

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ОПРИСНЕННЯ ВИСОКО МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ШАХТНИХ СТІЧНИХ ВОД ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ДНІПРОВСЬКОГО РЕГІОНУ

УДК 622.22.553.4:519.85

Мамайкін О.Р., канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри гірничої інженерії і освіти, НТУ «Дніпровська політехніка»,
Хорольський А.О., канд. техн. наук,
старший науковий співробітник, Інституту фізики гірничих процесів НАН України,
Горянець В.В.,
студент, НТУ «Дніпровська політехніка»

Всі шахти Європейських країн з геологічними умовами наближеними або такими ж як і в українських реаліях Донецького басейну давно закриті. Шахти, навіть без розвитку гірничих робіт, потребують постійного капіталовкладення, адже порушеність водоносних шарів гірничими виробками призвели до великої концентрації підземних шахтних вод у місцях проведення гірничих робіт.

Природні ресурси еволюційні. Характер і рівень використання природного середовища, як однієї з умов виробництва, визначається рівнем розвитку продуктивних сил і виробничих відносин. Якщо, наприклад, століття тому в Донбасі підземні води, що знаходяться на великій глибині, не знаходили ніякого практичного застосування, то по мірі зростання чисельності населення, високих темпів індустріалізації, у тому числі й внаслідок створення водоемних виробництв, шахтна вода, як продукт спецводокористування, стає цінним та дефіцитним ресурсом. Внаслідок цього виникає потреба її оцінки як додаткового природного ресурсу, який має вартісну форму [1].

Таким чином, обґрунтування параметрів опріснення шахтних стічних вод є актуальною науковою задачею, яка дозволяє підвищити екологічну безпеку Дніпровського регіону.

Обґрунтування параметрів технології очистки шахтних вод дозволить підвищити ефективність вугільного підприємства [2, 3].

Нами було проведено порівняльний аналіз основних методів опріснення, що використовуються у світі. Основні методи було розглянуто відносно регіону Західного Донбасу та реалізації очисного комплексу на території однієї із шахт або їх комплексу. Основним параметром ефективності та раціональності використання того чи іншого опріснювального методу полягає у питомому та загальному споживанні електроенергії на кубічний метр отриманого продукту. Через те, що деякі методи базуються на перетворенні електричної енергії у термічну для забезпечення технологічного процесу дистиляції, було представлено еквівалент електричної енергії для легшого та більш предметного порівняння [4, 5].

У таблиці 1 наведені типовий розмір основних із методів опріснення: СБД – система багатоступінчатої дистиляції, ПД-ТК – парокompресійна дистиляція – термальна компресія пари, ПД-МК – парокompресійна дистиляція – механічна компресія пари, УМВ – установки миттєвого випаровування, ЗО – зворотній осмос та ЕД – електродіаліз. Результати представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз технологій демінералізації шахтних стічних вод

Найменування	СБД	ПД-ТК	УМВ	ПД-МК	ЗО	ЕД
Типовий розмір одиниці, м ³ /д	5.000–15.000	10.000 - 35.000	50.000–70.000	100–2500	24.000	<100-20000
Споживання електроенергії, кВт·г/м ³	1.5–2.5	1.5–2.5	4–6	7–12	3–5.5	6,73
Споживання термальної енергії, кДж/кг	230 (КОВ=10) –	145 (КОВ=16) –	190 (КОВ=12)	відсуне	відсуне	відсуне

	390 (КОВ=6)	390 (КОВ=6)	-390 (КОВ=6)			
Еквівалент електричної енергії, кВт·г/м ³	5–8,5	9,5–25,5	9,5–19,5	відсуне	відсуне	відсуне
Загальне споживання енергії, кВт·г/м ³	6,5–11	11–28	13,5–25,5	7–12	3–3.5 (до 7 з очисткою бором)	6,73 (збільшується із концентрацією солі)

Насамперед, термальна енергія у великій кількості використовується у технологіях, що базуються на переведенні рідини з одного стану в інший.

Однак, в умовах Західного Донбасу з урахуванням місцевості та мети розташування опріснювального комплексу, використання надлишкового тепла з прилеглих територій не представляється можливим. Це зводить системи класу термального опріснення до дуже вузького кола використання, приймаючи до уваги і той фактор, що переважна більшість наукових робіт і практичного досвіду свідчить про раціональне використання дистилюючих методів опріснення для морської або високомінералізованої води.

