

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2023.06.059>

УДК 541.183:621.182.12:628.16:628.1.034:628.165

О.В. Мамченко

Т.А. Пахар

А.М. Сова

Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, Київ

E-mail: expo@ukr.net, pakhartikhv34@gmail.com

Порівняння техніко-економічних показників баромембранної та іонообмінної технологій знесолення води

Визначено капітальні витрати на реалізацію запропонованого раніше ресурсозберігального маловідходного методу комбінованого пом'якшення, опріснення та знесолення води. Розрахунки виконано щодо одного, важливого етапу оброблення води — її знесолення. Показано, що незалежно від виробників і продавців мембран та апаратів усі дані задовільно описуються одними і тими самими кривими. У логарифмічних координатах функції вартості мембран і апаратів від їхньої продуктивності лінійні за високих коефіцієнтів кореляції, мають практично однакові кутові коефіцієнти (0,66 і 0,71 відповідно), а прямі близькі до паралельних і відстоять одна від одної на 1 од. Це свідчить про те, що вартість мембран у середньому в десять разів менша від ціни зворотньоосмотичної установки незалежно від продуктивності обладнання. Розглянуто варіант реалізації процесу з використанням зворотньоосмотичної установки та концентрування ретентату для подальшого застосування або перероблення на утилізовані продукти на водопідготовчій установці (ВПУ). Встановлено, що достатнє концентрування ретентату досягається лише у п'ять зворотньоосмотичних щаблів. Вартість устаткування концентрування ретентату становить 25—28 % капітальних витрат на зворотньоосмотичну установку і неістотно збільшується зі зростанням продуктивності ВПУ. У разі комплектації ВПУ зворотньоосмотичними модулями продуктивністю, що дорівнює продуктивності установки в цілому, або 100 м³/год капітальні витрати приблизно однакові. Зі зменшенням продуктивності модуля до величини, поширеної на ринку (40—48 м³/год і менше), вартість ВПУ зростає. Проведений комплекс обчислень показав, що раціональним варіантом комплектації ВПУ є застосування зворотньоосмотичного обладнання продуктивністю 80—100 м³/год, яке виготовляється на замовлення. Іонообмінні установки за капітальними витратами поступаються зворотньоосмотичним. Однак це стосується установок, оснащених модулями продуктивністю 80 м³/год і більше. За меншої продуктивності модулів перевага зворотного осмосу втрачається. За потужності модулів менш ніж 50 м³/год зворотний осмос за капітальними витратами неконкурентоспроможний з іонним обміном.

Ключові слова: пом'якшення, опріснення, знесолення води, мембрани, зворотньоосмотична установка, продуктивність обладнання.

Цит у в а н н я: Мамченко О.В., Пахар Т.А., Сова А.М. Порівняння техніко-економічних показників баромембранної та іонообмінної технологій знесолення води. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2023. № 6. С. 59—69. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2023.06.059>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Основними сучасними методами знесолення води є зворотний осмос (ЗО) та іонообмінна технологія. Хоча вони використовуються досить давно, їх техніко-економічне порівняння потребує постійного оновлення. Це пов'язано зі зміною вартості іонітів і мембран, вдосконаленням технологій їх використання та виробництвом нових матеріалів. У зв'язку з цим метою дослідження стало порівняння техніко-економічних показників сучасних баромембранної та іонообмінної технологій знесолення води.

Методи вирішення такого завдання полягали у зборі й узагальненні відомостей про вартість, продуктивність, термін задовільної експлуатації мембранних і іонообмінних матеріалів та обладнання для їх використання, знаходженні та порівнні кількісних залежностей між ними.

Нами розраховано капітальні та експлуатаційні витрати для традиційної тріступінчастої схеми знесолення води іонітами і баромембранної технології: одноступінчастого опріснення води ЗО з повним знесоленням на іонообмінному фільтрі змішаної дії. У всіх випадках попереднє оброблення води передбачалося в освітлювачах з вапнуванням, коагуляцією та подальшим механічним фільтруванням. Встановлено, що іонообмінна технологія має явні економічні переваги. Вартість обладнання у всіх варіантах зів'язана. Однак через високу ціну та малий гарантійний термін служби мембран, синтезованих з органічних матеріалів, експлуатаційні витрати у разі застосування баромембранної технології не менше ніж у 2—6 разів перевищують аналогічні для іонного обміну.

