

© А.О. Хорольський¹, В.В. Лапко², В.С. Саллі², О.Р. Мамайкін²

¹ Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України, Дніпро, Україна

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ДЕМІНЕРАЛІЗАЦІЇ СТИЧНИХ ВОД, ЯК СКЛАДОВОЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОТОКІВ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

© A. Khorolskyi¹, V. Lapko², V. Salli², O. Mamaikin²

¹ Institute for Physics of Mining Processes the National Academy Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGY OF DEMINERALIZATION OF WASTEWATER AS A COMPONENT OF TECHNOLOGICAL FLOWS OF COAL MINES

Мета. Запропонувати технологію очистки стічних шахтних вод для умов Західного Донбасу.

Методика. Проведено порівняльний аналіз різних технологій очистки шахтних стічних вод, а також запропоновано критерії оцінки. На основі застосування спеціалізованого програмного забезпечення обґрунтовано область застосування різних технологій очистки та проведено розрахунок питомої собівартості очистки.

Результати. В роботі проведено порівняльну характеристику основних методів опріснення, що використовуються у світі. Основним параметром оцінки ефективності технологічного методу було обрано питоме споживання електроенергії на 1 м³ продукту. У роботі представлено розрахунок капітальних інвестицій, методологія оцінки об'єму експлуатаційних та капітальних вкладень, а також визначено основні економічні показники кошторису комплексу демінералізації шахтних скидних вод.

Наукова новизна. Запропоновано нову модель, яка описує виробничу діяльність підземного комплексу гірничих робіт з доставки на поверхню чотирьох продуктивних компонентів. Цими компонентами є вугілля, порода, газ метан і шахтна вода. Враховуючи їх стохастичний характер, прийнято для математичного опису процесів переміщення вугілля (C), породи (R), газу метану (G) та води (W) уявити їх у вигляді потоків в деякій технологічній системі перетворювачів і в тому числі при диверсифікації гірничого виробництва. При цьому метою перетворень є отримання основних і додаткових ресурсів сировини, а також мінімізація екологічного збитку. Вперше вода розглядається, як продуктивний потік у структурі продуктивних потоків вугільних шахт. Обґрунтування параметрів технології очистки шахтних вод дозволить підвищити ефективність вугільного підприємства.

Практична значимість. 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. Для повноцінного та ефективного використання зворотного осмосу було розглянуто та обрано комплекс робіт із попередньої очистки, екранування, коагуляції та флокуляції, пом'якшення та седиментації (відстоювання) води.

Ключові слова: продуктивний потік, демінералізація, стічні води, зворотний осмос, ефективність, критерій.

Вступ. Всі шахти Європейських країн з геологічними умовами наближеними або такими ж як і в українських реаліях Донецького басейну давно закриті. Головною причиною закриття шахт стала нерентабельність підприємств та навантаження на бюджет, адже екологічний аспект не був нагальною темою ще 30 років тому. Наймасштабнішою задачею, що може принести із собою закриття цілої низки шахтних підприємств, є реінтеграція цілих міст та містечок та перепрофілювання працездатного населення. Також, 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 водосмних 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, через дослідження складових продуктивних потоків вугільних шахт є актуальною науковою задачею.

Основна частина. У відповідності до визначеної задачі формується послідовність етапів дослідження: на першому етапі – розроблялась модель, яка враховує продуктивні потоки; на другому етапі – аналізувались технології очистки шахтних вод; на третьому – обиралась технологія та обґрунтовувались її параметри.

Як відомо результатом виробничої діяльності підземного комплексу гірничих робіт є доставка на поверхню трьох продуктивних компонентів, які з позицій раціонального ресурсо- і природокористування можуть бути розглянуті як чинники, які можуть робити негативний вплив на доцільність інвестування. Цими компонентами є вугілля, порода і газ метан. Враховуючи їх динамічний характер, доцільно для математичного опису процесів переміщення вугілля (C), породи (R), газу метану (G) та води (W) уявити їх у вигляді потоків в деякій технологічній системі перетворювачів. При цьому метою перетворень є отримання основних і додаткових ресурсів сировини, а також мінімізація екологічного збитку [2-4].

