

УДК 628.105+541.18.045+541.67

Висоцький С.П., д.т.н., Коновальчик М.В.

АДІ ДВНЗ «ДонНТУ», м. Горлівка

ОПТИМАЛЬНІ УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗВОРОТНЬООСМОТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ЗНЕСОЛЕННІ ВОДИ

Встановлено залежності питомої продуктивності мембран від тиску води, яка надходить на знесолення, та її температури. Встановлено аналогію процесів залежності ємності поглинання іонообмінних смол від витрати реагентів (формула Вагелера-Ленгмюра), переносу іонів через електродіалізні мембрани в залежності від напруги електричного струму (формула С.П. Висоцького) та питомого потоку перміату в залежності від тиску. Запроваджено метод визначення оптимального тиску води, яка поступає на знесолення, з урахуванням вартості електроенергії та зворотньоосмотичних апаратів.

Стан проблеми

Суттєве зростання ціни на воду та реагенти, а також підвищення екологічних вимог зумовило необхідність упровадження альтернативних технологій очищення води. В сучасних умовах на водопідготовчому обладнанні промислових підприємств використовуються в основному, іонообмінна технологія очищення води. Її використання пов'язане із значною витратою реагентів близьких до стехіометричних величин, маса солей в скидах засолених стоків перевищує масу солей, які видаляються з води в 2 рази. При традиційних нормованих питомих витратах реагентів, які складають 2 г-екв/г-екв, маса солей, яка поступає в поверхневі водойми, перевищує масу видалених солей в 3 рази.

Вказані скиди забруднюють поверхневі водоймища та унеможливають використання поверхневих вод навіть для поливу сільськогосподарських угідь. Це особливо важливо для водних джерел, які мають відносно невеликий дебіт, наприклад, річок Міус, Вовча, Кальміус та ін.

Однією з таких технологій, яка знаходить широке використання в світовій практиці є мембранна. Проте її використання вимагає більш ретельного попереднього очищення води та упровадження ефективних систем регулювання продуктивності мембранного обладнання. На мембранному обладнанні можна одержати підвищену продуктивність за рахунок підвищення робочого тиску та збільшення температури води, що надходить. Але такий підхід до тимчасового збільшення продуктивності устаткування призводить до виникнення так званого «кріпу» — незворотної усадки мембран та втрати їх технологічних характеристик.

Мета дослідження

Метою дослідження було встановлення впливу основних факторів на технологічні характеристики мембранного устаткування та визначення оптимального тиску в залежності від ціни на електроенергію та вартості мембранних елементів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Під час експлуатації це обладнання необхідно використовувати, з одного боку, інтенсивно для відшкодування капітальних витрат, а з другого — кваліфіковано, щоб уникнути втрати його важливих технічних характеристик. Для цього необхідно враховувати цілу низку факторів, від яких залежить продуктивність та довговічність експлуатації мембранних установок.

Однією з ефективних можливостей оптимізації роботи мембранного елементу є оптимізація тиску води, що надходить на очищення. В даній роботі було побудовано та проаналізова-

но залежність витрат на споживання електроенергії й витрат на мембранні елементи та залежність питомої продуктивності апаратів відповідно від тиску та температури води, що очищується. Визначено оптимальний тиск води, що оброблюється, для мембранних елементів фірми «Filmtec». Оптимальний тиск води забезпечить економію електроенергії та значно подовжить строк служби мембранних елементів. Основною діючою силою зворотноосмотичного знесолення води є тиск води, що очищується. В даній роботі було виведено формулу залежності продуктивності мембранного елемента від тиску води, що очищується (рис 1). Дослідження проводилися на мембранних елементах фірми «Filmtec».