У класичному варіанті [1, 2] іонообмінна технологія знесолення води реалізується у такий спосіб. Оскільки для промислового водопостачання використовують природну воду з поверхневих джерел, що має значну каламутність і кольоровість, її потік подається в освітлювач, де рідина вивільняється від більшості сполук, що надають їй каламутності та кольоровості. Ефективність роботи освітлювача забезпечують дозуванням одного або суміші Al- чи Fe-вмісних коагулянтів [1, 2]. Залежно від лужності і жорсткості вихідної води в ній можуть дозуватися вапно або суміш вапна та кальцинованої соди. Освітлення води завершується в механічному фільтрі [1, 2]. Знесолення води іонітами проводиться на Н-катионообмінному фільтрі першого ступеня, завантаженому сульфокатіонітом, ОН-аніонітному фільтрі першого ступеня зі слабоосновним аніонітом, Н- і ОН-фільтрах другого ступеня, що містять відповідно сильні катіоніт та аніоніт. Після ОН-фільтрів першого ступеня в декарбонізаторі з води видаляють вуглекислоту. Глибоке знесолення завершується у фільтрі змішаної дії (ФЗД) із сумішшю сильно дисоційованих катіоніту та аніоніту. В результаті отримують воду, придатну для підживлення як барабанних, так і прямотруминних парових котлів середнього, високого та надкритичного тиску, якими укомплектовані вітчизняні ТЕС і АЕС [2].

Зворотноосмотичні мембрани більш чутливі до наявності завислих речовин у воді, ніж іоніти. Те саме стосується ультрафільтраційних мембран. Хоча останні призначені для видалення завислих речовин, вони легко пошкоджуються дисперсіями з абразивними властивостями (іржа, завантаження механічних фільтрів). Проте мембрани значно розширюють можливості знесолення води, даючи змогу опріснити морську та океанську воду. Табл. 1 ілюструє ці твердження.

Згідно з нормативними документами [1, 2], солевміст глибоко знесоленої води не повинен перевищувати $0,1 \text{ мг/дм}^3$ (питома електропровідність $0,3\text{—}0,4 \text{ мкСм/см}$) і концентрація H_2SiO_3 має становити не більш ніж $0,02 \text{ мг/дм}^3$. Вода такої якості відповідає вимогам до підживлювальної води прямотруминних котлів надкритичного тиску і тим більше барабанних котлів.

Для реалізації баромембранної технології використовуються дво- та триступінчасті схеми, що включають один або два послідовно з'єднані ЗО і ФЗД. Триступінчаста схема збільшує надійність експлуатації водопідготовчої установки (ВПУ): у разі пошкодження мембран у першому по ходу води апараті якість оброблення рідини підтримує другий апарат. Крім того, двоступінчаста організація процесу ЗО зменшує частоту регенерації ФЗД до рівня технології знесолення води іонітами. Число апаратів на кожній стадії оброблення води має бути не менше трьох, з них — два у роботі, третій — на регенерації (промиванні) або в резерві. У табл. 2, 3 наведені прийняті під час розрахунків основні технологічні характеристики процесу знесолення води іонітами. Відмивання іонітів у ФЗД від регенерувальних агентів і поділ сорбентів перед регенерацією здійснюється водою, очищеною на

Таблиця 1. Вимоги до води, що подається на установки іонного обміну, зворотного осмосу (ЗО) та ультрафільтрації (УФ)

Показник	Одиниці виміру	Технологічний процес				
		Іонний обмін			ЗО	УФ
		Coflow, Splitflow, RFR, Liftbett	Upcore™	Amberpack™, Schwebbett		
Тиск сирієї води	мПа	0,5—6 ¹	0,5—6 ¹	0,5—6 ¹	0,2—3,5 ²	0,2—0,6
Температура, не більше	°С	35 ³ ; 60 ⁴ ; 120 ⁵	Те саме	Те саме	5—35; 4—30; 4—40	30
Водневий показник	pH	0—14	0—14	0—14	4—10; 2—12	4—10; 2—12
Кольоровість, не більше	град	30	20—35	20	25	27,5—30
Каламутність, не більше	ЕМФ	8	2,6—3,5	2,6	0,5	5 ¹
Перманганатна окиснюваність, не більше	мгО/дм ³	7	5	5	3—4; 25	4 ⁶
Залізо загальне, не більше	мг/дм ³	1 ⁷ ; 0,3 ⁸ ; 0,1 ⁸ ; 0,5 ⁸	Те саме	Те саме	0,1 ³ ; 5	0,1
Жорсткість, не більше	ммоль/дм ³	7,0—10 ^{9;10}	7—10 ^{9;10}	7,0	0,3 ² ; 3,0 ¹¹	3 ⁶
Манган, не більше	мг/дм ³	0,1 ⁷ ; 1 ⁶ ; 15 ^{7,8}	Те саме	Те саме	0,05; 0,1; 0,1—0,3	0,05 ⁶
Загальний солеміст, не більше	мг/дм ³	До 1500—2000	Те саме	Те саме	Не нормується	Не нормується
Вміст кислоти у регенераційному розчині	% мас.	0,2—3 ⁹ ; 5 ¹⁰	Те саме	Те саме	—	—
Макимальне навантаження за завислими речовинами	кг/м ² (за 1 цикл)	6 ¹¹	0,5 ¹¹	0,2 ¹¹	0,05 ¹¹	5