Основним методом дослідження моделі є метод багатовимірної статистичного аналізу. З урахуванням цих вимог введемо такі позначення

$$K_9 = \left\{ \frac{D_{pi}}{D_{Di}}, \frac{\alpha_{Di}}{\alpha_{pi}}, \frac{\sum \Pi_i}{\sum \Sigma_i}, \frac{V_{\Pi_i}}{V_i}, \frac{\sum \Sigma_{\Pi_i}}{\sum V_{\Pi_i}}, \frac{Q_{Bi}}{Q_i}, \frac{\sum \Sigma_{Bi}}{\sum V_{\Sigma_i}}, \frac{D_{Bi}}{V_i}, \frac{Q_{Bi*}}{Q_{i*}}, \frac{\sum \Sigma_{Bi*}}{\sum V_{\Sigma_{i*}}}, \frac{D_{Bi*}}{V_{i*}} \right\} \quad (1)$$

де α – показник якості вугілля (зольність), %;

Таким чином, результативну ознаку для i -ої шахти можна представити:

$$K_e = \left\{ \begin{array}{l} \frac{D_{pi}}{D_{Di}} Z_{i1}, \frac{\alpha_{Di}}{\alpha_{pi}} Z_{i2}, \frac{\sum \Pi_i}{\sum \Sigma_i} Z_{i3}, \frac{V_{Pi}}{V_i} Z_{i4}, \frac{\sum \Sigma_{Pi}}{\sum Y_{Pi}} Z_{i5}, \frac{Q_{Bi}}{Q_i} Z_{i6}, \frac{\sum \Sigma_{Bi}}{\sum Y_{\Sigma_i}} Z_{i7}, \\ \frac{D_{Bi}}{V_i} Z_{i8}, \frac{Q_{Bi^*}}{Q_{i^*}} Z_{i9}, \frac{\sum \Sigma_{Bi^*}}{\sum Y_{\Sigma_{i^*}}} Z_{i10}, \frac{D_{Bi^*}}{V_{i^*}} Z_{i11} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Вираз (2) дозволяє урахувати стабільність технологічних потоків, а також якість продукції, що надходить із шахти.

Для того, щоб можна було порівняти результат дії певного параметра на обсяг значення X_{ij} зводяться в матриці у вигляді стандартизованих ознак. Стандартизація проводиться загальноприйнятими методами за допомогою середньоарифметичних значень і середньоквадратичних відхилень.

З точки зору комплексності оцінки роботи шахт, обсяг видобутку відіграє досить важливу роль, але не визначальну. Особливо це проявляється в плані якісних характеристик вугілля і значить в обсягах товарної продукції і в співвідношенні видаваної і переробленої (залишеної в шахті) породи. На жаль, попутний видобуток метану протягом останніх років практично не ведеться. Ця обставина не підвищує рейтинг технологічних схем шахт регіону [5].

Вхідними параметрами, зовнішніми умовами такої системи є наступні.

Для потоку C (вугілля):

D_i – обсяг видобутку кожної i -ї шахти з урахуванням витрат (т/рік);

D_m – обсяг товарної продукції, т/рік;

A_i – якість вугілля, що видобувається (зольність, %);

Для потоку R (породи):

V_i – обсяг породи, що видається на поверхню, т;

V_n – обсяг породи, що переробляється, т.

Для потоку G (газ):

Q_i – прогнозний (можливий) обсяг виходу метану, m^3 /рік;

Q_n – обсяг метану, що переробляється, m^3 /рік.

Для потоку W (вода):

Q_{i^*} – прогнозний (можливий) обсяг відкачуваної води, m^3 /рік;

Q_{n^*} – обсяг води, яка опріснюється, m^3 /рік.

Цільовою функцією такої системи буде максимізація вихідних параметрів (відносин перетворень) з оптимальним їх розподілом усередині системи (відносин зв'язків).

Умова оптимальності для відношення перетворень

$$K_{оп} = \max\{D, A, V, Q\} \quad (3)$$

Крім того, як указувалося вище для дослідження відносин зв'язку слід виконувати їх оптимізацію, що в окремому випадку є задачею пошуку оптимального розподілу потоків вугілля між шахтами і збагачувальними фабриками.