У роботі пропонується розглянути практичний приклад скидання водних ресурсів на шахті «ім. Сташкова», адже шахта є найбільш обводненою у Західному Донбасі. Водоприток шахти досягає 1600 м³/год у певні проміжки часу, загалом водоприток шахти коливається в межах 1200 м³/год, що є колосальним об'ємом стічних вод з лише одного видобувного підприємства. Скидні шахтні води були перевірені санітарно-профілактичною лабораторією і наведені у таблиці 2 [6].

Таблиця 2

Результати аналітичного контролю шахтної води за 07.03.2021

№ п/п	Найменування контролюваної речовини	Шахтна вода до відстійників	Шахтна вода після відстійників	Нормативи для питної води
1	Алюміній, мг/л	-	<0,02	≤0,2
2	БПК ₅ , мгО ₂ /л	-	5,8	5,2
3	Водневий показний, рН	8,15	8,05	6,5-8,5
4	Жорсткість, мг-екв/л	28,25	27,44	≤7,0
5	Забарвленість, град	10,79	10,35	≤20
6	Залізо загальне, мг/л	0,64	0,63	≤0,2
7	Зважені речовини, мг/л	99,8	41,4	≤0,001
8	Кальцій, мг/л	287,10	279,01	Не визначається
9	Кобальт, мг/л	-	<0,02	<0,1
10	Магній, мг/л	169,30	164,39	Не визначається
11	Марганець, мг/л	-	0,11	Не визначається
12	Мідь, мг/л	-	< 0,002	≤1,0
13	Нафтопродукти, мг/л	0,64	0,62	≤0,1
14	Нітрати, мг/л	<0,5	<0,5	<50,0
15	Поліфосфати, мг/л	-	0,07	≤3,5
16	Сульфати, мг/л	385,58	378,99	≤250
17	Сухий залишок, мг/л	6410,00	6272,67	≤1000
18	Температура, t°C	13,3	13,0	Не визначається
19	Хлор вільний	-	-	≤0,5
20	Хлориди, мг/л	3384,08	3313,79	≤250
21	Цинк, мг/л	-	<0,005	≤1,0

Було виділено три аналітичних контролю шахтної води за перший, другий та третій квартали 2019 року відповідно. Найбільше забруднення спостерігалось за період першого кварталу, тому доцільно обрати дані із найскладнішими умовами, аби установка зворотного осмосу відповідала вибагливим критеріям мінералізованої води.

Зворотній осмос, як система досить чутлива до хімічного та фізичного стану водного ресурсу, вимагає певної первинної обробки води перед її безпосереднім живленням до установки. Традиційні методи попередньої обробки води встановлюються перед подачею води до установки зворотного осмосу. Очищення відбувається від найбільшої фракції до найменшої. Тож попередньо встановлюється дрібні та грубі сітки з розміром 1-100 мм для екранування крупних частинок.

Основні показники на які варто звернути увагу для попередньої очистки наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Параметри первинної обробки води перед подачею до опріснювальної установки

Параметр	Причини первинної обробки
Нефелометричні одиниці каламутності (NTU)	Рівень зважених часток, що перевищує 0,1 мг/л призведе до швидкого засмічення мембран. При значеннях >16 мг/л (>50 NTU) необхідна коагуляція та фільтрування
Індекс щільності осаду (Індекс Лангельє)	При високих показниках >4 первинна обробка є необхідністю, адже індекс вимірює схильність розчину до утворення осаду та наліту
Зважені частки (мг/л)	Параметр дає кількісну характеристику наявності зважених часток у розчині
Залізо (мг/л)	Рівень насиченості залізом важливим для збереження мембрани. Тож для заліза у відновленій формі (Fe(II)) допустима норма концентрації ≤ 2 мг/л, у той час як більш окиснені форми > 0.05 мг/л може згубно впливати на продуктивність
Марганець (мг/л)	Двовалентний марганець Mn(II) $\leq 0,1$ мг/л Більш окиснений манган > 0.02 є шкідливим
Температура	Ефективною температурою є $> 12^{\circ}\text{C}$ та $< 35^{\circ}\text{C}$. Температура нижче призводить до енергетичних втрат, адже густина рідини збільшується. Температура вище за визначену межу посилює мінеральні відкладення та наліт.
Нафта	Концентрація більша за 0.02 мг/л прискорює органічне засмічення мембран
pH	Оптимальна кислотність розчину живлення коливається в межах $\text{pH} > 4$ та $\text{pH} < 11$, тривала дія розчинів іншої кислотності може нанести непоправної шкоди мембранам.