¹ Завислі речовини з розміром частинок понад 5 мкм. ² У разі дозування антискаланту. ³ У разі використання поліакрилових аніонітів та сильноосновних аніонітів типу 2. ⁴ У разі знесолення води із застосуванням сильноосновних поліакрилових аніонітів. ⁵ У разі знесолення води із застосуванням сильноосновних аніонітів типу 1. ⁶ У разі пом'якшення води. ⁷ У системах полірування конденсату. ⁸ У системах пом'якшення води та видалення нітратів. ⁹ У разі демінералізації води з регенерацією катіоніту H₂SO₄. ¹⁰ У разі демінералізації води з регенерацією катіоніту HCl. ¹¹ Перевищення значень зазначених показників потребує додаткового попереднього очищення води.

попередній стадії. В установках з аніонітними фільтрами другого ступеня, завантаженими сильноосновним аніонітом, аніонітні фільтри першого ступеня регенерують відпрацьованим розчином їдкою натру після регенерації аніонітних фільтрів другого ступеня.

Табл. 2 містить відомості про властивості [3] і ціни різних сульфокатіонітів, що випускаються як українським (Черкаське ПрАТ “Азот”) [4], так і зарубіжними підприємствами. Як впливає з таблиці, за робочою обмінною ємністю сульфокатіоніти можна розділити на

Таблиця 2. Динамічна обмінна ємність (ДОЄ) сульфокатіонітів та їх вартісні характеристики. Розрахунки проведено за даними [3]

Статистичний параметр	ДОЄ іонітів, моль/м ³			Вартість 1 м ³ іоніту, грн			Вартість 1 моль ДОЄ іоніту, грн		
	Сульфовугілля	КУ 2-8	Аналоги КУ 2-8	Сульфовугілля	КУ 2-8	Аналоги КУ 2-8	Сульфовугілля	КУ 2-8	Аналоги КУ 2-8
min	232	430	365	14729	17600	57360	63	41	157
max	290	480	480	28333	91200	133480	98	190	278
Середнє	248	453	436	20795	37547	91603	84	83	210
Стандартне відхилення	19	20	27	5107	20873	24248	21	53	56
Кількість величин, що усереднюються	5	6	20	14	15	32	5	6	20
Довірчий інтервал за рівня значущості									
0,9	0,90	1,01	0,76	172	677	539	1,2	2,7	1,6
0,99	0,10	0,10	0,08	17	68	54	0,1	0,3	0,2

Таблиця 3. Технологічні характеристики сильноосновних аніонітів за результатами статистичного оброблення даних. Розрахунки проведено за даними [3]

Статистичний параметр	Полістирольні аніоніти типу 1		Полістирольні аніоніти типу 2		Поліакрилові аніоніти	
	ДОЄ, моль/м ³	Питомі витрати води на відмивання, м ³ /м ³	ДОЄ, моль/м ³	Питомі витрати води на відмивання, м ³ /м ³	ДОЄ, моль/м ³	Питомі витрати води на відмивання, м ³ /м ³
min	515	3	650	7	320	7
max	770	10	900	14	720	9
Середнє	676	7	788	10	561	8
Кількість величин, що усереднюються	8	4	5	5	4	4
Стандартне відхилення	75	3	111	3	92	2
Довірчий інтервал за рівня значущості						
0,90	3	0,2	6	0,12	6	0,12
0,99	0,3	0,02	0,6	0,01	0,6	0,01

дві групи: сульфовугілля та іоніти, синтезовані на основі кополімерів стиролу і дивінілбензолу. Сульфовугілля значно поступається за величиною робочої обмінної ємності полімеризаційним іонітам, однак за визначальним економічну доцільність застосування сорбенту показником — вартість 1 моля динамічної (близької до робочої) обмінної ємності (ДОЄ) іоніту — лише в 1,5 рази поступається іоніту КУ 2-8 українського виробництва за мінімальною вартістю і значно краще за імпорتنі полімерні сульфокатіоніти. Цим пояснюється широкое використання сульфовугілля на ТЕС, особливо з малою продуктивністю ВПУ.

Згідно з РД 2021 і ТУ У 02071045-001-98 і ТУ У 00013579-001-99 щодо вимог до якості катіонітів компаній “Purolite”, “Rohm and Haas” та “Dow Chemical” відповідно, усі полімеризаційні сульфокатіоніти мають високу осмотичну стабільність (не менш як 98), близькі значення ДОЄ і потребують невеликих питомих витрат води на відмивання матеріалу після регенерації (2—4 об’єми/об’єм іонообмінника). Висока осмотична стабільність полімеризаційних сульфокатіонітів гарантує малі втрати матеріалу за його правильної експлуатації (не більш ніж 1 % на рік). Однак через поломи нижньої розподільної системи фільтрів і помилки експлуатаційного персоналу реальні річні втрати іонітів на вітчизняних ВПУ сягають 10 % і більше.

