ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 628.17:625.42 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.201

© О.О. Яворська[1], Є.А. Коровяка[1], В.Л. Хоменко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ДРЕНАЖНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД МЕТРОПОЛІТЕНУ ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

O. Yavorska[1], https://orcid.org/0000-0001-5516-5310
Ye. Koroviaka[1], https://orcid.org/0000-0002-2675-6610
V. Khomenko[1] https://orcid.org/0000-0002-3607-5106
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SUBSTANTIATION OF A SCHEME FOR USING METRO DRAINAGE GROUNDWATER FOR INDUSTRIAL WATER SUPPLY

Мета. Обґрунтування технологічної схеми збирання, підготовки та розподілу дренажних підземних вод метрополітену для потреб технічного водопостачання, а також розроблення математичної моделі, що пов'язує водоприток у підземні споруди з потребою споживачів і дозволяє визначити раціональний склад схеми та її техніко-економічні показники.

Методика. Дослідження поєднує аналіз нормативної бази проєктування метрополітенів і систем технічного водопостачання, узагальнення світового досвіду поводження з дренажними водами підземних транспортних споруд та економіко-математичне моделювання. Побудовано балансову модель системи «водоприток – водопідготовка – резервуар – споживач», яка враховує сезонну нерівномірність припливу та попиту, обмеження за якістю води у вигляді допустимої частки змішування, а також умову регулювальної ємності резервуара.

Результати. На прикладі діючої лінії Дніпровського метрополітену завдовжки 7,8 км установлено, що розрахунковий водоприток становить близько 540 м^3/добу (197 тис. м^3/рік), тоді як власні потреби метрополітену в технічній воді покривають лише 19 % цього обсягу. Обґрунтовано триетапну схему використання дренажних вод із залученням комунальних і промислових споживачів, яка забезпечує коефіцієнт утилізації 0,85 та заміщення близько 167 тис. м^3 питної води на рік. Визначено потрібну регулювальну ємність резервуара (350 м^3) і діапазон термінів окупності 1,9–6,0 року залежно від тарифу.

Наукова новизна. Встановлено залежність економічної ефективності впровадження схеми повторного використання води від сумарного тарифу на водопостачання та водовідведення з урахуванням капітальних вкладень у споруди водопідготовки й розподілу води та питомих експлуатаційних витрат, що дає змогу визначити умови економічної доцільності реалізації проєкту за різних тарифних сценаріїв.

Практична значимість. Запропонована схема дозволяє комунальному підприємству метрополітену одночасно знизити витрати на питну воду та плату за скид дренажних вод у міську каналізацію, зменшити техногенне навантаження на систему водовідведення міста та створити резервне джерело технічної води для потреб громади в умовах пошкодження централізованих систем водопостачання.

Ключові слова: *дренажні води, метрополітен, підземні води, технічне водопостачання, водозниження, балансова модель, повторне використання води, водний баланс міста.*

Вступ. Метрополітен є підземною інженерною спорудою, яка протягом усього строку експлуатації перебуває у взаємодії з підземними водами. Тунелі, станційні комплекси, вентиляційні шахти та притунельні споруди перетинають водоносні горизонти, порушуючи природний режим фільтрації: з одного боку, вони діють як бар'єр для потоку, з іншого – як постійно діючий лінійний дренаж, що відбирає воду з водоносного горизонту. Унаслідок цього в тунелі безперервно надходить вода, яку збирають лотками, акумулюють у водозбірниках і відкачують водовідливними насосними установками [1, 2, 3].

Державні будівельні норми України регламентують цей процес як проєктну величину. Згідно з ДБН В.2.3-7-2010 «Споруди транспорту. Метрополітени», влаштування заоправного дренажу з відведенням води в лоток тунелю допускається, якщо кількість води, що впускається в тунель, не перевищує 5 м³/год на 1 км тунелю; у складі підземних споруд передбачаються камери водовідливних насосних установок (дренажні перекачки), свердловини та водоприймальні колодязі на підключенні до міської мережі каналізації [1]. Таким чином, нормативно закріплено і сам факт постійного водопритоку, і схему його відведення – скид у міську каналізацію.

Саме ця схема і є предметом перегляду. Вода, що безперервно відкачується з підземних споруд, має стабільну витрату, практично незмінну температуру протягом року та передбачувану якість, тобто за сукупністю ознак є повноцінним джерелом технічного водопостачання. Натомість сьогодні вона скидається в каналізацію, за що підприємство сплачує, і одночасно купує питну воду з централізованого водопроводу для тих самих технічних потреб – вологого прибирання станцій, миття рухомого складу, охолодження обладнання, поливання прилеглих територій.

Актуальність задачі посилюється двома обставинами. По-перше, метрополітени споруджуються і експлуатуються у великих містах, де навантаження на системи водопостачання і водовідведення є найвищим, а в умовах воєнного стану централізовані системи до того ж уразливі до пошкоджень. По-друге, у Європейському Союзі повторне використання води перетворилося на самостійний напрям водної політики: Регламент (ЄС) 2020/741 установлює мінімальні вимоги до повторного використання води, а Водна рамкова директива 2000/60/ЄС вимагає досягнення доброго кількісного та якісного стану масивів підземних вод [4, 5]. Для України, яка імплементує ці акти, дренажні води підземних транспортних споруд є очевидним, але майже не задіяним резервом.

Досвід інших міст підтверджує масштаб явища. Дослідження гідрохімії міських підземних вод Сеула показало, що в багатьох країнах, зокрема в Південній Кореї, інфільтраційні води тунелів метрополітену збирають і після відповідної підготовки використовують повторно, а управління цими водами стало самостійним завданням міського водного господарства [6]. У Брюсселі метрополітен обладнано дренажними системами, що пропускають потік підземних вод крізь споруди [2]. Для гірських і карстових тунелів розроблено спеціальні водозбірні системи відведення дренажного стоку [7].