З урахуванням викладених вище умов можна сформулювати основну вимогу до моделі, що формалізується: рішення моделі повинне дозволяти виробляти порівняння результативності роботи всіх шахт регіону.

Таким чином в роботі вперше вода розглядається, як продуктивний потік у структурі продуктивних потоків вугільних шахт. Обґрунтування параметрів технології очистки шахтних вод дозволить підвищити ефективність вугільного підприємства.

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.

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)–390 (КОВ=6)	145 (КОВ=16)–390 (КОВ=6)	190 (КОВ=12)–390 (КОВ=6)	відсуне	відсуне	відсуне
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. Такі технології представляється вдалим використовувати за наявності відпрацьованої термальної енергії (енергії або пари з електростанції), геотермальної або відновлюваної енергії (рисунки 1, 2).

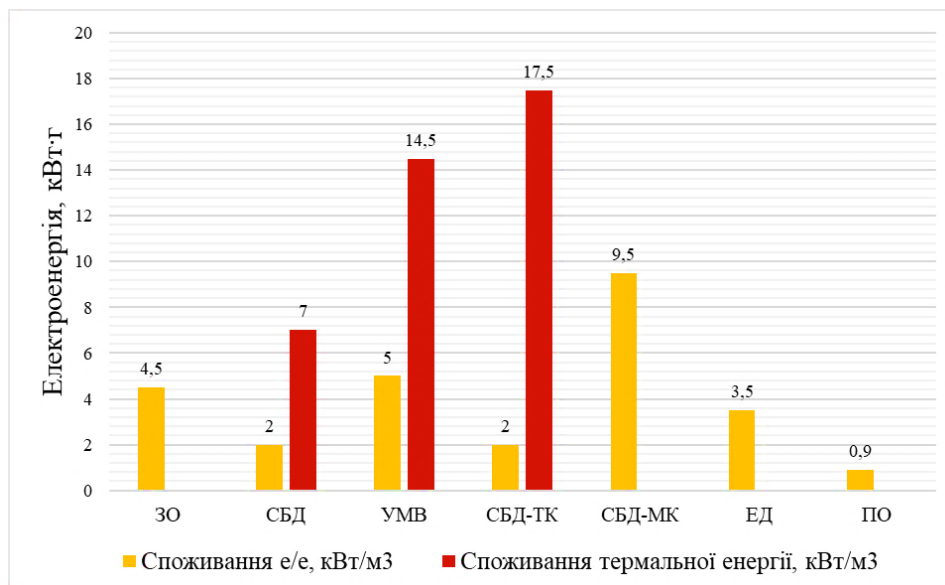


Рис. 1. Графік використання термо- та електроенергії на виробництво 1 м³ опрісненої води