Сильноосновні аніоніти, що випускаються на основі полімеризаційних матриць, виробляють у вигляді сорбентів трьох типів: стиролдивінілбензолні аніоніти типів 1 і 2 та поліакрилові з шшивкою дивінілбензолом (див. табл. 2). Хоч вони характеризуються близькими значеннями повної обмінної ємності, гелеві аніонообмінники, синтезовані на основі поліакрилу, мають кращі сорбційні характеристики органічних сполук і ефективніше регенеруються як від них, так і неорганічних аніонів розчином лугу. Лужні характеристики поліакрилових аніонітів, як і стиролдивінілбензолних типу 2, поступаються іонітам першого типу. Тому з метою зменшення потрапляння слабкої кислоти H_2SiO_3 у фільтрат використовують аніоніти типу 1 [1, 2]. Ці ж іоніти мають кращу термічну стійкість (працездатні в ОН-формі за температур до 60 °С проти 35—45 °С для інших сильноосновних аніонообмінників). Цими властивостями обумовлено використання тільки аніонітів типу 1 для очищення турбінного конденсату на блокових знесолювальних установках ТЕС та АЕС.

Питання очищення води від органічних домішок за температур до 60 °С, що надзвичайно важливо для ТЕС, що експлуатуються в окиснювальних режимах, вирішується шляхом застосування пористих стиролдивінілбензолних аніонітів типу 1, які, як показано нами в [5—8], добре регенеруються солелужним розчином. Таке оброблення сорбенту здійснюється в міру накопичення в шарі органічних сполук. Оскільки ця операція є стандартною для всіх ВПУ і виконується з метою відновлення робочої ємності аніонообмінників за кремневою кислотою та консервації фільтрів, які довго не експлуатуються, вона, як правило, не супроводжується додатковими витратами. З викладених міркувань, зіставлення цін різних аніонітів щодо техніко-економічних розрахунків вибрано аніоніт АВ 17-8 виробництва Черкаського ПрАТ “Азот” [9].

У традиційній технологічній схемі знесолення води іонітами використовують ОН-аніонітні фільтри першого ступеня, завантажені слабоосновним аніонітом. Добре зарекомендував себе низькоосновний поліакриловий гелевий аніоніт Amberlite IRA 67, що вироблявся компанією “Rohm and Haas” (США). Концерн “Dow Chemical” (США), що придбав компанію “Rohm and Haas”, виробляє і поставляє на ринок іоніт під назвою Dowex Amberlite IRA 67. Він має високу робочу ємність за аніонами сильних кислот, ефективно сорбує ор-

ганічні домішки води, захищаючи у такий спосіб сильноосновний аніоніт від отруєння, добре регенерується від них робочим розчином луку за практично стехіометричних витрат реагенту. Зважаючи на такі властивості іонообмінника, а також його низьку ринкову вартість, характеристики цього матеріалу використано для техніко-економічних розрахунків.