В Україні ситуація інша. Київський метрополітен відводить усю воду, що потрапляє в тунелі або технічні приміщення, через дренажні системи та відкачує насосами у міську дощову каналізацію [8, 9]. У Дніпровському метрополітені пріоритетним завданням служби колії та споруд є саме подавлення течій ґрунтових вод у тунелях, причому окремо відзначається проблема хімічно активних вод, які спричиняють корозію металоконструкцій, бетону та залізобетонних елементів [10]. Тобто водоприток розглядається виключно як загроза, а не як ресурс.

Дніпровський метрополітен є зручним об'єктом для постановки задачі. Він відкритий у 1995 році, має одну Центрально-Заводську лінію завдовжки 7,8 км із шістьма станціями та електродепо [11]; триває добудова трьох станцій («Театральна», «Центральна», «Музейна») із продовженням лінії на 4 км, після чого її загальна довжина становитиме 11,8 км [12]. Отже, за найближчі роки довжина підземних споруд, а з нею і водоприток, зростуть приблизно в півтора раза, причому під час будівництва додається ще й водозниження. Це робить питання раціонального поводження з дренажними водами не перспективним, а поточним.

Аналіз попередніх досліджень. Проблематика взаємодії підземних споруд із підземними водами розроблена доволі повно, однак переважно в інженерно-геологічному та прогнозному аспектах.

Аттард зі співавторами узагальнили сучасний стан питання щодо впливу підземних споруд – тунелів, підвалів будівель, глибоких фундаментів – на потік підземних вод у міських водоносних горизонтах, систематизувавши споруди за характером впливу: перешкода потоку або порушення водного балансу системи [2]. У подальшій роботі ті самі автори сформулювали рекомендації щодо спорудження підземних об'єктів у міських водоносних горизонтах з урахуванням вимог до ресурсів підземних вод [3]. Букхемача зі співавторами розробили гідрогеологічну концептуальну модель міського потоку підземних вод на прикладі Бухареста [13].

Значний масив робіт присвячено прогнозуванню величини водопритоку. Френелюс, Пен і Чжан виконали оглядовий аналіз методів оцінювання припливу підземних вод у тунелі в скельних породах [14]. Бутшер отримав розв'язок задачі про усталений приплив у круговий тунель [15]. Хассані зі співавторами виконали чисельний аналіз усталеного припливу підземних вод у тунель другої лінії метрополітену Тебриза [16], а згодом – порівняльне дослідження методів оцінювання припливу в неглибокий круговий тунель [17]. Лі зі співавторами описали практичні випадки припливу підземних вод у тунелі та запропонували водозбірну систему для відведення дренажного стоку [7].

Якісний аспект висвітлено у роботі Чхе зі співавторами, які дослідили гідрохімію інфільтраційних вод тунелів метрополітену Сеула та показали, що спорудження тунелів знижує рівень підземних вод, спричиняє підтягування забруднювачів, зокрема стічних вод із пошкоджених трубопроводів, і внаслідок цього погіршує якість міських підземних вод [6]. Саме ця робота містить пряму вказівку на практику збирання і повторного використання інфільтраційних вод після відповідної підготовки.

Нормативне та правове підґрунтя для України формують ДБН В.2.3-7-2010 у частині проєктування водовідливу метрополітенів [1], ДБН В.2.5-74:2013 та ДБН В.2.5-75:2013 у частині зовнішніх мереж водопостачання і каналізації [18, 19], ДСТУ 3041-95 у частині використання і охорони води [20], Водний кодекс України [21] та ДСанПіН 2.2.4-171-10 у частині вимог до якості води [22]. Стан підземних вод Дніпровського басейну охарактеризовано у плані управління річковим басейном Дніпра [23] та у звіті про делімітацію масивів підземних вод, підготовленому в межах ініціативи ЄС «Водна ініціатива Плюс» [24].

Споріднені інженерні задачі – спорудження та освоєння водозабірних свердловин, керування припливом флюїду до підземної виробки, оптимізація режимів буріння – розроблялися на кафедрі нафтогазової інженерії та буріння НТУ «Дніпровська політехніка». Зокрема, досліджено особливості роботи пристрою для створення імплозійного впливу на водоносний пласт з метою відновлення природної проникності привибійної зони [25]; оптимізовано технологічні параметри ерліфтної експлуатації при бурінні водозабірних свердловин [26]; визначено тепловий стан блокового гравійного фільтра під час його транспортування свердловиною [27]; обґрунтовано параметри буріння типової свердловини для конкретних геолого-технічних умов [28] та оптимізовано технологію спуско-піднімальних операцій [29]. Задачу керування водним балансом гірського масиву з використанням ємності водоносних горизонтів розглянуто в роботі [30]. Питання безпечної експлуатації підземних об’єктів і управління професійними ризиками висвітлено в роботах [31, 32].

Таким чином, наявні дослідження всебічно описують, скільки води надходить у підземні споруди та як це впливає на водоносний горизонт, але майже не торкаються питання, що з цією водою робити далі. Балансові моделі, які пов’язували б водоприток із конкретною структурою потреби в технічній воді та дозволяли б обґрунтувати склад і параметри системи повторного використання, у відкритих джерелах відсутні.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Аналіз показує, що між двома добре розробленими напрямами – прогнозуванням водопритоку в підземні споруди та проєктуванням систем технічного водопостачання – існує розрив. Водоприток розраховують для того, щоб підібрати водовідливне обладнання і забезпечити збереження конструкцій; подальша доля відкачаної води при цьому нормативно визначена однозначно – скид у міську каналізацію [1, 8].