Наступним технологічним процесом є коагуляція та флокуляція, що обумовлюється великим вмістом зважених часток, адже при достатньо малій величині частинки, сили броунівського руху долають гравітаційні сили, що призводить до неможливості використання традиційного відстоювання для повного позбавлення від завислих часток. Розрізняють органічні та неорганічні коагулянти. Неорганічні коагулянти, такі як солі алюмінію та заліза ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, 2FeCl_2) використовуються для нейтралізації зважених частинок. Переваги неорганічних коагулянтів полягають у меншій вартості на одиницю ваги, широкою доступністю на ринку, а також, за належним використанням, дозволяє ефективно позбавлятися зважених частинок [7]. При комбінації коагулянтів із хлоридами, формується дезінфікуючий побічний продукт, що видаляє частину органічних речовин та сполук. Однак, неорганічні коагулянти вимагають високої концентрації лужності, а також потребують необхідного зберігання у стійких до корозії спорудах та обладнаннях.

Полімери відносять до органічних коагулянтів, вони ефективні на ширшому діапазоні кислотності, не поглинають лужність розчину та можуть бути застосовані у менших дозах. Органічні

полімери продукують менший об'єм більш концентрованої суміші флокуваного осаду. Недоліком є ціна, у кілька разів перевищуюча неорганічні солі.

Вибір необхідного флокулянта необхідно проводити методом випробування у мірному циліндрі при симуляції умов опріснювальної станції, а згодом і випробуванням на пілотному проекті-заводу. Беручи до уваги той факт, що наступним технологічним процесом є пом'якшення води, що зумовлює зростання значення рН до позначки у 10-11, раціональним буде використання неорганічних металічних солей заліза та алюмінія.

Процес пом'якшення води базується на принципі хімічної каталізації випадання в осад катіонів кальцію (CaCO_3) та магнію (MgCO_3), що є основними чинниками жорсткості. Так, для води на шахті «ім. Сташкова» жорсткість води склала 27,44 мг-екв/л, що в декілька раз перевищує граничний показник дуже жорсткої води. Аби привести воду до необхідної концентрації, зазвичай використовують вапно (гідроксид кальцію Ca(OH)_2) та кальциновану соду (карбонат натрію Na_2CO_3). Вапно, у свою чергу, видаляє хімічні сполуки карбонатної жорсткості, у той час як кальцинована сода прибирає інші сполуки, що впливають на жорсткість. При насиченості розчину лише карбонатами кальцію, достатньо довести лужність розчину до показника у 10,3-10,6 рН.

Аби окреслити вищезазначені параметри та звести їх до однієї системи підрахунку та підбору необхідного обладнання було використано програмне забезпечення IMSDesign та WinFlows. Наступні рівняння були використані для підрахунку параметрів осмотичної систем.

Для підрахунку продуктивності, собівартості та капітальних інвестицій підприємства демінералізації та водного опріснення було обране програмне забезпечення Desalination Economic Evaluation Program (DEEP), яка була розроблена Міжнародним Агентством Атомної Енергетики та є у відкритому доступі. Програма дозволяє порівняти та вивести закономірності різних конфігурації за різних вхідних умов. У програмі закладено можливість розрахувати не тільки показники зворотного осмосу, але і БСД та УМВ у парі або окремо із розрахунками електростанції, враховуючи тип станції та паливо. Завдяки функціоналу зазначеного програмного забезпечення (рис. 1) можна виконати порівняльну характеристику показників відносно цінового аспекту раціональності використання та підбору того чи іншого обладнання (рисуюнок 2).