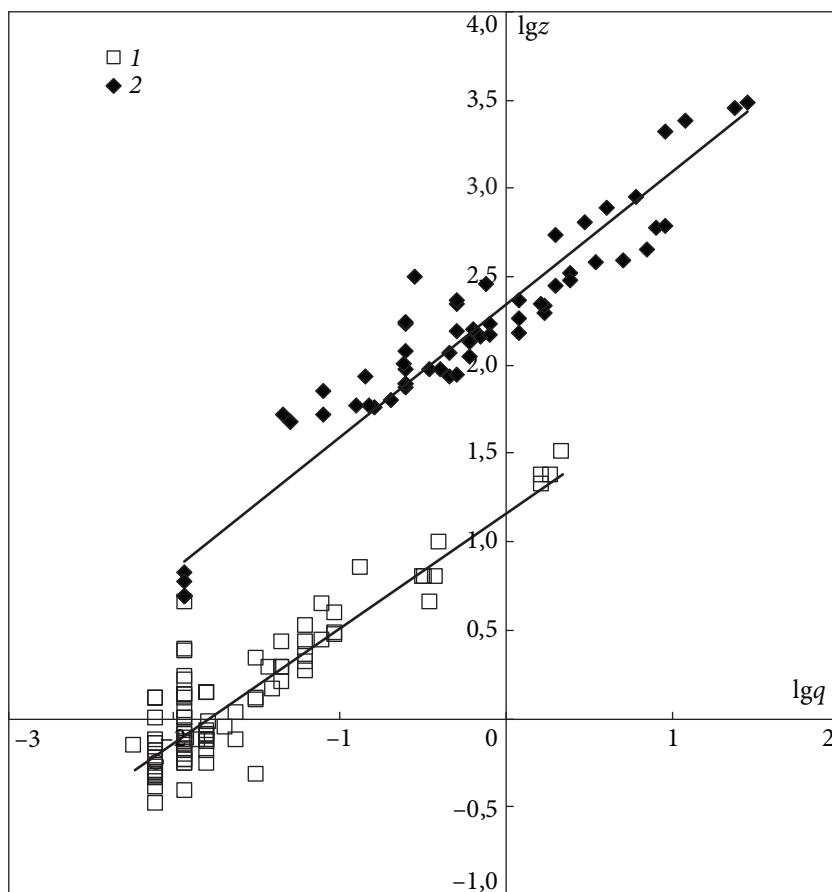
Для визначення показників запропонованої технології необхідні відомості про вартість зворотноосмотичних установок, ціну мембран, частоту їх заміни (тривалість експлуатації). Вичерпну інформацію про зворотноосмотичні мембрани, вироблені фірмою “Toray” (Японія), надала компанія “LWT Engineering”. Відомості про мембрани інших виробників знайдені в мережі “Інтернет”. На рисунку узагальнено дані про залежність вартості (z , тис. грн) зворотноосмотичних мембран (крива 1) та установок (крива 2) від їхньої продуктивності (q , м³/год) різних виробників і реалізаторів на ринку. Зокрема, розглянуто відомості про мембрани торгової марки “Toray” (Японія) (реалізуються компаніями “LWT Engineering”, ТОВ “Вода в дом”, “Аква Форсайт”, “Перша вода”, “Водеко”), мембрани фірми “Vontron” (Китай) (продавці ТОВ “Перша вода”, “Вода в дом”, “Водеко”), мембрани марок “Raifil”, “Microfilter” та “Saehan” (Південна Корея) (продавці ТОВ “Nerex” та “Перша вода”), а також зворотноосмотичні установки типу “МО”, що реалізуються підприємством “HidroZona”, і системи “Аквафлоу RO” (“Водеко”). На підставі аналізу рисунка доходимо таких висновків:

- ◆ незалежно від виробників і продавців усі дані підпорядковуються тим самим залежностям;

- ◆ як для мембран, так і для установок ЗО в логарифмічних координатах функції z від q лінійні за високих коефіцієнтів кореляції (0,86 та 0,94), мають практично однакові кутові коефіцієнти (0,66 та 0,71 відповідно), а прямі близькі до паралельних і відстоять одна від одної на 1 од. Це свідчить про те, що вартість мембран у середньому в десять разів менша за ціну установки ЗО і становить близько 10 % її ціни незалежно від продуктивності обладнання. На підставі отриманої інформації можна розрахувати як капітальні, так і експлуатаційні витрати, пов’язані з заміною мембран.

Більшість виробників і реалізаторів мембран ЗО гарантує їхню працездатність протягом 6—24 місяців. Таким чином, щорічні витрати на заміну мембран становлять не менше половини їхньої вартості. Для утилізації ретентату установки ЗО необхідно підвищити вміст у ньому солей, оскільки для регенерації сульфокатіонітів використовуються приблизно 5 %-ні розчини NaCl або HCl, що відповідає вмісту електролітів 1—1,6 моль/дм³. Такі самі концентрації солей дають змогу ефективно отримувати методами електролізу або електродіалізу достатньо концентровані луг та кислоту для регенерації іонітних фільтрів.

Під час демінералізації водних розчинів шляхом ЗО відношення обсягів пермеату і ретентату становить приблизно 2 : 1. Таким чином, солевміст ретентату за одну стадію концентрування збільшується приблизно втричі. Оскільки концентрація солей у природних прісних водах у середньому становить 5 ммоль/дм³, для досягнення зазначеного вище солевмісту ретентату слід піддати його не менш ніж п’ятиетапному обробленню ЗО. Фільтрат кожного етапу не потребує кондиціонування, оскільки його жорсткість не перевищуватиме 0,5—1,0 ммоль/дм³ за солевмісту не більш ніж 500 мг/дм³ навіть у разі опріснення розсолів із солевмістом 50—60 кг/м³. Це гарантує висока селективність ЗО-мембран, яка становить 99,8—99,9 %. З урахуванням фільтрату установок концентрування потоків ретентату попередніх етапів вихід товарного продукту (знесоленої, пом’якшеної та прісної води) за про-



