

When implementing the method of drying tunnel air with an additional air drying machine located in the bypass tunnel, it is possible to reduce the relative humidity by (12...14) % and to ensure compliance with the standard humidity of 75 %. However, the implementation of this method is energy-intensive in comparison with the implementation of the assimilation method (increase in air exchange), since the necessary expenditure of electric power for drainage is about 212 kW.

According to the results of the study for utility company "Kiev Metro", a method of heating tunnel air with an additional heat gun installed in the bypass tunnel with a 40 kW heater based on electric heating elements is recommended, which will lead to heating of the tunnel air with a simultaneous decrease in relative humidity by (7...11) % warming the soil layer around the tunnel and avoiding its cooling in the future. The practical implementation of the method for heating tunnel air requires an electric power cost of about 60 kW.

Keywords: *underground, underground tunnel of deep occurrence, bypass tunnel, air humidity, assimilation, heating, drainage.*

Вступ. Поетапне будівництво київського метрополітену розпочалося з 1949 року та триває дотепер. З початку будівництва метрополітену було запроектовано та введено в експлуатацію з 1970-х років службові з'єднувальні гілки (СЗГ) між лініями метрополітену, які в даний час використовуються виключно в службових цілях: підвезення будівельних матеріалів та вивезення сміття, планове проходження колієвимірального вагона по всіх лініях, рідше перегін вагонів з однієї робочої гілки на іншу тощо (рис. 1, а). Механічна система тунельної вентиляції СЗГ повинна забезпечувати вологість тунельного повітря не вище нормованого значення 75 % [4]. Проте в проекті венти-ляції СЗГ, який розроблено в 1950-х роках, на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» запроектовано вентиляційну шахту, яка не була побудована. Тому через слабкий повітрообмін (необхідна кратність 3, а фактично 2) при надходженні вологи в тунельне повітря від випаровування

протікань води через нещільності оправи стінок тунелів, калюж колійних лотоків, при митті тунелів, води при вологому прибиран-ні станцій, від пасажирів відбувається перевищення нормованого рівня вологості, що іноді досягає значень близько 95 %.

Внаслідок високої вологості тунельного повітря значно пришвидшуються процеси руйнування оправи стінок тунелів, корозії дорогого обладнання системи електропостачання, розміщеного в СЗГ, погіршення електричних властивостей ізоляційних матеріалів контактної рейки, що у свою чергу призводить до зростання грошових витрат з бюджету метрополітену на ремонти та 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.

Розміщення вентиляційного обладнання або осушувальних чи

нагрівальних установок у одноколіїному тунелі з'єднувальної гілки неможливе через обмежений простір, тому єдиним місцем, де таке обладнання може бути встановлене, є тунель обвідного ходка (рис. 1, б). Крім того, осушування або нагрівання тунельного повітря окремих ділянок

тунелю СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» локально встановленими осушувачами чи нагрівачами не розглядається, оскільки необхідно осушувати тунель по всій довжині, тому що контактна рейка прокладена по всій довжині тунелю.

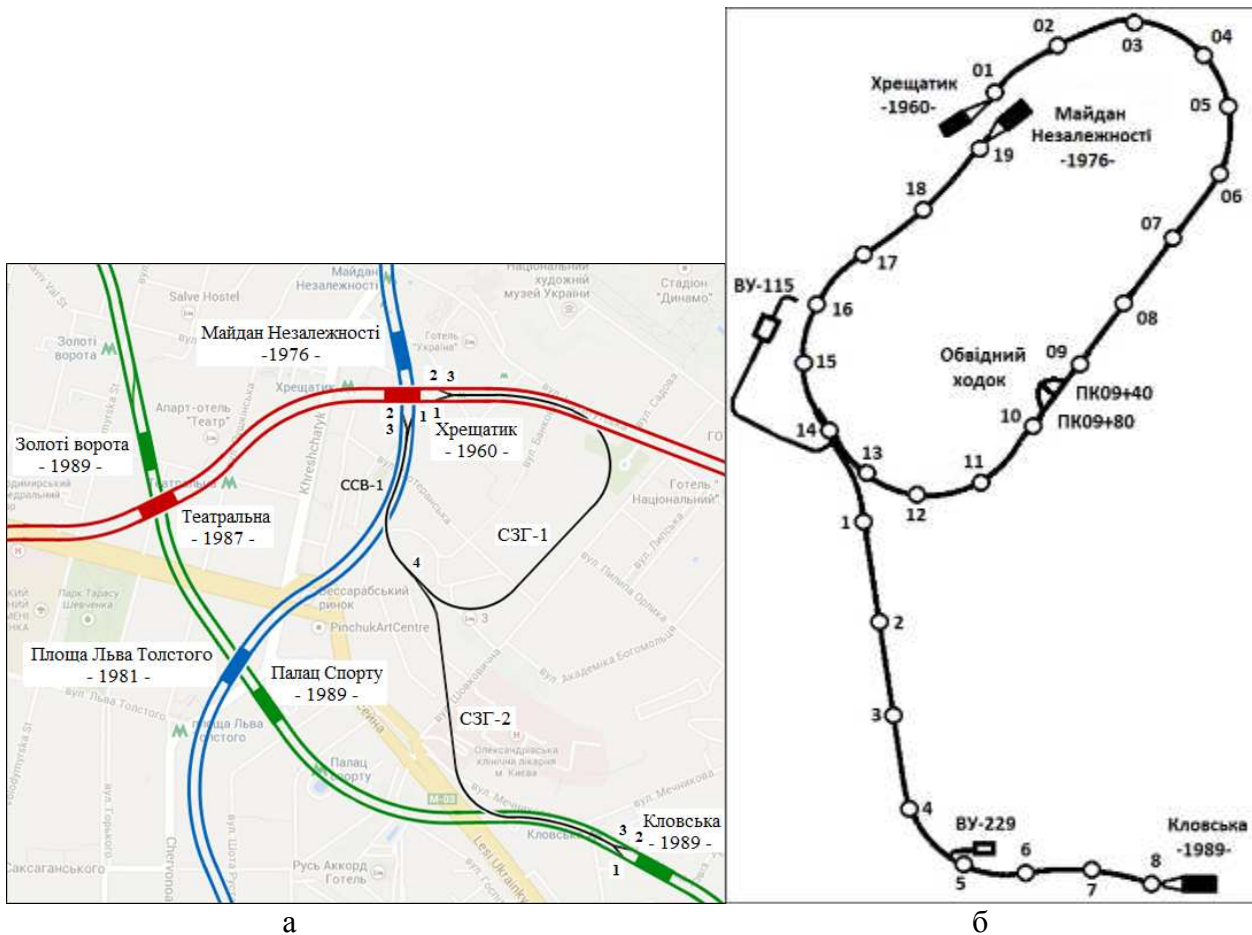


Рис. 1. Схема СЗГ метрополітену: а – схематичне розташування СЗГ між станціями метрополітену: 1-4 – номери стрілок колій; «Хрещатик» - 1960 - – назва станції метрополітену та рік побудови відповідно; б – розмітка пікетів СЗГ: 01-19 – номери пікетів СЗГ-1; 1-8 – номери пікетів СЗГ-2