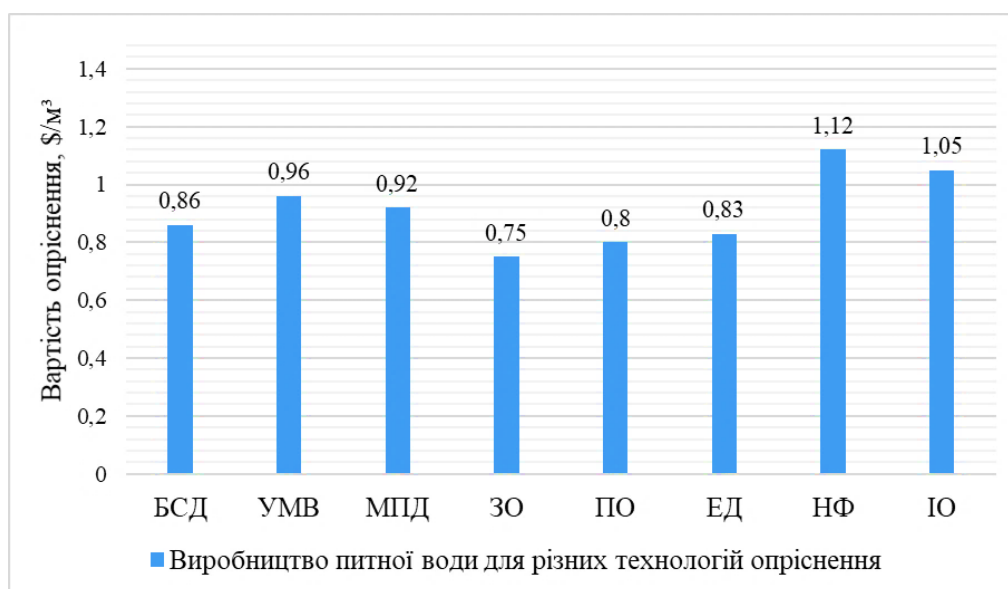


Рис. 2. Графік вартості виробництва 1 м³ прісної води для різноманітних опріснювальних технологій

Однак, в умовах Західного Донбасу з урахуванням місцевості та мети розташування опріснювального комплексу, використання надлишкового тепла з приле-

глих 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 07.03.2019

№ п/п	Найменування контрольованої 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 необхідною, 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 pH >4 та 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 флокулового 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 проєкті-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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$) 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 (рис. 3). Наступні рівняння були використані для підрахунку параметрів осмотичної систем.

SUEZ Water Technologies & Solutions									
Winflows Version 3.3.3			Results Summary				DataBase Version 3,22		
Flow Data		m3/hr		Analytical Data		mg/L			
Raw Feed:		1200,00		Raw Feed TDS		643			
Product:		891,07		Product TDS		4			
Concentrate:		309,01		Concentrate TDS		2498			
System Data		Single Pass Design							
Temperature:	C	RO-1:	13,00			System Rec.		74,3 %	
Average Flux (lmh), Pass and Stage									
Pass	Average		Stage 1	Stage 2					
Pass 1	25,41		31,89	14,39					
Array Data									
Recovery %:	78,00	Conc. TDS(mg/l):	24980,34	Conc. Flow:	309,01	m3/hr			
Stage	Total		Element Type	Flow, m3/hr		Pressure, atm		Per TD mg	
	Housing	Element		Feed	Perm	Feed	DP		
1	90	540	AG-440	1200,00	703,99	24,00	1,44	2	
2	53	318	AG-440	496,05	187,08	22,56	1,07	13	
Total	143	858							
Analytical data									
Cation	Product	mg/l		Anion	Product	mg/l		C	
		Feed	Conc			Feed	C		
Ca	0,67	327,48	1213,22	SO4	0,45	400,72	148		
Mg	0,23	173,86	644,43	Cl	28,07	3676,03	1356		
Na	17,72	1982,18	7306,41	F	0,00	0,00			
K	0,10	2,06	7,38	NO3	0,01	0,32			

Рис. 3. Фрагмент робочого вікна програми при розрахунку параметрів установки зворотного осмосу

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 конфігурацій за різних вхідних умов. У програмі закладено можливість розрахувати не тільки показники зворотного осмосу (рис. 4), але і БСД та УМВ у парі або окремо із розрахунками електростанції, враховуючи тип станції (рис. 5) та паливо. Завдяки функціоналу зазначеного програмного забезпечення можна виконати порівняльну характеристику показників відносно цінового аспекту раціональності використання та підбору того чи іншого обладнання (рис. 6).