Невирішеною частиною проблеми є відсутність інженерної методики, яка дозволяла б: визначити, яку частку дренажного стоку метрополітену технічно можливо та економічно доцільно утилізувати; обґрунтувати склад споживачів, потрібний для досягнення прийнятного коефіцієнта утилізації; встановити вимоги до глибини водопідготовки виходячи з лімітуючого показника якості; визначити регулювальну ємність резервуара з урахуванням сезонної та добової нерівномірності; оцінити техніко-економічні показники схеми.

Метою дослідження є обґрунтування технологічної схеми використання дренажних підземних вод метрополітену для технічного водопостачання на основі балансової математичної моделі системи «водоприток – водопідготовка –

резервуар – споживач» та оцінювання її техніко-економічної ефективності на прикладі Дніпровського метрополітену.

Основна частина (Результати). Вода надходить у підземні споруди метрополітену чотирма принципово різними шляхами, кожен з яких має власний режим. Сумарний дебіт водовідливу становить

$$Q_{\partial}(t) = Q_{ф}(t) + Q_{a}(t) + Q_{к}(t) + Q_{в}(t), \quad (1)$$

де $Q_{ф}$ – фільтраційний приток крізь оправу тунелів і конструкції станцій; Q_{a} – атмосферна інфільтрація через вестибюлі, вентиляційні кіоски та шахти; $Q_{к}$ – конденсат, що утворюється на поверхні оправи та обладнання; $Q_{в}$ – води водозниження, які відкачуються з дренажних свердловин при будівництві нових дільниць або для зниження гідростатичного тиску на оправу, м³/добу.

Основну складову визначає питомий приток, віднесений до одиниці довжини тунелю:

$$Q_{ф} = 24 \cdot q \cdot L_{m}, \quad (2)$$

де q – питомий приток ($q \le q_{доп} = 5$ м³/(год·км)); L_m – довжина тунелів, км. Верхня межа $q_{доп}$ установлена ДБН В.2.3-7-2010 як умова допустимості заоправного дренажу з відведенням води в лоток тунелю [1]; вона ж задає верхню оцінку ресурсу, на який можна розраховувати при проєктуванні системи повторного використання.

Фільтраційна та атмосферна складові мають виражену сезонність, зумовлену режимом живлення водоносного горизонту:

$$q(t) = \bar{q}\left[1 + a \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - t_0}{T}\right)\right], \quad (3)$$

де $\bar{q}$ – середньорічний питомий приток; a – відносна амплітуда сезонних коливань; t_0 – місяць максимуму (для умов Придніпров'я – квітень, після сніготанення та весняних опадів); T = 12 міс. Конденсатна складова, навпаки, досягає максимуму влітку і визначається вологовмістом вентиляційного повітря:

$$Q_{к} = \rho_{п} \cdot \dot{V}_{п} \cdot (d_{вх} - d_{вих}) \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

де $\rho_{п}$ – густина повітря, кг/м³; $\dot{V}_{п}$ – добова витрата вентиляційного повітря, м³/добу; $d_{вх}$, $d_{вих}$ – вологовміст повітря на вході та виході з підземних споруд, г/кг.

Потреба формується як сума потреб окремих споживачів із власними нормами та режимами споживання:

$$W(t) = \sum w_i n_i k_i \chi_i(t), \quad (5)$$

де w_i – питома норма витрати технічної води i-м споживачем; n_i – кількість розрахункових одиниць (станцій, вагонів, квадратних метрів території); k_i – коефіцієнт добової нерівномірності; $\chi_i(t)$ – функція сезонної доступності споживача, що дорівнює одиниці в періоди його роботи і нулю поза ними.

Ефективність схеми характеризують двома коефіцієнтами:

$$\eta_в = \frac{K_з W}{Q_д}, \tag{6}$$

де $\eta_в$ – коефіцієнт утилізації дренажного стоку, що показує, яка його частка знаходить споживача; $K_з$ – коефіцієнт заміщення, тобто частка потреби в технічній воді, покрита дренажними водами замість питної. Ці коефіцієнти не є взаємозамінними: за великого притоку і малої потреби $K_з = 1$ при низькому $\eta_в$, і саме така ситуація, як буде показано далі, є типовою для метрополітену.

Дренажні води метрополітену, як правило, не відповідають вимогам до технічної води за мінералізацією, жорсткістю та вмістом заліза, причому у Дніпровському метрополітені окремо фіксується хімічна агресивність цих вод щодо бетону та металоконструкцій [10]. Якщо після водопідготовки окремі показники залишаються вищими за допустимі, застосовують змішування з водопровідною водою. Умова допустимості за i-м показником має вигляд:

$$\alpha C_{д,i} + (1-\alpha) C_{м,i} \le C_{дод,i}, \tag{7}$$

звідки гранична частка дренажної води у суміші та лімітуючий показник визначаються як:

$$\alpha_{\max,i} = \frac{C_{дод,i} - C_{м,i}}{C_{д,i} - C_{м,i}}, \tag{8}$$

де $C_{д,i}$, $C_{м,i}$, $C_{дод,i}$ – концентрація i-го показника відповідно у дренажній воді після підготовки, у водопровідній воді та допустима для цієї категорії споживача. Значення α^* ($\alpha^* = \min_i \alpha_{max,i}$) є ключовим проєктним параметром: воно визначає, чи достатньо механічної підготовки, чи потрібне пом’якшення або знесолення, і для кожної групи споживачів є різним.

Водоприток практично рівномірний у часі доби, тоді як споживання зосереджене у нічні години (прибирання станцій, миття тунелів і рухомого складу) та у теплий період (поливання). Потрібний регулювальний об’єм визначається максимальним накопиченим дефіцитом:

$$V_{рег} = V_р - V_{пож} = \max_t \int \left[W(\tau) - Q_д \right]^+ d\tau, \tag{9}$$

де $V_{пож}$ – недоторканний протипожежний запас. Сезонне регулювання при цьому свідомо не передбачається: вирівнювання зимового надлишку відносно літнього попиту потребувало б ємності на кілька десятків тисяч кубічних метрів, що робить схему неприйнятною. Саме звідси випливає вимога наявності базового цілорічного споживача.