Тому на даний час для КП «Київський метрополітен» гострою проблемою є забезпечення неперевикнення нормованого значення вологості тунельного повітря СЗГ-1 на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою зниження відносної

вологості в тунелях можна застосовувати такі фізичні методи: провітрювання вологих тунелів повітрям з меншою абсолютною вологістю, збільшення кратності повітрообміну повітрям з меншою вологістю, видалення частини вологи з повітря методами адсорбції і конденсації, підвищення температури

тунельного повітря шляхом нагрівання (при цьому відбуватиметься відповідне зниження відносної вологості повітря).

Метод зниження відносної вологості тунельного повітря шляхом провітрювання вологих тунелів повітрям з меншою абсолютною вологістю в КП «Київський метрополітен» реалізований наступним чином. В період літнього режиму роботи тунельної вентиляції повітря з навколишнього середовища через вентиляційну шахту ВШ 115 і вентиляційні тунелі (ВТ) вентиляційними установками ВУ115 нагнітається в СЗГ (рис. 1, б), при цьому, протікаючи через ВШ та ВТ, повітряний потік втрачає вологу внаслідок дії відцентрових сил. Таким чином «підсушене» повітря від роз'їзду надходить у ділянки СЗГ, де спочатку відбувається змішування вологого тунельного повітряного потоку з припливним повітрям, що має нижчу абсолютну вологість, внаслідок чого починає зменшуватися відносна вологість. При вентиляції тунелів під кінець літнього періоду спостерігається практично повне висушування оправи стінок тунелів, колійних лотоків та калюж. Зниження відносної вологості тунельного повітря за рахунок вентиляції вологих тунелів КП «Київський метрополітен» повітрям з меншою абсолютною вологістю детально викладено в статтях [1-3]. Головною перевагою методу є дешевизна, оскільки енергія витрачається лише на роботу вентиляційних агрегатів. Недоліками є обмежена здатність поглинання повітрям водяної пари та залежність від температури і абсолютної вологості атмосферного повітря для літнього періоду. Проте, з огляду на дешевизну даного методу, його застосовують для зниження відносної вологості тунелів в метрополітенах [5, 6].

Метод зниження вологості тунельного повітря шляхом його нагрівання в метрополітенах реалізований в принципі реверсивності механічної системи тунельної вентиляції і застосовується лише в літній період [7]. Принцип реверсивності

полягає в тому, що в літній період повітря з навколишнього середовища нагнітається на станції метрополітену і видаляється перегінними вентиляційними установками, а в зимовий період навпаки. В результаті чого здійснюється часткове прогрівання оправи стінок тунелів.

Метод адсорбції базується на сорбційних (вологопоглинальних) властивостях сорбентів, які за рахунок пористо-капілярної структури поглинають водяну пару з повітря. По мірі насичення сорбенту вологою ефективність осушення зменшується, тому сорбент необхідно періодично регенерувати – випаровувати з нього вологу шляхом продування гарячого потоку повітря. У порівнянні з методом нагрівання є більш економічним, оскільки здійснюється нагрівання не всієї кількості вентиляційного повітря, а лише 25-30 % до значно більш високих температур (порядку 150 °С). До недоліків методу відноситься обмежений строк служби сорбенту [8]. Відома робота [9], у якій досліджується можливість використання сорбентів для осушування повітря в метрополітенах.

Метод конденсації оснований на принципі конденсації водяної пари з повітря при охолодженні його 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. При цьому ефективність конденсаційних осушувачів різко спадає із зменшенням відносної вологості повітря [10]. Останнім часом метод видалення вологи з тунельного повітря шляхом конденсації дуже широко застосовується в метрополітенах різних країн світу в поєднанні з енергозберігаючими технологіями [10, 11].

Визначення мети та завдання дослідження. Аналіз шляхів зниження вологості тунельного повітря в підземному тунелі глибокого залягання КП «Київський метрополітен» СЗГ-1 на ділянці від роз'їзду

до ст. м. «Хрещатик» для літнього періоду, обґрунтування і вибір для практичної реалізації шляху з меншою витратою електричної енергії при його експлуатації.

Основна частина досліджень

Геометрична, фізична та математична моделі детально описані в роботі [3]. Розрахунки проведені в програмі Ansys Fluent.

Зниження відносної вологості тунельного повітря за рахунок збільшення кратності вентиляції тунелів повітрям з меншою абсолютною вологістю. Автори раніше в роботах [1-3] розглядали спосіб зниження вологості тунельного повітря для СЗГ-1 і СЗГ-2 шляхом асиміляції тунельного повітря з припливним повітрям (навколишнього середовища), внаслідок чого було розроблено і впроваджено графік роботи механічної системи тунельної вентиляції. Проте, впродовж 2019 року на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» вологість тунельного повітря іноді перевищувала 75 % та досягала значення 95 % з технічних причин в роботі системи вентиляції. Аналіз експериментальних значень параметрів мікроклімату СЗГ (температури повітря і оправи стінок тунелів та абсолютної та відносної вологостей) показав, що внаслідок ремонту вентиляційних агрегатів на перегоні між станціями «Хрещатик» та «Арсенальна» після зимового періоду 2019 року сталося зниження температури тунельного повітря та заохолодження оправи стінок тунелів, в результаті чого відбулося підвищення відносної вологості. Таким чином, при зниженні відносної вологості тунельного повітря способом асиміляції маємо лише один параметр, яким можемо керувати існуючою системою вентиляції – витрата повітря. Оскільки витрата тунельного повітря на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» діючою вентиляцією забезпечується максимально 21 кг/с (кратність повітрообміну 2), тому фахівці КП «Київський метрополітен» запропону-

вали розглянути варіант збільшення витрати тунельного повітря за рахунок додатково встановленого вентиляційного агрегату по-тужністю 40 кВт в обвідному ходку (рис. 1, б).