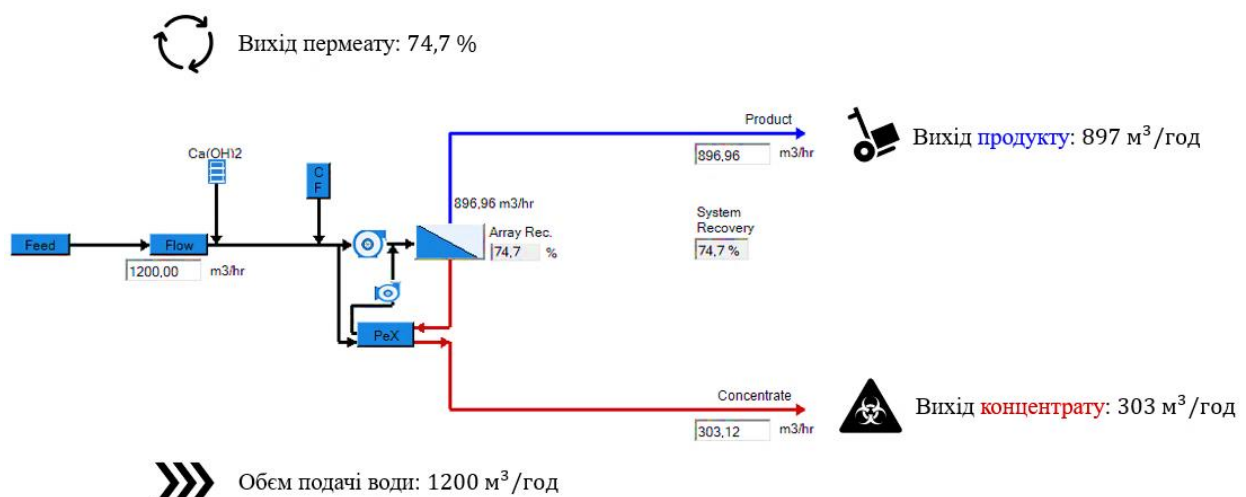


Рис. 4. Технологічні параметри опріснюючої установки



Рис. 5. 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.

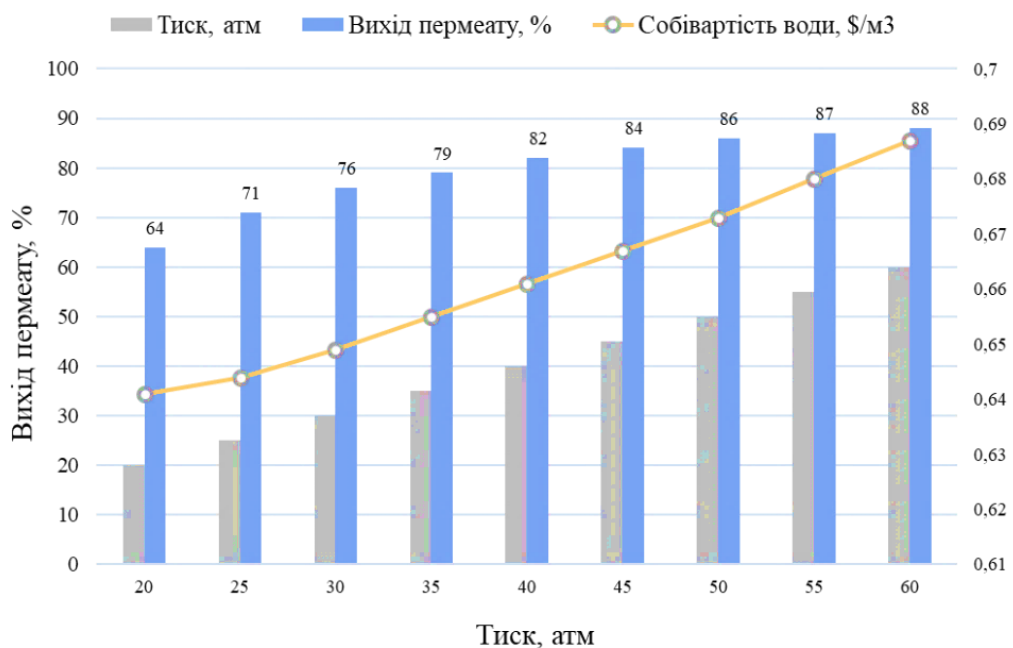


Рис. 6. Графік залежності виходу пермеату (%) та собівартості опріснення вод в залежності від тиску води в системі

Завдяки обміннику тиску, запропонованому у роботі, енергоспоживання скоротилося із $0,99 \text{ кВт}\cdot\text{г}/\text{м}^3$ до $0,80 \text{ кВт}\cdot\text{г}/\text{м}^3$, 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 $\$1,2/\text{м}^3$, адже проти фінансового визначення ціни продажу прісної води, важливо враховувати купівельну спроможність споживачів. Тож внутрішня норма прибутку (англ. Internal Rate of Return, IRR) склала $\text{IRR}=31\%$. 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. 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. 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 [9, 10].