Річний економічний ефект складається з двох частин – вартості заміщеної питної води та відвернутої плати за скид дренажних вод у міську каналізацію:

$$E = \frac{T_{ок}}{K} = Q_{вик}\left(T_в + T_с - c_е\right) - C_{пост}, \tag{10}$$

де $T_в$, $T_с$ – тарифи на водопостачання та водовідведення, грн/м^3; $c_е$ – питомі експлуатаційні витрати на водопідготовку, перекачування та обслуговування, грн/м^3; $C_{пост}$ – постійні річні витрати; K – капітальні вкладення; $T_{ок}$ – простий термін окупності, років.

Вихідні параметри прийнято за фактичними характеристиками діючої лінії: $L_т$ = 7,8 км, шість станцій, одне електродепо [11]. Питомий приток прийнято $\bar{q}$ = 2,5 м^3/(год·км), тобто на рівні половини нормативно допустимої величини [1], що відповідає задовільному стану гідроізоляції; відносна амплітуда сезонних коливань a = 0,3 з максимумом у квітні. Складові водопритоку наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахункові складові водопритоку в підземні споруди Дніпровського метрополітену

Складова водопритоку	Позначення	Витрата, м^3/добу	Характер режиму
Фільтраційний приток крізь оправу	$Q_ф$	468	сезонний, максимум у квітні
Атмосферна інфільтрація	$Q_а$	34	сезонний, пов’язаний з опадами
Конденсат	$Q_к$	38	сезонний, максимум влітку
Разом (експлуатація)	$Q_д$	540	197,1 тис. м^3/рік
Води водозниження (період добудови)	$Q_в$	192	тимчасовий, 2–4 роки

Джерело: розраховано авторами за формулами (1)–(4) та даними [1, 11].

Структуру потреби в технічній воді сформовано трьома групами споживачів. Перша – власні потреби метрополітену; друга – комунальні споживачі прилеглої території; третя – промислові підприємства, що використовують технічну воду в системах оборотного водопостачання. Нормативні витрати прийнято за ДБН В.2.5-74:2013 [18] та відомчими нормами експлуатації; результати наведено в таблиці 2.

Принципову схему системи наведено на рисунку 1. Вода зі всіх джерел надходить у штатні тунельні лотки й водозбірники, звідки водовідливними установками подається не одразу в каналізацію, як це передбачено чинною схемою [1, 8], а на блок водопідготовки. Після відстоювання, механічної фільтрації, знезалізнення та знезараження вода надходить у регулювальний резервуар, далі – у вузол обліку та змішування, де контролюється фактична частка α і підтримується умова $\alpha \le \alpha^*$. Лише надлишок, що не знайшов споживача, скидається у зливову каналізацію.

Таблиця 2

Структура потреби в технічній воді за етапами схеми

Етап	Споживач	Витрата, м³/добу	Період роботи
I	Вологе прибирання станційних комплексів	12	цілий рік
	Миття тунельної оправи та водовідвідних лотків	18	цілий рік
	Миття рухомого складу в електродепо	27	цілий рік
	Охолодження тягових підстанцій і вентиляції	16	цілий рік
	Поповнення протипожежних резервуарів	6	цілий рік
	Поливання та благоустрій прилеглих територій	45	квітень – вересень
	Разом за етапом I	79 / 124	зима / літо
II	Механізоване прибирання та миття вулиць	180	квітень – вересень
	Поливання зелених насаджень	120	квітень – вересень
	Технологічні потреби добудови станцій	90	жовтень – березень
	Разом за етапом II	90 / 300	зима / літо
III	Підживлення систем оборотного водопостачання промислових підприємств	200	цілий рік
	Разом за трьома етапами	369 / 624	зима / літо

Джерело: розраховано авторами за формулою (5) та нормами [18].

Результати сумісного розгляду притоку та попиту за місяцями наведено на рисунку 2. Водоприток змінюється в межах 390–690 м³/добу з максимумом у квітні, тоді як потреба має прямокутний профіль із переходом від 369 м³/добу взимку до 624 м³/добу влітку. Сезонні максимуми притоку і попиту збігаються за фазою – це сприятлива обставина, зумовлена спільною причиною: і живлення водоносного горизонту, і потреба в поливанні визначаються одним кліматичним циклом.

Розрахунок за формулою (6) дає річний коефіцієнт утилізації $\eta_в = 0{,}85$ при обсязі використання $Q_{вик} = 167{,}1$ тис. м³/рік (у середньому 458 м³/добу). Скид у зливову каналізацію скорочується до 30 тис. м³/рік, тобто на 85 %.

Принципово важливим є розподіл цього результату за етапами. Власні потреби метрополітену (етап I) становлять лише 18,8 % річного притоку – за $K_з = 1$, тобто при повному заміщенні питної води власного споживання, понад чотири п’ятих ресурсу залишаються незатребуваними. Етап II додає ще 38 %, але

майже виключно у теплий період, що залишає зимовий надлишок. І лише етап ІІІ – промисловий споживач із рівномірним цілорічним відбором – доводить $\eta_в$ до прийнятного рівня.

Обмежувальним чинником схеми є не обсяг притоку і не якість води, а структура та сезонність попиту; схема без базового цілорічного споживача принципово не може бути ефективною.