На розгляд запропоновано два варіанти. Варіант № 1 – встановлення додаткового вентиляційного агрегату в обвідному ходку (в зоні пікету ПК09+40) та нагнітання і направлення повітряного потоку за допомогою перегородок з обвідного ходка в тунель під кутом 45 ° до основного потоку тунельного повітря в напрямку ст. м. «Хрещатик» (рис. 2, а, б).

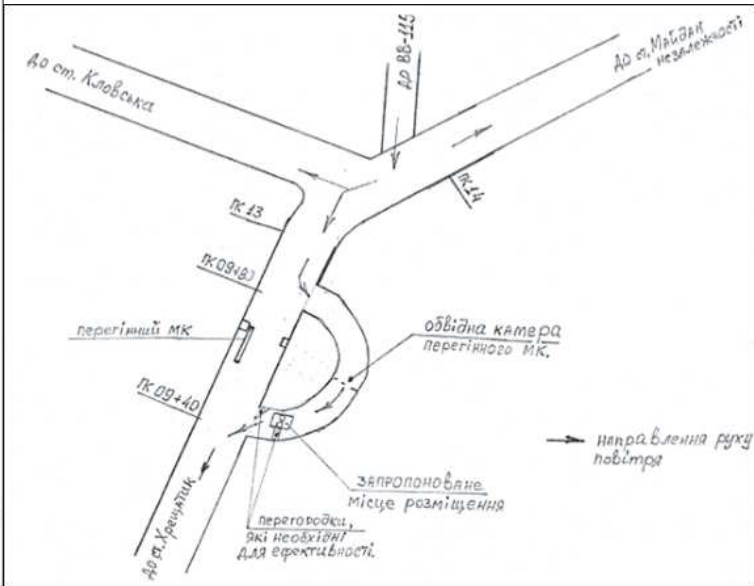
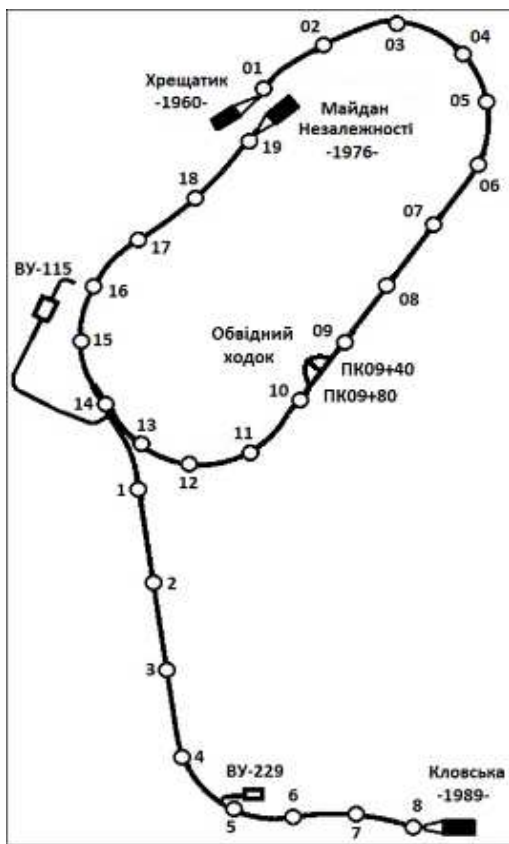
Варіант № 2 – встановлення додаткового вентиляційного агрегату в обвідному ходку (в зоні пікету ПК09+40) та нагнітання і направлення повітряного потоку за допомогою повітропроводу перерізом 0,48 м² (600x800 мм) і довжиною 1 м вздовж стінки тунелю паралельно основному потоку (рис. 2, б, в) в напрямку ст. м. «Хрещатик».

Таким чином, ідея обох варіантів полягає у використанні ежекційного ефекту – збільшенні витрати і швидкості руху основного тунельного повітря на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» шляхом встановлення в обвідному ходку додаткового вентиляційного агрегату, який в зоні пікету ПК09+80 відбирає частину основного потоку, прискорює його і нагнітає в основний потік в зоні пікету ПК09+40 за допомогою перегородок під кутом до напрямку руху основного потоку або через повітропровід вздовж стінки тунелю паралельно напрямку руху основного потоку до ст. м. «Хрещатик».

В тривимірній газодинамічній моделі ділянки СЗГ-1 враховувалися напірно-витратні характеристики існуючих та додаткового (в обвідному ходку) вентиляційних агрегатів та їх варіанти включення в роботу для літнього періоду. Моделювання проведено при режимі нагнітання зовнішнього повітря в СЗГ для дати 11.07.2019 р., коли витрата повітря

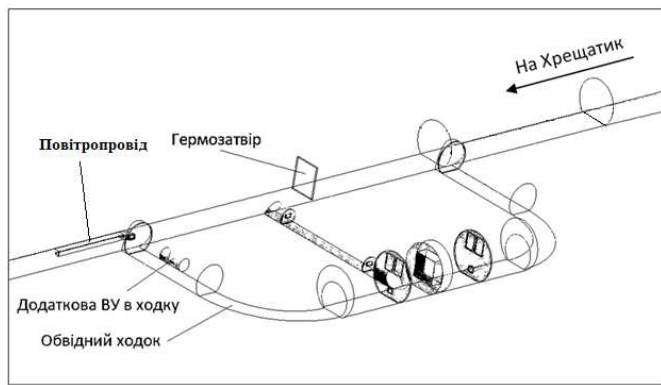
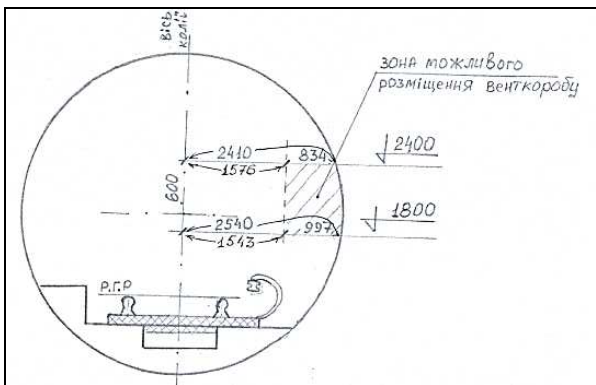
становила в середньому 21 кг/с, що обумовлено гідравлічним опором мережі тунелів СЗГ. За результатами моделювання були визначені поля швидкостей та тисків тунельного повітря ділянки СЗГ-1 для обох варіантів (рис. 3). Як видно з рис. 3, а і б, плин потоку повітря, що витікає під кутом з ходка в тунель, має характерну особливість, вона ударяється в протилежну стінку, внаслідок чого в тунелі виникають вихрові зони, які створюють додатковий

опір руху тунельному повітрю. Якщо змінити кут спрямування повітряного потоку з 45° на 30°, то вихрова зона і опір руху тунельному повітрю зменшаться та відповідно зросте витрата повітря в тунелі (рис. 4). Розташування вентиляційного агрегату в обвідному ходку так, щоб кут спрямування повітряного потоку в тунель становив 30° або 45°, є технічним завданням для фахівців КП «Київський метрополітен».