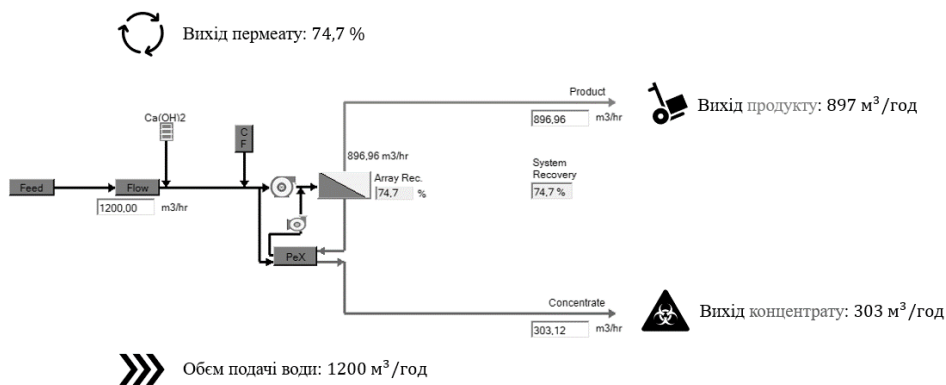


Рис. 1 Технологічні параметри опріснюючої установки

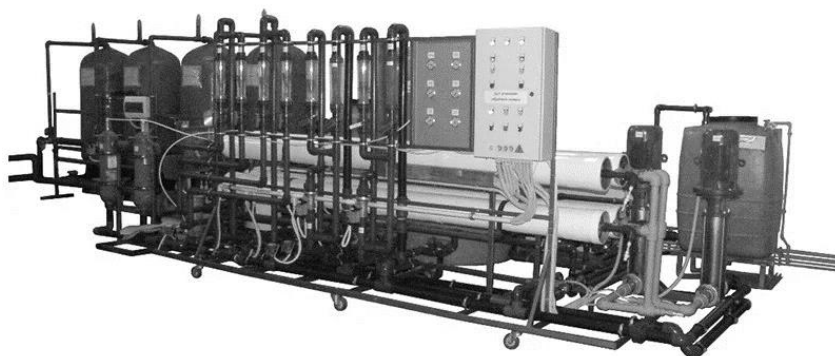


Рис. 2 Загальний вид секції установки прийнятої установки зворотного осмосу LWT-RO-50000 [8]

Оптимальне значення виходу пермеату було обране $R_r=75\%$, аби задовольнити параметри потоку крізь мембрани, різниці зміну тиску та інших (рис. 3).

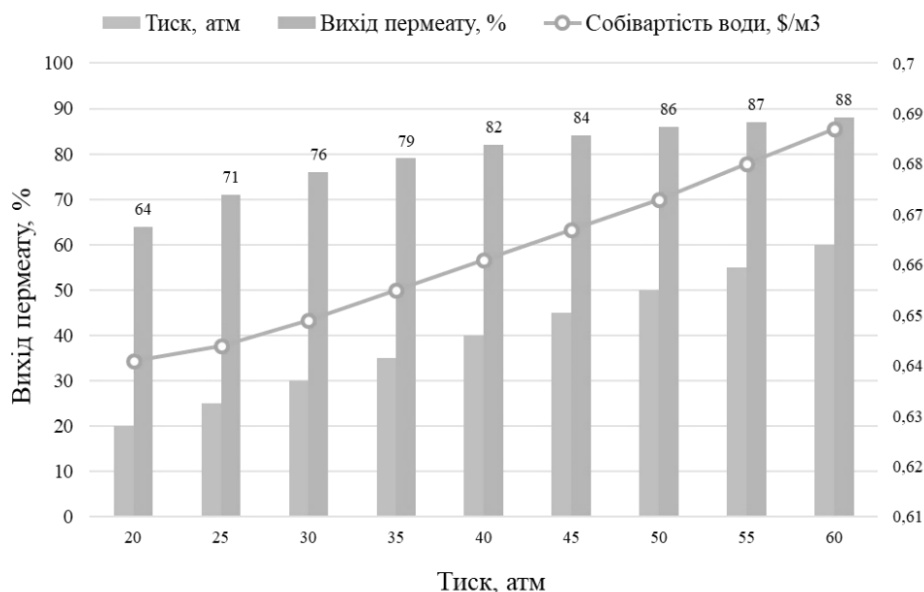


Рис. 3 Графік залежності виходу пермеату (%) та собівартості опріснення вод в залежності від тиску води в системі

Завдяки обміннику тиску, запропонованому у роботі, енергоспоживання скоротилося із 0,99 кВт·г/м³ до 0,80 кВт·г/м³, що дозволяє знизити енергоспоживання на 20%.

За умов, що життєвий цикл підприємства становить 20 років, термін будівництва 12 місяців. Оптимальною ціною продажу прісної води було обрано \$1,2/м³, адже проти фінансового визначення ціни продажу прісної води, важливо враховувати купівельну спроможність споживачів. Тож внутрішня норма прибутку (англ. Internal Rate of Return, IRR) склала IRR=31%. Період окупності складає 3,2 роки.