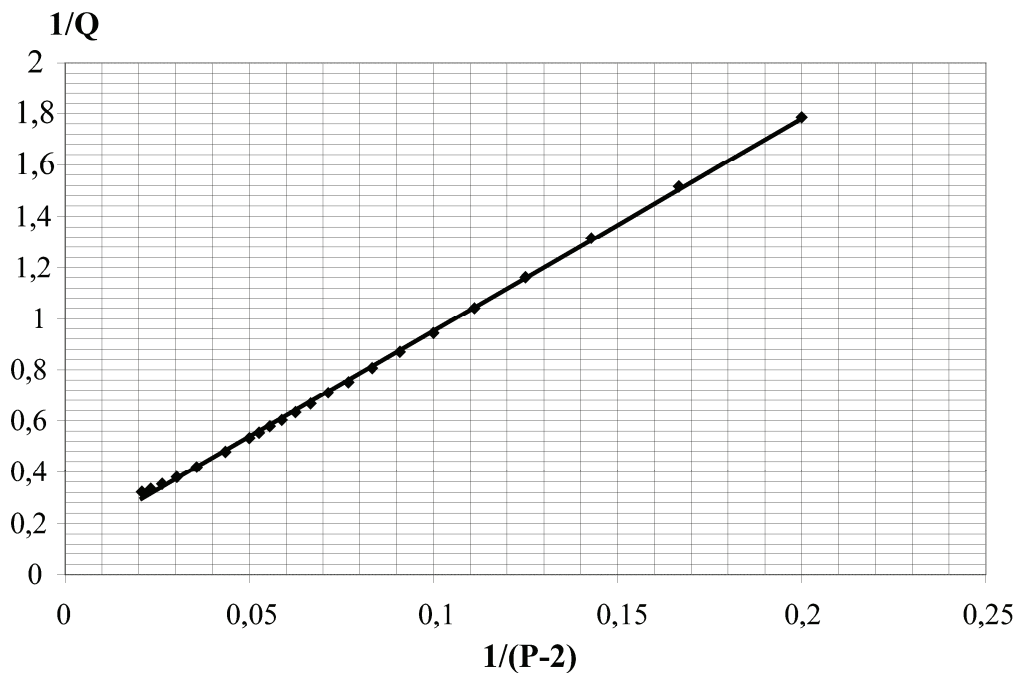


Рис. 1. Залежність продуктивності від тиску води, яка надходить на очищення для рулонних мембранних елементів фірми «Filmtec»

Наведена вище графічна залежність має вигляд рівняння (1):

$$Q = \frac{8,10 \cdot (P - \phi)}{67,3 + (P - \phi)}, \quad (1)$$

де Q — продуктивність мембранного елемента, m^3/god ;

P — тиск води, що надходить на обробку, $бар$;

$\phi = 2$ $бар$ (для мембранних елементів фірми «Filmtec»).

Цікаво відзначити, що простежується аналогія процесів іонного обміну, який описується формулою Вагелера-Ленгмюра

$$E = E_{\max} \frac{G}{G + b}, \quad (2)$$

де G — кількість катіоніту, який взаємодіє з іонообмінником, $г \cdot екв/м^3$;

E_{\max} — максимальна здатність поглинання катіоніту для даних умов, $г \cdot екв/м^3$;

C — константа половинного значення (для $G = C$, $E = \frac{E_{\max}}{2}$).

Ця формула записана у вигляді диференціального рівняння:

$$\frac{dE}{dG} = K(E_{\max} - E)^2, \quad (3)$$

де $K = \frac{1}{C \cdot E_{\max}}$, дозволяє зробити висновки, що ємність поглинання пропорційна квадрату ємності обмінника.

В електродіалізі аналогічно процесу, описаному формулами 2 і 3, потік іонів, що проходить через мембрану, можна описати за формулами С.П. Висоцького:

$$\Phi = \Phi_{\max} \frac{U}{U + C}, \quad (4)$$

$$\frac{d\Phi}{dU} = k(\Phi_{\max} - \Phi)^2. \quad (5)$$

При зворотньоосмотичному знесоленні, де рушійною силою переносу води є тиск, приріст переносу при зростанні надлишку тиску над осмотичним пропорційний квадрату питомого переносу перміату через поверхню мембрани:

$$\frac{dq}{dp} = k(Q_{\max} - q)^2, \quad (6)$$

де Q_{\max} — максимальний питомий потік знесоленої води (перміату) через мембрану для даного апарату при відповідній якості води, що надходить на очищення, л/год·м²;

$$k = \frac{1}{C \cdot Q_{\max}}.$$

В останній формулі тиск визначається як надлишок над осмотичним тиском для даної якості води.