а

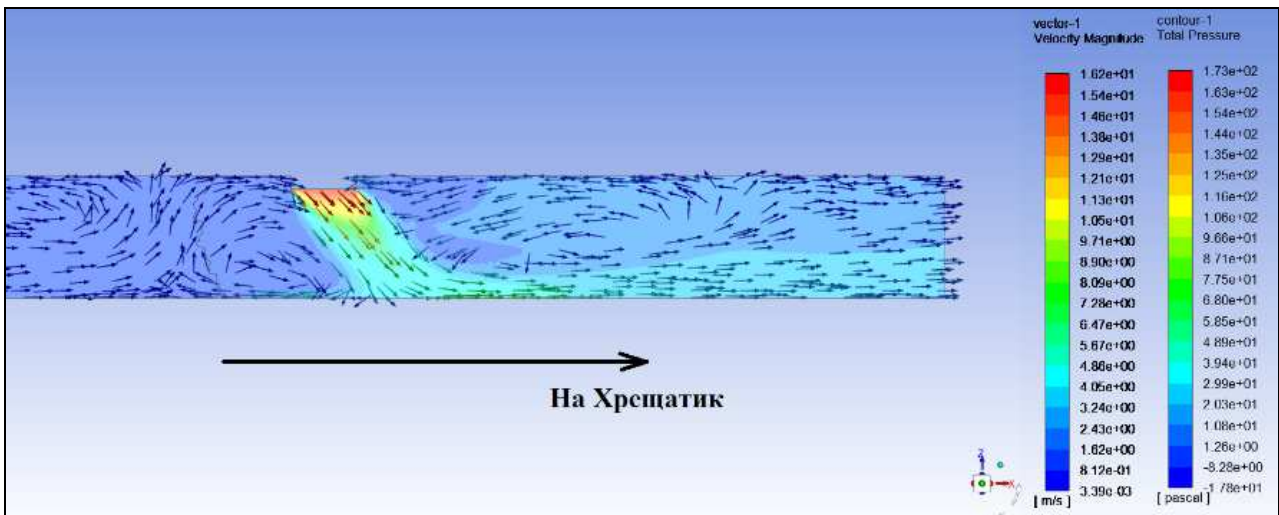
б



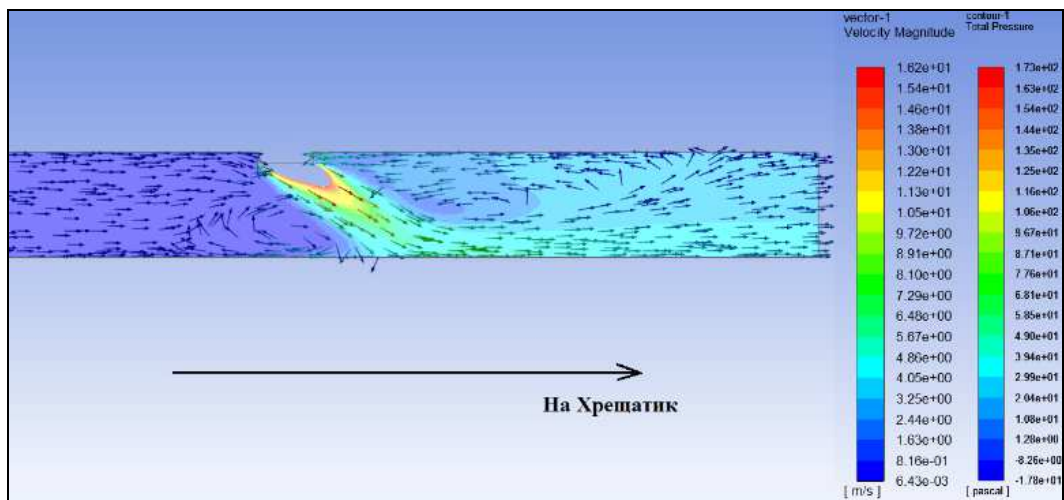
В

Г

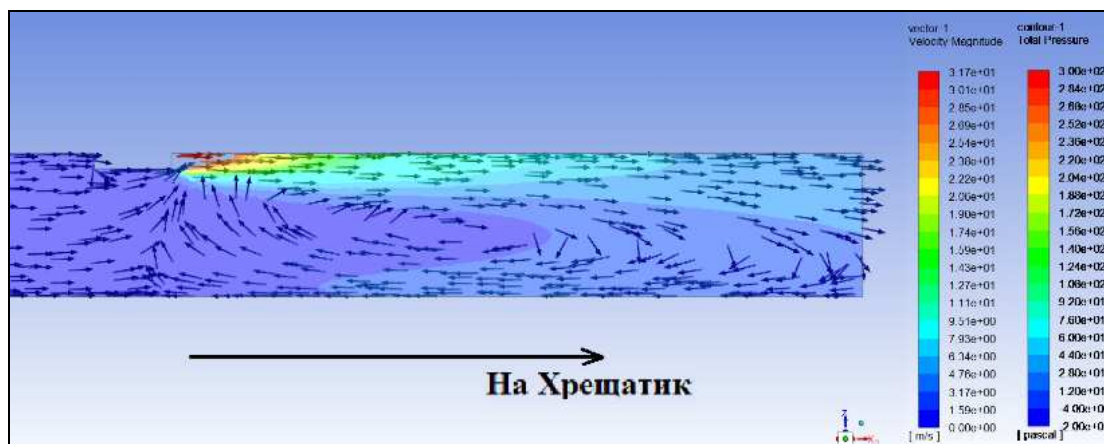
Рис. 2. Загальна схема СЗГ (а), ескіз обвідного ходка № 2 КП «Київський метрополітен» (б), розташування повітропроводу (венткоробу) в поперечному перерізі тунелю (в) (ескіз №1 КП «Київський метрополітен») і тривимірна геометрична модель обвідного ходка ІТТФ (г)