Залежності в логарифмічних координатах ринкової вартості (z , тис. грн) від продуктивності (q , м³/год): 1 — промислових зворотноосмотичних мембран торгових марок “Raifil”, “CSM Saehan”, “AquaLine”, “Microfilter” (Південна Корея); “KeenSen”, “Vontron” (Китай); “Atoll”, “Filmtec”, “Pentair” (США); “Torey” (Японія), що реалізуються ВАТ “LWT Engineering”, “Вода в дом”, “HidroZona”, “Перша вода”, “Dobro”, “Альфа мембрана”, “Водеко”, “Екологія сервісу”; 2 — зворотноосмотичних установок марок “Nerex”, “MO”, “HidroZona”, “RO”, “Аквафлоу RO”, що реалізуються ВАТ “Nerex”, “HidroZona”, “Аквалюкс”, “Водеко”

понованою технологією у разі застосування п’ятиступінчастої схеми (з урахуванням стадії ЗО) становить не менше 99 %. Продуктивність обладнання за стадіями концентрування розсолу становить відповідно 33, 11, 3,7 та 1,2 % потужності апарата стадії ЗО.

Капітальні витрати (z , тис. грн) на обладнання оцінені на основі даних рисунка (табл. 4). Передбачалося, що стадія ЗО включає два апарати знесолення води і п’ятиступінчасту схему деіонізації ретентату цього етапу. За такої організації процесу продуктивність кожного з апаратів стадії ЗО має дорівнювати продуктивності ВПУ. Якщо для установок продуктивністю до 100 м³/год така вимога є цілком реальною (серійно випускаються установки продуктивністю 40—50 м³/год), то для більш потужних установок (продуктивністю понад 150 м³/год) це проблематично. Причина полягає в значно меншій продуктивності сучасних ЗО-мембран — менш ніж 30 м³/год, а переважно близько 10 м³/год. Установка продуктивністю 100 м³/год повинна включати не менше чотирьох мембран, а апарат потужністю 200 м³/год — не менше семи. Зважаючи на те, що гарантійний термін служби мембран становить не більше 24 міс.,

остання установка перебуватиме в ремонті не менш як один раз на три—чотири місяці. Для установок ЗО продуктивністю 500 м³/год (17 або більше мембран) міжремонтний період становитиме менш ніж півтора місяця. Виходячи з цього, під час комплектування високопродуктивних ЗО-установок перевагу слід віддавати модулям продуктивністю 100 м³/год і менше.

З табл. 4 також випливає, що вартість установки концентрування становить 23—28 % капітальних витрат за все устаткування ЗО і неістотно збільшується зі зростанням продуктивності ВПУ. Використання обладнання набагато меншої продуктивності також не-

Таблиця 4. Техніко-економічні показники ВПУ з різним комплектуванням

Комплектування ВПУ модулями продуктивністю, що дорівнює потужності ВПУ				
q , м ³ /год	100	200	300	500
z , тис. грн	160	253	332	465
$q_{\text{конц}}$, м ³ /год	50	100	150	250
$100 \cdot q_{\text{конц}}/q$, %	50	50	50	50
$z_{\text{конц}}$, тис. грн	147	233	305	428
$100 \cdot z_{\text{конц}}/z$, %	92	92	92	92
$z_{\text{уст}}$ тис. грн	627	973	1274	1787
Комплектування ВПУ модулями продуктивністю 100 м ³ /год				
Кількість модулів, шт.	3	4	5	7
$z_{\text{мод}}$ тис. грн	480	640	800	1120
$z_{\text{уст}}$ тис. грн	627	873	1105	1548
$100 \cdot z_{\text{конц}}/z$, %	23,4	26,7	27,6	27,6
Комплектування ВПУ модулями продуктивністю 40 м ³ /год				
Кількість модулів, шт.	4	6	9	14
$z_{\text{мод}}$ тис. грн	11132	16698	25047	38962
$z_{\text{уст}}$ тис. грн	11279	16931	25352	39390
$100 \cdot z_{\text{конц}}/z$, %	1,3	1,4	1,2	1,1
Комплектування ВПУ фільтрами ФІП, завантаженими аніоном Дауекс Амберлайт IRA 67				
Кількість фільтрів, шт.	3	3	3	4
$z_{\text{ФІП}}$ тис. грн	333	470	1348	2236
$z_{\text{уст}}$ тис. грн	1000	1411	4044	8946
$z_{\text{устФІП}}/z_{\text{устЗО100}}$	1,6	1,6	3,7	5,8
$z_{\text{устФІП}}/z_{\text{устЗО40}}$	0,09	0,08	0,16	0,23

Примітка. $q_{\text{конц}}$ — годинна витрата ретентату; $z_{\text{конц}}$ — вартість обладнання концентрування ретентату; $z_{\text{уст}}$ — вартість ВПУ; $z_{\text{ФІП}}$ — вартість фільтра ФІП; $z_{\text{устФІП}}$ — вартість ВПУ, укомплектованої фільтрами ФІП; $z_{\text{устЗО100}}$ — вартість ВПУ, укомплектованої зворотноосмотичними модулями продуктивністю 100 м³/год; $z_{\text{устЗО40}}$ — вартість ВПУ, укомплектованої зворотноосмотичними модулями продуктивністю 40 м³/год.