Рис. 1. Принципова схема використання дренажних підземних вод метрополітену для технічного водопостачання

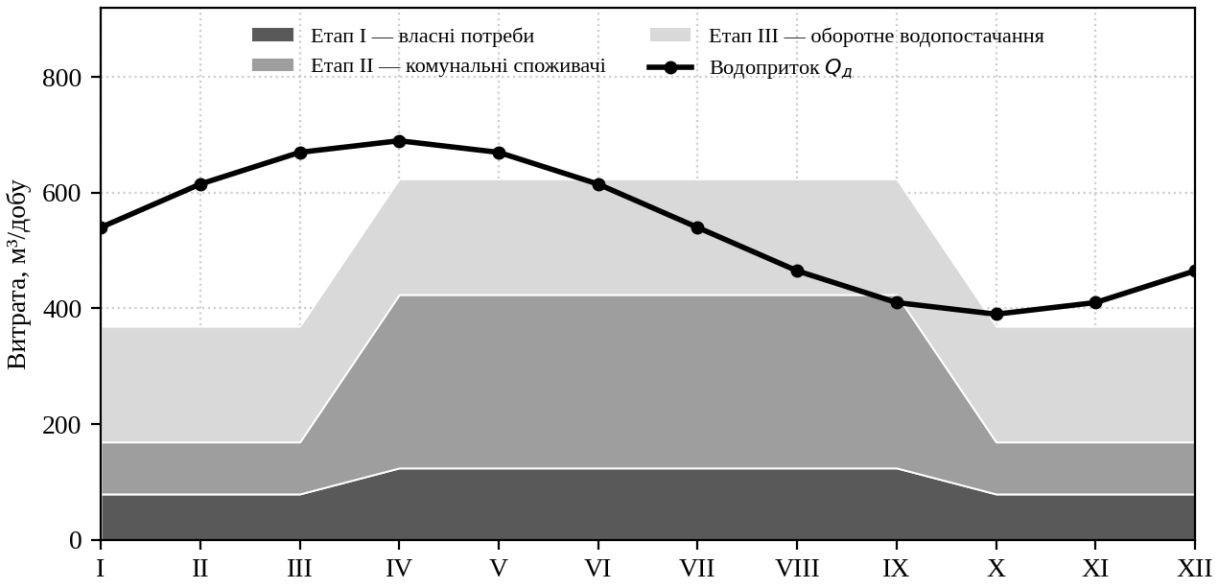


Рис. 2. Сезонний баланс водопритоку та потреби в технічній воді за етапами схеми

Вимоги до якості води та розрахунок за формулами (7)–(8) наведено в таблиці 3. Склад дренажних вод прийнято за типовими для четвертинного та неогенового водоносних горизонтів Придніпров'я значеннями [23, 24] з урахуванням зафіксованої хімічної агресивності [10]; для проєктування потрібне натурне гідрохімічне опробування.

Таблиця 3

Визначення лімітуючого показника якості та допустимої частки змішування

Показник	Дренажна вода $C_д$	Водопровідна вода $C_м$	Допустиме значення $C_{доп}$	α_{max}
Загальна мінералізація, мг/дм³	1 800	400	1 000	0,43
Сульфати, мг/дм³	650	60	500	0,75
Загальна жорсткість, ммоль/дм³	12,0	4,0	7,0	0,38
Залізо загальне, мг/дм³	2,4	0,2	0,3	0,05*
Завислі речовини, мг/дм³	35	5	20	0,50*
Водневий показник pH	7,2	7,4	6,5 – 8,5	без обмежень

*Джерело: розраховано авторами за формулами (7)–(8). * – показник усувається водопідготовкою (знезалізнення, механічна фільтрація), після якої обмеження на частку змішування знімається.*

Розрахунок показує, що після механічної фільтрації та знезалізнення лімітуючим показником залишається загальна жорсткість, для якої $\alpha^* = 0{,}38$. Це означає, що для систем охолодження тягових підстанцій і оборотного водопостачання дренажна вода може використовуватися лише у суміші з водопровідною у співвідношенні не більше 38 %, або потребує пом'якшення. Натомість для миття станцій, тунелів, рухомого складу, вулиць і для поливання зелених насаджень обмеження за жорсткістю не є визначальним, і такі споживачі можуть працювати на дренажній воді повністю – саме вони і становлять основу етапів I та II.

Регулювальну ємність визначено за формулою (9) для найбільш напруженого режиму: 70 % добової потреби теплого періоду зосереджено у восьмигодинному нічному вікні. Розрахунковий регулювальний об'єм становить 207 м³; з урахуванням 20 % запасу приймаємо $V_{рег} = 250$ м³. Протипожежний запас з розрахунку витрати 10 дм³/с протягом трьох годин становить 108 м³, що дає по-

вну ємність резервуара $V_р$ = 350 м^3. Сезонне регулювання, як зазначалося, не передбачається: його забезпечує базовий цілорічний споживач етапу III.

Капітальні вкладення у схему визначено за складом споруд: блок водопідготовки продуктивністю 30 м^3/год, резервуар 350 м^3, насосна станція другого підйому, вузол обліку та змішування, мережі технічного водопроводу завдовжки близько 2,5 км. Орієнтовна сума K = 18 млн грн; питомі експлуатаційні витрати $c_е$ = 12 грн/м^3, що включає реагенти, електроенергію на другий підйом та обслуговування. Витрати на перекачування з водозбірників не враховуються, оскільки вони здійснюються і за чинної схеми. Оскільки тарифи на водопостачання та водовідведення для непобутових споживачів істотно різняться за містами і переглядаються щороку, результат наведено у вигляді залежності від сумарного тарифу (таблиця 4, рисунок 3).

Таблиця 4

Економічні показники схеми залежно від сумарного тарифу на водопостачання та водовідведення

Показник	30 грн/м^3	40 грн/м^3	50 грн/м^3	70 грн/м^3
Валова економія, млн грн/рік	5,01	6,68	8,35	11,69
Експлуатаційні витрати, млн грн/рік	2,01	2,01	2,01	2,01
Чистий річний ефект E, млн грн	3,01	4,68	6,35	9,69
Термін окупності $T_{ок}$, років	6,0	3,8	2,8	1,9

Джерело: розраховано авторами за формулою (10) при K = 18 млн грн, $c_е$ = 12 грн/м^3, $Q_{вик}$ = 167,1 тис. м^3/рік.