а



б



В

Рис. 3. Розподіли полів швидкості і тисків у поздовжньому перерізі тунелю для підваріантів напрямків повітряного потоку на виході обвідного ходка під кутом 45 ° (а) і 30 ° (б) до основного потоку та варіанта використання повітропроводу вдовж тунелю (в)

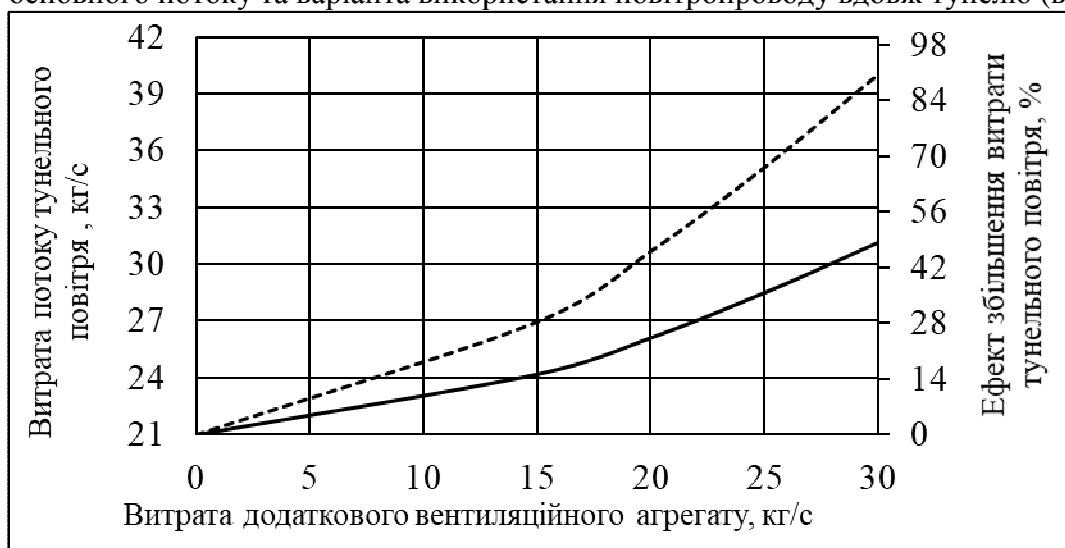


Рис. 4. Залежність витрати потоку тунельного повітря на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» від витрати вентиляційного агрегату при різних кутах виходу потоку повітря з обвідного ходка: — - 45 °; --- 30 °

При дослідженні збільшення кратності вентиляції за варіантом 2 з'ясовано, що потік повітря з повітропроводу при виході в тунель суттєво гальмується прилеглою оправою стінки тунелю, внаслідок чого в тунелі виникають вихрові зони, які зменшують витрату тунельного повітря (рис. 3, в). Тому встановлення додаткового вентиляційного агрегату в обвідному ходку

з повітропроводом може призвести до збільшення витрати тунельного потоку повітря теоретично майже у 2 рази (рис. 5), але при цьому швидкість повітря в повітропроводі може сягати до 40 м/с, що є неприйнятним через обмеження швидкості руху повітря в магістральних повітропроводах промислової вентиляції до 12 м/с [12].



Рис. 5. Залежність витрати потоку тунельного повітря на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» від витрати вентиляційного агрегату та швидкості повітря в повітропроводі

Моделювання тепловологісного режиму ділянки СЗГ-1 проведено також для дати 11.07.2019 року, коли було реалізовано режим нагнітання зовнішнього повітря ВУ115 в СЗГ, на вході в тунель на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» відносна вологість становила 71 %, на виході – 86 %, середня по тунелю – близько 81 % при витраті повітря 21 кг/с.

Збільшення витрати повітря на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» буде відбуватися під дією додаткового вентилятора і ежекційного ефекту за рахунок перерозподілу витрат повітря від роз'їзду до інших станцій СЗГ. Вплив збільшення витрати тунельного повітря на відносну вологість по ділянці СЗГ-1 показано на рис. 6.

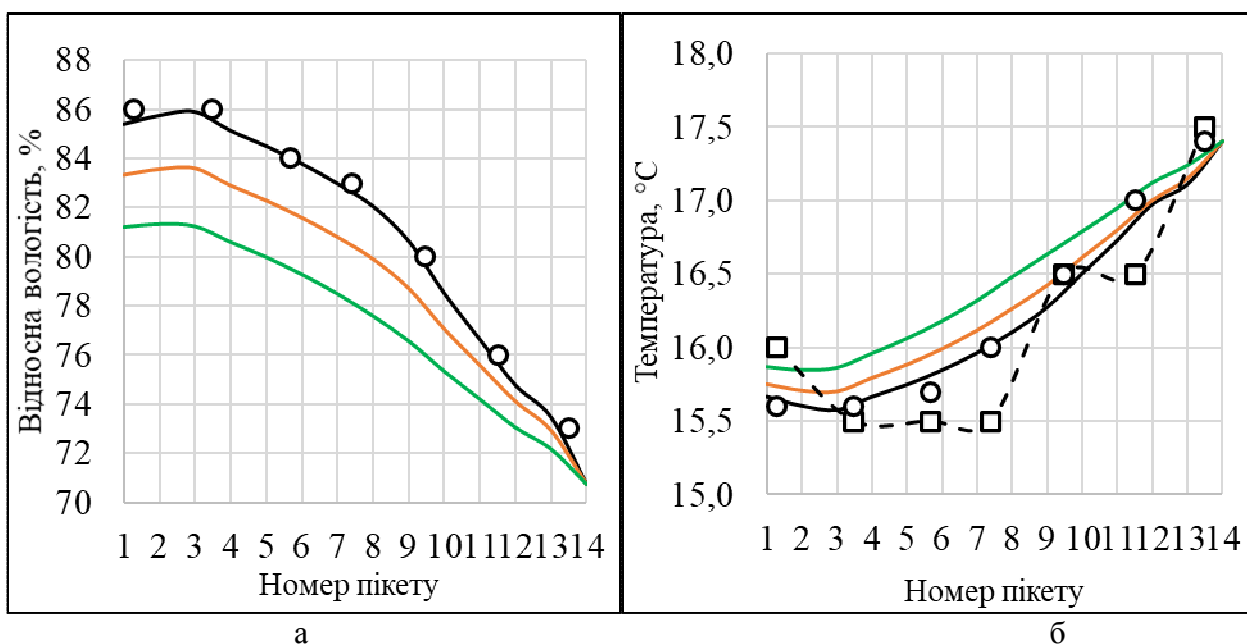


Рис. 6. Залежності по пікетах відносної вологості та температури тунельного повітря і оправи стінки тунелю на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» для дати 11.07.2019 при різних витратах тунельного повітря: — 20 кг/с; — 30 кг/с; — 40 кг/с; ○ - експериментальні значення; - - □ - - - температура оправи стінки тунелю

З рис. 6 видно, що навіть значне збільшення витрати потоку тунельного повітря від 21 до 40 кг/с на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» для обох варіантів призведе до зниження вологості повітря лише від 2,5 до 5 %.