ефективне. На ринок постачаються апарати ЗО продуктивністю не більше 40—48 м³/год. Устаткування більшої потужності виготовляється на замовлення. У разі комплектування ВПУ установками ЗО продуктивністю 40 м³/год капітальні витрати більше ніж на порядок перевищують такі для запропонованих варіантів (комплектуювання ВПУ модулями продуктивністю 100 м³/год) (див. табл. 4).

Від традиційної схеми знесолення води іонітами [1, 2] пропонується технологія відрізняється насамперед тим, що замість ОН-фільтрів першого ступеня застосовується ЗО. Для зіставлення в табл. 4 наведено дані про техніко-економічні характеристики ОН-фільтрів першого ступеня, завантажених слабоосновним аніоном Дауекс Амберлайт ІРА 67. Ринкова ціна аніонообмінника становить 75 тис. грн/м³, що відповідає усередненому значенню за даними ринку. Як видно з табл. 4, у разі комплектування ВПУ зворотноосмотичними модулями продуктивністю, що дорівнює продуктивності установки в цілому, або 100 м³/год капітальні витрати приблизно однакові. Зі зменшенням продуктивності модуля до величин, поширених на ринку (40—48 м³/год і менше), вартість ВПУ може зрости більш ніж у 20 разів.

Загалом проведений комплекс обчислень показав, що оптимальним варіантом комплектування ВПУ є застосування одиниць зворотноосмотичного обладнання продуктивністю 80—100 м³/год, яке постачається на замовлення. Іонообмінні установки за капітальних витрат поступаються зворотноосмотичним в 1,5—6 раз. Ця перевага ЗО втрачається в разі зменшення продуктивності модулів до 70—75 м³/год (див. табл. 4, комплектування ВПУ модулями продуктивністю 40 м³/год).

Висновки і рекомендації. Визначено капітальні витрати на реалізацію запропонованого раніше ресурсозберігального маловідходного методу комбінованого пом'якшення, опріснення та знесолення води. Розрахунки здійснені щодо одного, важливого етапу оброблення води — її знесолення.

Показано, що незалежно від виробників і продавців мембран та апаратів усі дані задовільно описуються одними й тими самими кривими. У логарифмічних координатах функції вартості мембран і апаратів від їхньої продуктивності лінійні за високих коефіцієнтів кореляції, мають практично однакові кутові коефіцієнти — 0,66 і 0,71 відповідно, а прямі близькі до паралельних і відстоять одна від одної на 1 од. З цього випливає, що вартість мембран у середньому в десять разів менша від ціни установки ЗО незалежно від продуктивності обладнання.

Розглянуто варіант реалізації процесу з використанням установки ЗО і концентруванням ретентату для подальшого застосування або перероблення на утилізовані продукти на ВПУ. Встановлено, що достатнє концентрування ретентату досягається лише у п'ять зворотноосмотичних щаблів. Вартість устаткування концентрування ретентату становить 25—28 % капітальних витрат на установку ЗО і неістотно збільшується зі зростанням продуктивності ВПУ.

У разі комплектування ВПУ модулями ЗО продуктивністю, що дорівнює продуктивності установки в цілому, або 100 м³/год капітальні витрати приблизно однакові. Зі зменшенням продуктивності модуля до величини, поширеної на ринку (40—48 і менше м³/год), вартість ВПУ зростає.

Показано, що раціональним варіантом комплектування ВПУ є застосування зворотноосмотичного обладнання продуктивністю 80—100 м³/год.

Іонообмінні установки за капітальними витратами поступають зворотноосмотичним. Однак це стосується установок, оснащених модулями продуктивністю 80 м³/год і більше. За меншої продуктивності модулів перевага ЗО втрачається. За потужності модулів менш ніж 50 м³/год ЗО за капітальними витратами неконкурентоспроможний з іонним обміном.

Автори висловлюють вдячність комерційному директору фірми “LWT Engineering” Тетяні Мусієнко за надання вичерпної інформації про зворотноосмотичні мембрани, вироблені фірмою “Toray” (Японія).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. СНиП 2.04.02.84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Москва, 1984. 127 с.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 288 с.
3. СТО ВТИ 37.002—2005. Основные требования к применению ионитов на водоподготовительных установках тепловых электростанций. Технологические рекомендации по диагностике их качества и выбору. Москва: ВТИ, 2006. 58 с.
4. ГОСТ 20298—74. Смолы ионообменные. Катиониты. Технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 1974. 14 с.
5. Мамченко А.В., Валуйская Е.А. Модель кислотно-основного равновесия на слабодиссоциированных ионитах. *Химия и технология воды*. 1998. **20**, № 3. С. 237—246.
6. Мамченко А.В., Валуйская Е.А. Анализ кривых потенциметрического титрования с позиции теории обменных равновесий. *Химия и технология воды*. 1998. **20**, № 5. С. 451—560.
7. Мамченко А.В., Валуйская Е.А. Обмен Н⁺-Mg²⁺ с позиции теории обменных равновесий. *Химия и технология воды*. 1999. **21**, № 1. С. 5—18.
8. Мамченко А.В., Семенюк Д.В., Косыгина И.М. Равновесный обмен Н⁺-Ca²⁺ на полиакриловых катионитах. *Журнал физической химии*. 2008. **82**, № 3. С. 508—512.
9. ГОСТ 20301—74. Смолы ионообменные. Аниониты. Технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 1974. 23 с.