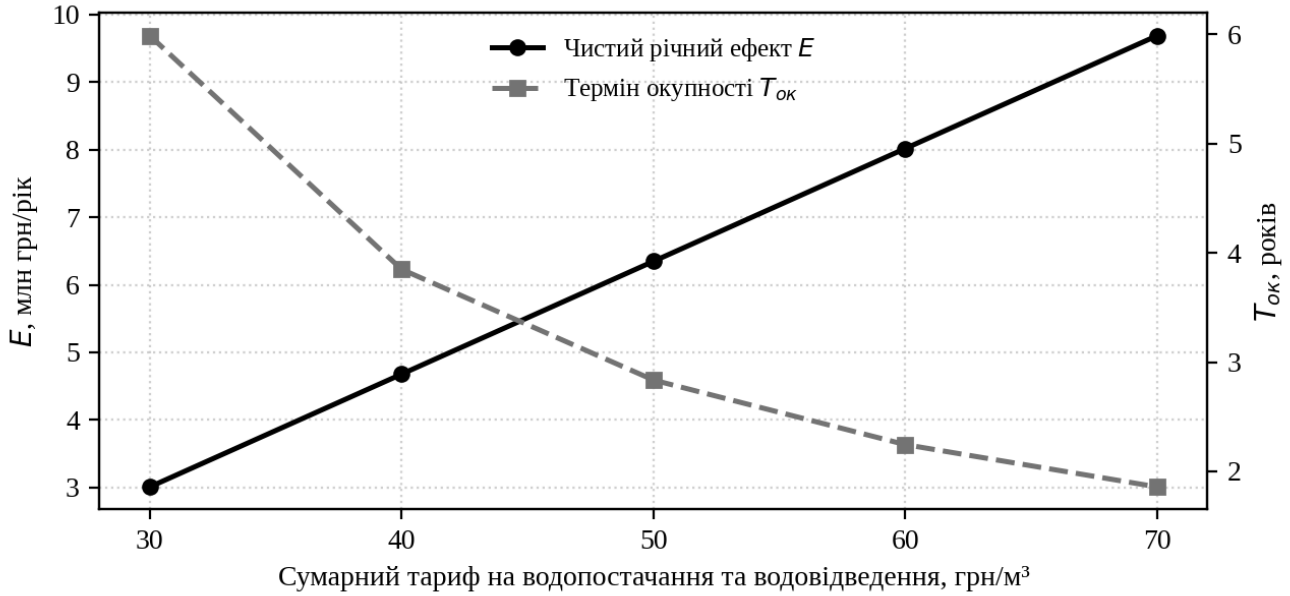


Рис. 3. Залежність чистого річного ефекту та терміну окупності схеми від сумарного тарифу на водопостачання і водовідведення

Як видно з рисунка 3, схема залишається привабливою в усьому розглянутому діапазоні тарифів: навіть за найнижчого з них термін окупності не пере-

вищує шести років, що для об'єкта комунальної інфраструктури з розрахунковим строком служби понад 25 років є прийнятним. За тарифів, характерних для непобутових споживачів великих міст, окупність скорочується до двох-трьох років. Варто наголосити, що половина ефекту формується не економією на купівлі води, а відверненою платою за скид – обставина, яку при традиційному погляді на дренажні води як на відхід узагалі не беруть до уваги.

Екологічна складова ефекту полягає у скороченні скиду в міську мережу на 167 тис. м^3/рік, що відповідає вимогам Водного кодексу України щодо раціонального використання водних ресурсів [21] та узгоджується з підходом Регламенту (ЄС) 2020/741, який розглядає повторне використання води як самостійний інструмент управління водними ресурсами [4, 5].

Отримані результати слід розглядати як проєктну оцінку. По-перше, фактичні обсяги водовідливу Дніпровського метрополітену не оприлюднюються, тому величину притоку визначено розрахунково за нормативним питомим показником [1]; перед проєктуванням потрібні натурні заміри дебіту водовідливних установок протягом щонайменше одного річного циклу. По-друге, хімічний склад дренажних вод прийнято за типовими для регіону значеннями і потребує підтвердження гідрохімічним опробуванням по кожному водозбірнику окремо, оскільки на різних дільницях лінії водоносні горизонти різні. По-третє, модель не враховує можливого зниження рівня підземних вод і пов'язаних із ним осідань поверхні при збільшенні відбору: за чинної схеми вода відкачується в тому самому обсязі, тож додаткового впливу не виникає, однак при розширенні водозниження це питання потребує окремого гідрогеологічного обґрунтування [2, 3]. По-четверте, економічні показники наведено в цінах на момент виконання розрахунку і за спрощеною методикою простого терміну окупності, без дисконтування.

Висновки. Показано, що дренажні підземні води метрополітену за сукупністю ознак – стабільністю витрати, сталістю температури протягом року та передбачуваністю складу – є повноцінним джерелом технічного водопостачання, тоді як чинна нормативна схема розглядає їх виключно як стік, що підлягає відведенню в міську каналізацію [1, 8].

Побудовано балансову модель системи «водоприток – водопідготовка – резервуар – споживач» (1)–(10), яка пов'язує сезонний режим надходження води у підземні споруди зі структурою потреби споживачів, обмеженнями за якістю та регулювальною ємністю резервуара. Для діючої лінії Дніпровського метрополітену завдовжки 7,8 км розрахунковий водоприток становить 540 м^3/добу, або 197,1 тис. м^3/рік.

Установлено, що власні потреби метрополітену в технічній воді покривають лише 18,8 % водопритоку. Отже, визначальним обмеженням схеми є не обсяг ресурсу і не якість води, а структура та сезонність попиту. Обґрунтовано триетапну схему – власні потреби, комунальні сезонні споживачі, базовий промисловий споживач із цілорічним відбором, – яка забезпечує коефіцієнт утилізації $\eta_в = 0{,}85$ та обсяг заміщення 167,1 тис. м^3 питної води на рік.