Зниження відносної вологості тунельного повітря методом осушування. Суть даного шляху полягає в тому, що в тунелі обвідного ходка буде встановлена промислова машина для осушування повітря, в склад якої входить відцентровий вентилятор, хладоновий компресорно-конденсаторний блок, рекуператор теплової енергії. Розміщення осушувальної машини в тунелі обвідного ходка в порівнянні з розміщенням у вентиляційному тунелі біля вентиляційної установки 115 (рис. 1, б) має перевагу в тому, що осушування повітря можна організувати не лише в літній період, коли повітря рухається в напрямку до ст. м. «Хрещатик», а й в зимовий (рух у зворотному напрямі). Під час літнього періоду буде осушуватися частина СЗГ-1 від ПК09+40 до ст. м. «Хрещатик», а в зимовий осушуватиметься частина СЗГ-1 від ПК09+80 до роз'їзду та до вентиляційної шахти 115.

Основним завданням для моделювання є підбір витрати і напору відцентрового вентилятора та характеристики осушення тунельного повітря від вологи конденсаторним блоком. Методом підбору серед запропонованих на ринку України промислових осушувальних машин було вибрано машину з такими технічними характеристиками: витрата повітря 50 000 м³/год (або 11 кг/с), напір 500 Па та інтенсивність осушування повітря 3 г/кг. Тобто осушувальна машина в ходку осушувала і підігрівала від початкової температури близько 50 % витрати тунельного повітря, що надходило від роз'їзду, яке після ходка змішувалося з іншою частиною (50 %) необробленого тунельного повітря, при цьому загальна витрата тунельного повітря частини СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» зростала від 21 до 27 кг/с або підвищувалася на 28 % (рис. 5), що збільшує кратність вентиляції даної ділянки з 2 до 3.

Для дати 11.07.2019 р. з параметрами осушувальної машини за умови, що температура оправи стінок тунелів дорівнювала 15,3 °С (середнє значення температури у попередні роки від ПК01 до ПК09), було проведено моделювання зниження вологості тунельного повітря, результати якого наведені на рис. 7.

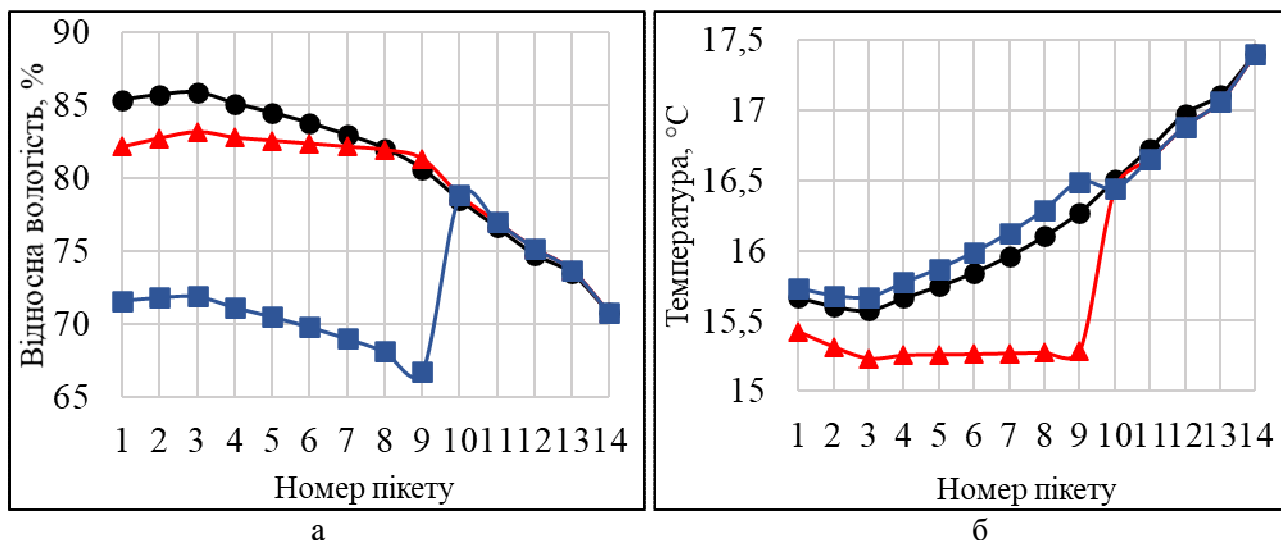


Рис. 7. Залежності зміни відносної вологості (а) та температури тунельного повітря (б) за довжиною СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» при осушуванні повітря: ● – експериментальні значення 11.07.2019; характеристики осушування повітря конденсатором: ▲ – 1 г/кг; ■ – 3 г/кг

З рис. 7 видно, що підібрана промислова осушувальна машина з характеристикою осушування повітря 1 г/кг майже призводить до слабкої зміни відносної вологості тунельного повітря лише в межах 3 %. При використанні осушувальної характеристики 3 г/кг зниження вологості відбудеться на 12-14 %.

Зниження відносної вологості тунельного повітря шляхом реалізації методу осушування має такі недоліки: необхідність використання дорогого обладнання (вартість осушувальної машини сягає близько 200 тис. євро станом на 31.01.2020) і відповідної коштовної амортизації, необхідність прокладання мережі трубопроводів і додаткового встановлення насоса для відведення конденсату, електрична потужність машини становить 212 кВт і неможливе її підключення через перевищення лімітів, встановлених КП «Київтеплоенерго».

З причини високої вартості та за погодженням з фахівцями КП «Київський метрополітен» шлях зниження відносної вологості повітря способом адсорбції не розглядався.