Надійшло до редакції 20.06.2023

REFERENCES

1. SNiP 2.04.02.84. Water supply. External networks and structures. Moscow, 1984 (in Russian).
2. Rules for the technical operation of power plants and networks. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
3. STO VTI 37.002-2005. Basic requirements for the use of ion exchangers in water treatment plants of thermal power plants. Technological recommendations for the diagnosis of their quality and choice. Moscow: VTI, 2006 (in Russian).
4. GOST 20298-74. Ion-exchange resins. Cation exchangers. Specifications. Moscow: Izd-vo standartov, 1974 (in Russian).
5. Mamchenko, A. V. & Valuiskaiia, I. A. (1998). A model of acid-base equilibrium on weakly dissociated ionites. *J. Water Chem. Technol.*, 20, No. 3, pp. 237-246 (in Russian).
6. Mamchenko, A. V. & Valuiskaiia, I.A. (1998). Analysis of potentiometric titration curves from the position of exchange equilibrium theory. *J. Water Chem. Technol.*, 20, No. 5, pp. 451-560 (in Russian).
7. Mamchenko, A. V. & Valuiskaiia, I. A. (1999). H⁺-Mg²⁺ exchange from the perspective of exchange equilibrium theory. *J. Water Chem. Technol.*, 21, No. 1, pp. 5-18 (in Russian).
8. Mamchenko, A. V., Semenyuk, D. V. & Kosigina, I. M. (2008). Equilibrium exchange of H⁺-Ca²⁺ on polyacrylic cationites. *J. Phys. Chem.*, 82, No. 3, pp. 508-512 (in Russian).
9. GOST 20301-74. Ion-exchange resins. Anionites. Specifications. Moscow: Izd-vo standartov, 1974 (in Russian).

Received 20.06.2023

O.V. Matchenko

T.A. Pakhar

A.M. Sova

A.V. Dumansky Institute of Colloid and Water Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv

E-mail: expo@ukr.net, pakhartikhv34@gmail.com

COMPARISON OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF BAROMEMBRANE AND ION EXCHANGE TECHNOLOGIES OF WATER DESALINATION

The capital costs for the implementation of the previously proposed resource-saving low-waste method of combined water softening and desalination have been determined. Calculations were made for one, important stage of water treatment — its desalination. It is shown that regardless of manufacturers and sellers of membranes and devices, all data are satisfactorily described by the same curves. In logarithmic coordinates, the functions of the cost of membranes and devices from their performance are linear at high correlation coefficients, have almost the same angular coefficients, equal to 0.66 and 0.71, respectively, and the straight lines are close to parallel and are separated from each other by 1 unit. This indicates that the cost of membranes is on average ten times less than the price of a reverse osmosis installation, regardless of the performance of the equipment. Variant of the implementation of the process with the use of reverse osmosis equipment and concentration of the retentate for further direct use in the proposed method or processing into products disposed at the water treatment plant (WTP) were considered. It was found that sufficient retentate concentration is achieved only in five reverse osmosis steps. The share of the cost of the retentate concentration equipment is from 25 to 28 % of the capital costs for the reverse osmosis equipment and increases insignificantly with the growth of the WTP productivity. When equipping the WTP with reverse osmosis modules with a productivity equal to the productivity of the installation as a whole, or 100 m³/h, the capital costs are approximately the same. As the productivity of the module decreases to the value common on the market (40—48 and less m³/h), the cost of WTP increases. The performed set of calculations showed that a rational variant of the WTP configuration is the use of reverse osmosis equipment with a capacity of 80—100 m³/h, which is manufactured to order. Ion exchange installations are inferior to reverse osmosis installations in terms of capital costs. However, this applies to installations equipped with modules with a capacity of 80 m³/h or more. With a lower productivity of the modules, the advantage of reverse osmosis is lost. With a module capacity of less than 50 m³/h, reverse osmosis is not competitive with ion exchange in terms of capital costs.

Keywords: softening, desalination, water desalting, membranes, reverse osmosis installation, equipment performance.