Доведено необхідність наявності в схемі базового цілорічного споживача: без нього зимовий надлишок потребував би сезонного регулювання з ємністю на кілька десятків тисяч кубічних метрів, що робить схему технічно й економічно неприйнятною. Регулювальна ємність резервуара при добовому регулюванні становить лише 250 м^3, а повна ємність з протипожежним запасом – 350 м^3.

Отримано аналітичну умову допустимої частки змішування дренажної та водопровідної води за лімітуючим показником якості (7)–(8). Для прийнятих умов після механічної фільтрації та знезалізнення лімітуючим показником залишається загальна жорсткість із граничною часткою $\alpha^* = 0{,}38$, що обмежує застосування дренажної води лише в системах охолодження та оборотного водопостачання; для миття та поливання, які становлять основу споживання, обмеження не є визначальним.

Техніко-економічна оцінка показує, що за сумарного тарифу на водопостачання та водовідведення 30–70 грн/м^3 чистий річний ефект становить 3,0–9,7 млн грн, а термін окупності – від 6,0 до 1,9 року при капітальних вкладеннях 18 млн грн. Близько половини ефекту формує відвернена плата за скид, яку при традиційному підході до дренажних вод не враховують узагалі.

Запропонована схема має додатковий ефект, що не піддається прямій вартісній оцінці: вона створює автономне джерело технічної води у центрі міста. В умовах пошкодження централізованих систем водопостачання такий резерв продуктивністю близько 500 м^3/добу може використовуватися для потреб громади, що робить задачу частиною ширшої проблеми стійкості міської інфраструктури.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на натурне визначення фактичних обсягів і хімічного складу водовідливу метрополітенів України протягом повного річного циклу; на уточнення моделі для перспективної лінії завдовжки 11,8 км з урахуванням тимчасового припливу від водозниження в період добудови станцій; на розроблення типових технологічних рішень блоку водопідготовки для різних класів якості дренажних вод; а також на обґрунтування нормативних змін, які закріпили б повторне використання дренажних вод підземних транспортних споруд як проєктну альтернативу скиду в каналізацію.

Перелік посилань

1. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени. (2011). Київ: Мінрегіонбуд України.
2. Attard, G., Winiarski, T., Rossier, Y., & Eisenlohr, L. (2016). Review: Impact of underground structures on the flow of urban groundwater. *Hydrogeology Journal, 24*(1), 5–19. https://doi.org/10.1007/s10040-015-1317-3
3. Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., & Eisenlohr, L. (2017). Urban underground development confronted by the challenges of groundwater resources: Guidelines dedicated to the construction of underground structures in urban aquifers. *Land Use Policy,* 64, 461–469. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.03.015
4. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. *Official Journal of the European Union,* L 177, 5.6.2020, 32–55. http://data.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj

5. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities,* L 327, 22.12.2000, 1–73. http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj
6. Chae, G.-T., Yun, S.-T., Choi, B.-Y., Yu, S.-Y., Jo, H.-Y., Mayer, B., Kim, Y.-J., & Lee, J.-Y. (2008). Hydrochemistry of urban groundwater, Seoul, Korea: The impact of subway tunnels on groundwater quality. *Journal of Contaminant Hydrology, 101*(1–4), 42–52. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2008.07.008
7. Li, D., Li, X., Li, C. C., Huang, B., Gong, F., & Zhang, W. (2009). Case studies of groundwater flow into tunnels and an innovative water-gathering system for water drainage. *Tunnelling and Underground Space Technology, 24*(3), 260–268. https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.08.006
8. Чому протікають станції метро у Києві: у підземці пояснили причини. (2026). https://life.kyiv.ua/news/chomu-protikaiut-stantsii-metro-u-kyievi-u-pidzemtsi-poiasnyly-prychyny
9. Економічна правда. (2023, 8 грудня). Теремки і Голосіїв без метро. Що трапилось з «синьою» гілкою метрополітену. https://epravda.com.ua/publications/2023/12/08/707505/
10. OBOZ.UA. (2025, 4 липня). У Дніпрі вдосконалять систему водовідведення у тунелях метро: роботи проводитимуть вночі. https://news.obozrevatel.com/ukr/dnipro/u-dnipri-vdoskonalyat-sistemu-vodovidvedennya-u-tunelyah-metro-roboti-provoditimut-vnochi.htm
11. Добудова метро у Дніпрі: стало відомо, коли визначиться новий генпідрядник та скільки триватимуть роботи (2025). Наше місто. https://nashemisto.dp.ua/2025/03/14/dobudova-metro-u-dnipri-stalo-vidomo-koly-vyznachytsia-novyi-henpidriadnyk-ta-skilky-tryvatymut-roboty-2/
12. Мінфін продовжив проєкт з будівництва трьох нових станцій метро у Дніпрі. (2021). NV Бізнес. https://biz.nv.ua/ukr/economics/metro-v-dnipri-budivnictvo-novih-stanciy-prodovzhili-do-2024-roku-novini-ukrajini-50155796.html
13. Boukhemacha, M. A., Gogu, C. R., Serpescu, I., Gaitanaru, D., & Bica, I. (2015). A hydrogeological conceptual approach to study urban groundwater flow in Bucharest city, Romania. *Hydrogeology Journal, 23*(3), 437–450. https://doi.org/10.1007/s10040-014-1220-3
14. Frenelus, W., Peng, H., & Zhang, J. (2021). Evaluation methods for groundwater inflows into rock tunnels: A state-of-the-art review. *International Journal of Hydrology, 5*(4). https://medcraveonline.com/IJH/evaluation-methods-for-groundwater-inflows-into-rock-tunnels-a-state-of-the-art-review.html
15. Butscher, C. (2012). Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology,* 32, 158–167. https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.06.007
16. Nikvar Hassani, A., Katibeh, H., & Farhadian, H. (2016). Numerical analysis of steady-state groundwater inflow into Tabriz line 2 metro tunnel, northwestern Iran, with special consideration of model dimensions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75*(4), 1617–1627. https://doi.org/10.1007/s10064-015-0802-1
17. Nikvar Hassani, A., Farhadian, H., & Katibeh, H. (2018). A comparative study on evaluation of steady-state groundwater inflow into a circular shallow tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology, 73*, 15–25. https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.11.019
18. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проєктування. (2013). Київ: Мінрегіон України.
19. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проєктування. (2013). Київ: Мінрегіон України.
20. ДСТУ 3041-95. Система стандартів у галузі охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання ресурсів. Гідросфера. Використання і охорона води. Терміни та визначення. (1995). Київ: Держстандарт України.
21. Водний кодекс України від 06.06.1995 № 213/95-ВР (з наступними змінами). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80
22. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. (2010). Київ: МОЗ України.
23. Державне агентство водних ресурсів України. (2024). План управління річковим басейном Дніпра. https://davr.gov.ua/