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.
<https://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., Грін'юв, 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.

АННОТАЦИЯ

Цель. Предложить технологию очистки сточных шахтных вод для условий Западного Донбасса.

Методика. Проведен сравнительный анализ различных технологий очистки шахтных сточных вод, а также предложены критерии оценки. На основе применения специализированного программного обеспечения обоснованно область применения различных технологий очистки и проведен расчет удельной себестоимости очистки.

Результаты. В работе проведена сравнительная характеристика основных методов опреснения, используемых в мире. Основным параметром оценки эффективности технологического метода был избран удельное потребление электроэнергии на 1 м³ продукта. В работе представлены расчет капитальных инвестиций, методология оценки объема эксплуатационных и капитальных вложений, а также определены основные экономические показатели сметы комплекса деминерализации шахтных сточных вод.

Научная новизна. Предложена новая модель, которая описывает производственную деятельность подземного комплекса горных работ по доставке на поверхность четырех производительных компонентов. Этими компонентами являются уголь, порода, газ метан и шахтная вода. Учитывая их стохастический характер, принято для математического описания процессов перемещения угля (*C*), породы (*R*), метана (*G*) и воды (*W*) представить их в виде потоков в некоторой технологической системе преобразователей и в том числе при диверсификации горного производства. При этом целью преобразований является получение основных и дополнительных ресурсов сырья, а также минимизация экологического ущерба. Впервые вода рассматривается как продуктивный поток в структуре производительных потоков угольных шахт. Обоснование параметров технологии очистки шахтных вод позволит повысить эффективность угольного предприятия.

Практическая значимость. Для практического применения в работе предлагается выбрать шахту «им. Сташкова», как предмет исследования к использованию опреснительного комплекса через большие объемы загрязненных сбросных вод (1200 м³/час.) и плановое закрытие угольной добычи на шахте с возможной последующей мокрой или сухой консервацией. Для полноценного и эффективного использования обратного осмоса были рассмотрены и избран комплекс работ по предварительной очистке, экранированию, коагуляции и флокуляции, смягчения и седиментации (отстаивание) воды.

Ключевые слова: продуктивный поток, деминерализация, сточные воды, обратный осмос, эффективность, критерий.

ABSTRACT

Purpose. Propose a technology for the treatment of mine wastewater for the conditions of Western Donbass.

The methods. A comparative analysis of various technologies for treating mine wastewater has been carried out, as well as evaluation criteria have been proposed. Based on the use of specialized software, the scope of application of various purification technologies is justified and the calculation of the unit cost of purification is carried out.

Findings. The paper provides a comparative characteristic of the main methods of desalination used in the world. The main parameter for assessing the effectiveness of the technological method was selected specific electricity consumption per 1 m³ of the product. The paper presents the calculation of capital investments, the methodology for assessing the volume of operational and capital investments, and also defines the main economic indicators of the estimate of the mine wastewater demineralization complex.

The originality. A new model is proposed that describes the production activity of an underground mining complex for the delivery of four productive components to the surface. These components are coal, rock, methane gas and mine water. Considering their stochastic nature, it is customary for the mathematical description of the processes of movement of coal (*C*), rock (*R*), methane (*G*) and water (*W*) to represent them as flows in a certain technological system of converters, including during the diversification of mining. At the same time, the purpose of the transformations is to obtain basic and additional resources of raw materials, as well as to minimize environmental damage. For the first time, water is considered as a productive flow in the structure of productive flows of coal mines. Justification of the parameters of mine water treatment technology will improve the efficiency of the coal enterprise.

Practical implimentation. For practical application in the work, it is proposed to choose the Stashkov mine as a subject of research for the use of a desalination complex through large volumes of contaminated wastewater (1200 m³/h) and the planned closure of coal mining at the mine with possible subsequent wet or dry conservation. For the full and effective use of reverse osmosis, a set of works on preliminary treatment, screening, coagulation and flocculation, softening and sedimentation (sedimentation) of water were considered and selected.

Key words: *productive flow, demineralization, wastewater, reverse osmosis, efficiency, criterion.*