Через відсутність або значну зношеність інфраструктури водопостачання у регіоні, задля реалізації питної води необхідне проведення трубопроводу до населених та систем центрального водопостачання [9, 10]. Довжина трубопроводу прийнята як теоретична за 30 км, потужність насосного обладнання 1 МВт, термін експлуатації 25 років, будівництво трубопроводу прийнята за 60 місяців. Конструювання трубопроводу додає до собівартості \$0,24, тобто складає майже 30% від ціни [11, 12]. Вирахувана собівартість води не тільки дозволяє отримати позитивний економічний ефект від імплементації очисного комплексу на компенсування витрат на утилізацію скидних шахтних вод [13, 14], але і перспективний прибуток від реалізації чистої питної води кінцевим споживачам [15].

Висновки. В роботі проведено порівняльну характеристику основних методів опріснення, що використовуються у світі. Основні методи було розглянуто відносно регіону Західного Донбасу та реалізації очисного комплексу на території однієї із шахт або їх комплексу. Для практичного застосування у роботі пропонується обрати шахту «ім. Сташкова», як предмет дослідження до використання опріснювального комплексу через великі об'єми забруднених скидних вод (1200 м³/год) та планове закриття вугільного видобутку на шахті з можливою подальшою мокрою або сухою консервацією.

Враховуючи питомі витрати електроенергії, ціну промислової одиниці на одиницю продукції, та економічні показники, було розраховано очікувану собівартість опріснення 28800 м³ води на добу. Вирахувана собівартість води не тільки дозволяє отримати позитивний економічний ефект від імплементації очисного комплексу на компенсування витрат на утилізацію скидних шахтних вод, але і перспективний прибуток від реалізації чистої питної води кінцевим споживачам. Застосування наведеного підходу, який підвищує ефективність очистки шахтних вод дозволяє оцінювати шахтні води, як дієву складову продуктивних потоків вугільних шахт.

Перелік посилань

1. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2018). Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment. In *E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering*. (Vol. 60. p. 00017). EDP Sciences.
doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017
2. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Demchenko Yu. (2019). Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 53-62.
<https://doi.org/10.33271/mining13.04.053>
3. Moldabayev, S., Sultanbekova, Z., Adamchuk, A., & Sarybayev, N. (2019). Method of optimizing cyclic and continuous technology complexes location during finalization of mining deep ore open pit mines. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 19(1.3), 407–414.
<https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.3/S03.052>
4. Babets, Ye. K., Adamchuk, A. A., Shustov, O. O., Anisimov, O. O., & Dmytruk, O. O. (2020). Determining conditions of using draglines in single-tier internal dump formation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 5–14.
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/005>
5. Хорольський, А. О., Гріньов, В. Г., & Мамайкін, О. Р. (2019). Інноваційні перспективи підземної експлуатації вугільних родовищ. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. Серія: Технічні науки, (1 (83)), 289-298.
[https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-289-298](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-289-298)
6. Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10) МОЗ України; Наказ, Норми, Правила від 12.05.2010 № 400
7. *Use of freshwater resources in Europe*. (n.d.) Retrieved December 17, 2020, from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/use-of-freshwater-resources-3/assessment-4>
8. *Установка обратного осмоса*. (n.d.) Retrieved December 17, 2020, from <http://www.lwt.com.ua/oborudovanie/itemlist/category/20-ustanovki-obratnogo-osmosa-ro.html>
9. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Fomychova, L. (2020). Research into optimization model for balancing the technological flows at mining enterprises. *E3S Web Of Conferences*, 201, 01030.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101030>
10. Khorolskyi, A., Hrinov, V., & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463-471.
11. Гріньов, В. Г., Хорольський, А. О., & Каліущенко, О. П. (2019). Розроблення екологічних сценаріїв ефективного освоєння цінних родовищ корисних копалин. *Мінеральні ресурси України*, (2), 46-50.
12. Хорольський, А. О., Гріньов, В. Г., & Мамайкін, О. Р. (2019). Інноваційні перспективи підземної експлуатації вугільних родовищ. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*, (1(83)), 289–298.
[https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-289-298](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-289-298)
13. Karabyn, V., Shtain, B. and Popovych, V. (2018), «Thermal regimes of spontaneous firing coal washing waste sites», *News of the National Academy. Geology and Technical sciences*, Vol. 429, Kazakhstan, pp. 64–74.
14. Starodub, Y., Karabyn, V., Havrys, A., Shainoga, I. and Samberg, A. (2018), «Flood risk assessment of Chervonograd mining-industrial district», *Remote Sensing*, Germany.
15. Starodub, Y., Karpenko, V., Karabyn, V., & Shuryhin, V. (2020, September). Mathematical Modeling of the Earth Heat Processes for the Purposes of Eco-technology and Civil Safety. In *2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (Vol. 1, pp. 146-149). IEEE.