Зниження відносної вологості тунельного повітря способом нагрівання. Практично розглядається спосіб асиміляції з можливістю регулювання одного параметра – температури тунельного повітря. Суть даного шляху полягає в тому, що в тунелі обвідного ходка буде встановлена теплова гармата з загальною електричною потужністю 60 кВт (допустима для підключення електрична потужність) для підігрівання тунельного повітря (рис. 8). В склад теплової гармати входить відцентровий вентилятор потужністю 20 кВт (витрата близько 50000 м³/год, або 11 кг/с) та нагрівач повітря з потужністю 40 кВт на базі електричних ТЕНів. Розміщення теплової гармати в тунелі обвідного ходка в порівнянні з розміщенням у вентиляційному тунелі біля вентиляційної установки 115 (рис. 1) має перевагу в тому, що нагрівання повітря можна організувати не лише в літній період, коли повітря рухається в на-прямку до ст. м. «Хрещатик», а й в зимовий.



Рис. 8. Теплова гармата

Завданням для моделювання є визначення величини зниження відносної вологості тунельного повітря при заданих параметрах теплової гармати, а також розгляд ефекту від тривалого використання теплової гармати – при зростанні температури оправи стінок тунелів. Для дати 11.07.2019 р. з заданими параметрами теплової гармати було проведено моделювання зниження вологості тунельного повітря, результати якого наведені на рис. 9 і 10.

З рис. 9 і 10 видно, що від початку експлуатації теплової гармати температура тунельного повітря на виході з ходка становитиме $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, відносна вологість 72% , температура стінок оправи приблизно $15,7^{\circ}\text{C}$ і вся теплова енергія, яка виділятиметься в тунельне повітря, буде витратитися на прогрівання оправи стінок

тунелів (конвективний теплообмін). Оскільки з аналізу експериментальних даних за попередні роки встановлено, що температура стінок оправи тунелів може сягати значення 17 і $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, то в такому випадку були також розглянуті варіанти з ефектами від тривалого використання теплової гармати для даних температур (стаціонарні задачі). З рис. 9 і 10 видно, що з поступовим прогріванням шару ґрунту навколо тунелів до 17 і $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ зростає середнє значення температури тунельного повітря від $17,5$ до $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, одночасно з цим зменшується середнє значення відносної вологості повітря з $75,9$ до 73% , тобто забезпечується нормоване значення. Таким чином, при тривалій дії теплової гармати відносна вологість тунельного повітря може знизитися на $(7...11)\%$.

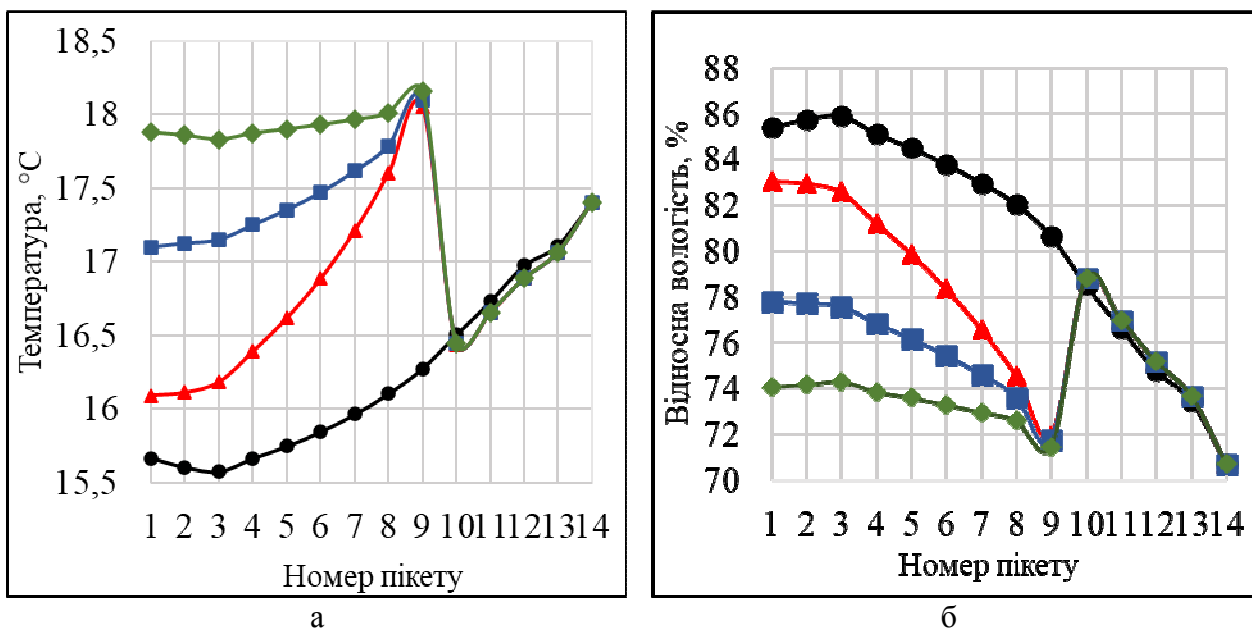


Рис. 9. Залежності температури (а) і відносної вологості (б) тунельного повітря СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» при нагріванні повітря: ● – експериментальні значення 11.07.2019; електрична потужність нагрівача і температура оправи стінок тунелю: ▲ – 40 кВт при експериментальних температурах оправи стінок тунелю; ■ – 40 кВт і 17°C; ◆ – 40 кВт і 18 °C

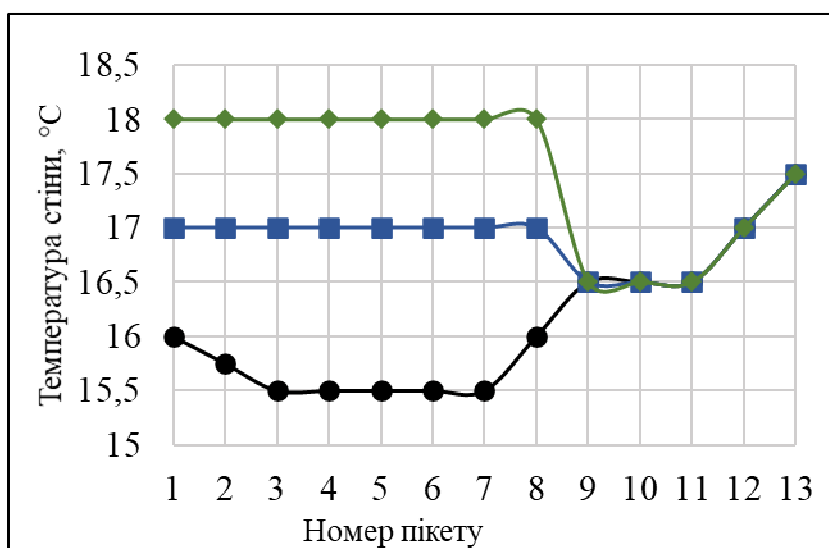


Рис. 10. Залежності температури оправи стінок тунелю СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик»: ● – експериментальні значення 11.07.2019; електрична потужність нагрівача і температура оправи стінок тунелю: ■ – 17 °C; ◆ – 18 °C