24. European Union Water Initiative Plus for the Eastern Partnership Countries. (2019). Delineation of groundwater bodies in the Dnipro river basin, Ukraine: Final report. Kyiv.
25. Ratov, B., Borash, A., Biletskiy, M., Khomenko, V., Koroviaka, Y., Gusmanova, A., Pashchenko, O., Rastsvietaiev, V., & Matyash, O. (2023). Identifying the operating features of a device for creating implosion impact on the water bearing formation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5*(1(125)), 35–44. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287447
26. Borash, B. R., Biletskiy, M. T., Khomenko, V. L., Koroviaka, Ye. A., & Ratov, B. T. (2023). Optimization of technological parameters of airlift operation when drilling water wells. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu,* (3), 25–31. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/025
27. Chudyk, I., Sudakova, D., Dreus, A., Pavlychenko, A., & Sudakov, A. (2023). Determination of the thermal state of a block gravel filter during its transportation along the borehole. *Mining of Mineral Deposits, 17*(4), 75–82. https://doi.org/10.33271/mining17.04.075
28. Khomenko, V. L., Ratov, B. T., Pashchenko, O. A., Davydenko, O. M., & Borash, B. R. (2023). Justification of drilling parameters of a typical well in the conditions of the Samskoye field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1254*(1), 012052. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012052
29. Khomenko, V., Pashchenko, O., Ratov, B., Kirin, R., Svitlychnyi, S., & Moskalenko, A. (2024). Optimization of the technology of hoisting operations when drilling oil and gas wells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1348*(1). https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/1348/1
30. Садовенко, І. О., Загриценко, А. М., Подвігіна, О. О., & Дерев'ягіна, Н. І. (2017). Керування водним балансом гірського масиву з використанням ємності водоносних горизонтів. *Науковий вісник Національного гірничого університету, 4*(160), 19–26.
31. Tsopa, V., Yavorska, O., Cheberiachko, S., Deryugin, O., & Lantukh, D. (2025). Identifying the mining enterprise units with a significant level of non-compliance with occupational safety requirements using the example of a coal mine. *Mining of Mineral Deposits, 19*(2), 27–37. https://doi.org/10.33271/mining19.02.027
32. Bazaluk, O., Pavlychenko, A., Yavorska, O., Nesterova, O., Cheberiachko, S., Deryugin, O., & Lozynskyi, V. (2024). Improving the risk management process in quality management systems of higher education. *Scientific Reports, 14*, 3977. https://doi.org/10.1038/s41598-024-53455-9

ABSTRACT

Purpose. To substantiate a technological scheme for the collection, treatment and distribution of metro drainage groundwater for industrial water supply purposes, and to develop a mathematical model linking groundwater inflow into underground structures with consumer demand, which makes it possible to determine the rational composition of the scheme and its technical and economic indicators.

The methods. The study combines an analysis of the regulatory framework for the design of metro systems and industrial water supply systems, a generalisation of international experience in managing drainage water from underground transport structures, and economic and mathematical modelling. A balance model of the system "inflow – water treatment – reservoir – consumer" has been developed, taking into account the seasonal irregularity of inflow and demand, water quality constraints expressed as an admissible blending fraction, and the regulating capacity requirement for the reservoir.

Findings. Using the operating 7.8 km line of the Dnipro Metro as a case study, the calculated inflow amounts to about 540 m^3/day (197 thousand m^3/year), whereas the metro's own demand for industrial water covers only 19 % of this volume. A three-stage scheme for the use of drainage

water involving municipal and industrial consumers has been substantiated; it provides a utilisation coefficient of 0.85 and replaces about 167 thousand m³ of potable water per year. The required regulating capacity of the reservoir (350 m^3) and a payback period range of 1.9–6.0 years depending on the tariff have been determined.

The originality. A relationship has been established between the economic efficiency of implementing a water reuse scheme and the combined tariff for water supply and wastewater disposal accounting for capital investments in water treatment and distribution facilities as well as specific operating costs thereby enabling the determination of conditions for the project's economic viability under various tariff scenarios.

Practical implementation. The proposed scheme allows a municipal metro enterprise simultaneously to reduce the cost of potable water and the charges for discharging drainage water into the municipal sewerage system, to decrease the anthropogenic load on the urban drainage network, and to create a backup source of industrial water for community needs in the event of damage to centralised water supply systems.

Keywords: *drainage water, metro, groundwater, industrial water supply, dewatering, balance model, water reuse, urban water balance.*

дата першого надходження статті до видання	16.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	26.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. O. Yavorska, Ye. Koroviaka, V. Khomenko
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.