Висновки. В статті проаналізовані такі фізичні методи зниження відносної вологості тунельного повітря тунелів глибокого залягання КП «Київський метрополітен» на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду

до ст. м. «Хрещатик»: збільшення кратності повітрообміну повітрям з меншою абсолютною вологістю, видалення частини вологи з повітря методом конденсації,

підвищення температури тунельного повітря шляхом нагрівання.

Зниження відносної вологості тунельного повітря способом збільшення кратності вентиляції тунелів повітрям з меншою абсолютною вологістю за рахунок встановлення додаткового вентиляційного агрегату в обвідному ходку (в районі ПК09+40) та засобів спрямування повітряного потоку за допомогою перегородок з обвідного ходка в тунель під кутом 45° до основного потоку тунельного повітря або направлення повітряного потоку за допомогою повітропроводу перерізом $0,48 \text{ м}^2$ ($600 \times 800 \text{ мм}$) і довжиною 1 м вздовж стінки тунелю паралельно основному потоку (рис. 2) в напрямку ст. м. «Хрещатик» може призвести до збільшення витрати потоку тунельного повітря до 30 і 26 кг/с відповідно, при цьому відносна вологість знизиться на 5% . Для реалізації даного способу необхідно затратити електричну потужність 40 кВт .

При реалізації способу осушення тунельного повітря додатково машиною

осушення повітря, розташованою в обвідному ходку, можна знизити відносну вологість на $(12...14)\%$ та забезпечувати дотримання нормованої вологості 75% . Проте реалізація даного способу є енергозатратною у порівнянні з реалізацією способу збільшення повітрообміну, оскільки для осушення необхідна затрата електричної потужності становить близько $212 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

За результатами дослідження для КП «Київський метрополітен» рекомендовано спосіб нагрівання тунельного повітря додатково встановленою в обвідному ходку тепловою гарматою з нагрівачем потужністю 40 кВт на базі електричних ТЕНів, що призведе до нагрівання тунельного повітря з одночасним зниженням відносної вологості на $(7...11)\%$, прогрівання шару ґрунту навколо тунелю та уникнення його заходження в майбутньому. Практична реалізація способу нагрівання тунельного повітря потребує затрати електричної потужності близько $60 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Список використаних джерел

1. Моделювання вологісного стану тунелів КП «Київський метрополітен» впродовж календарного року / П. Г. Круковський, А. І. Дейнеко, В. С. Олійник, Д. І. Склярєнко: зб. наук. праць Укр. держ ун-ту залізнич. трансп. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 186. С. 72-86 (doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186422>).
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 (doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.183.2019.169636>).
3. Моделювання тепловологого стану тунелів Київського метрополітену / П. Г. Круковський, О. Ю. Тадля, А. І. Дейнеко та ін. *Електронне моделювання*. 2019. № 3. Т. 41. С. 105-118 (doi: <https://doi.org/10.15407/emodel.41.03.105>).
4. ДБН В.2.3-7-2018. Метрополітени. Основні положення. Чинний від 2019-09-01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2019. 70 с.
5. Устройство реверсивной тоннельной вентиляции метрополитенов с частичной рециркуляцией воздуха / О. В. Кашеева, Е. О. Воронов, В. П. Кашеев и др. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика*: международный научно-технический журнал. 2012. № 1. 64-72.
6. Gyu-Sik K., Youn-Suk S., Jai-Hyo L., In-Won K., Jo-Chun K., Joon-Tae O., Hiesik K. Air Pollution Monitoring and Control System for Subway Stations Using Environmental Sensors.

Sensors and Systems for Environmental Monitoring and Control. 2016. Vol. 2016. Article ID 1865614. P. 10. <https://doi.org/10.1155/2016/1865614>

7. Цодиков В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Недра, 1975. 560 с.

8. Tétreault J., Bégin P. Silica Gel: Passive Control of Relative Humidity. *Technical Bulletin* 33. 2020-02-21. URL: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/silica-gel-relative-humidity.html> (відвідування ресурсу 29.03.2020).

9. Lahchava O., Pias N. Complex calculation method of temperature, mass transfer potential and relative humidity for ventilation flow in subway. *Journal of Engineering Sciences and Innovation*. 2018. Vol. 3. Issue 1. P. 69-84.

10. Wen Y., Leng J., Shen X., Han G., Sun L., Yu F. Environmental and Health Effects of Ventilation in Subway Stations: A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. 17. 1084. 37 p. doi:10.3390/ijerph17031084.

11. Li A., Kosonen R., Melikov A., Yang B., Olofsson T., Sørensen B., Zhang L., Cui P., Han O. Ventilation and environmental control of underground spaces: a short review. *E3S Web of Conferences Clima*. 2019. 111. 01039. 5 p. doi: 10.1051/e3sconf/201911101039.

12. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование: учеб. пособ. для вузов / Б. М. Хрусталева, Ю. Я. Кувшинов, В. М. Копко; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Изд. 3-е, испр. и доп. Москва: Изд-во АСВ, 2010. 783 с.

Круковський Павло Григорович, головний науковий співробітник, завідуючий лабораторією моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: kruk_2@ukr.net. ORCID iD: 0000-0001-6726-0550.

Дейнеко Андрій Іванович, старший науковий співробітник, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: andriideineko@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-4279-3710.

Дядюшко Євген Валентинович, молодший науковий співробітник, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: 93k41337@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-2601-4633.

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. ORCID iD: 0000-0001-6726-0550.

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. ORCID iD: 0000-0002-4279-3710.

Diadiushko Yevhenii Valentinovich, 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: 93k41337@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-2601-4633.

Статтю прийнято 05.03.2020 р.