Продуктивність мембранних елементів в значній мірі залежить від температури. Так, при підвищенні температури води, що надходить на очищення, проникність мембран збільшується зворотньопропорційно в'язкості розчину. Але для полімерних мембран, здатних до розм'якшення, при підвищенні температури вище граничного значення (>40°C), призводить до зниження проникності мембран або навіть її повного зникнення. Це пояснюється посиленою усадкою матеріалу мембрани (релаксація внутрішніх напруг) та руйнуванням пористої структури («кріп» мембран).

В даній роботі було побудовано та проаналізовано залежність проникності мембран від температури води, що надходить на очищення, (залежність безрозмірного коефіцієнту проникності мембрани від температури води) для мембран фірми «Filmtec» та отримано чотири залежності та три рівняння для спрощення розрахунків при користуванні безрозмірним коефіцієнтом K_t .

Залежність безрозмірного коефіцієнта проникності мембран K_t від температури в діапазоні температур від 0,5-43,3°C представлено на графіку (рис. 2).

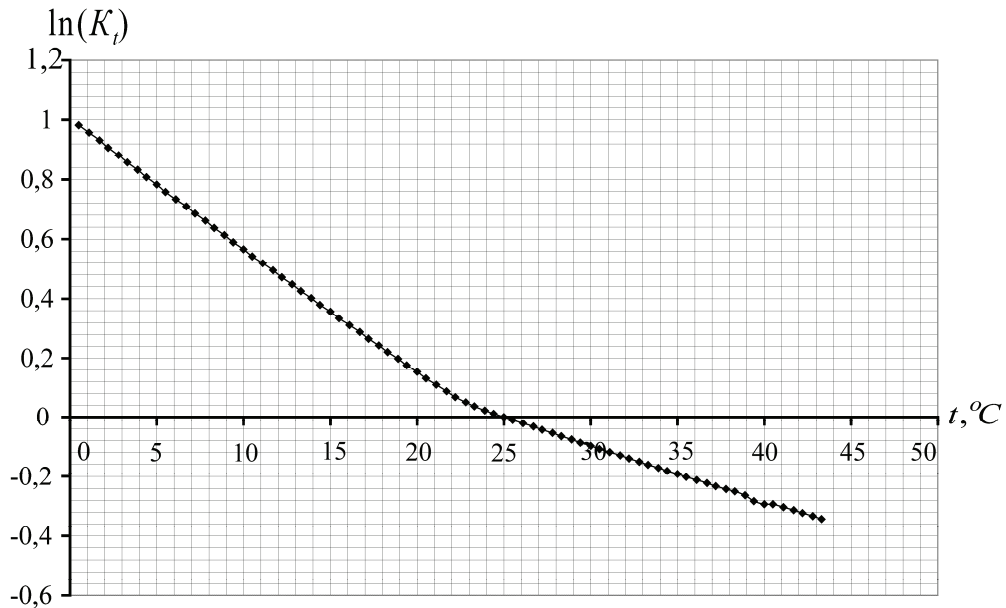


Рис. 2. Залежність коефіцієнта проникності мембран від температури води, що обробляється, для інтервалу температур від 0,5 до 43,3°C

З рисунку 2 видно, що крива залежності безрозмірного коефіцієнта проникності мембран поділяється на дві характерні ділянки. Перша ділянка належить інтервалу температур від 0,5-24,4°C. Цей діапазон є найбільш характерним для умов промисловості експлуатації зворотньоосмотичного обладнання.

Друга ділянка характеризує інтервал 25-43,3°C. Обидві являють собою прямі лінії, тобто для них можна вивести температурну залежність (рівняння) та користуватися ним для розрахунків, що є значно простішим ніж в разі користування таблицями.

Нижче наведемо графічні залежності для двох інтервалів температур. На рисунку 3 наведено залежність безрозмірного коефіцієнта проникності мембран від температури для інтервалу 0,5-24,4°C та наведено рівняння цієї залежності. На рисунку 4 наведено цю саму залежність, тільки для інтервалу 25-43,3°C.

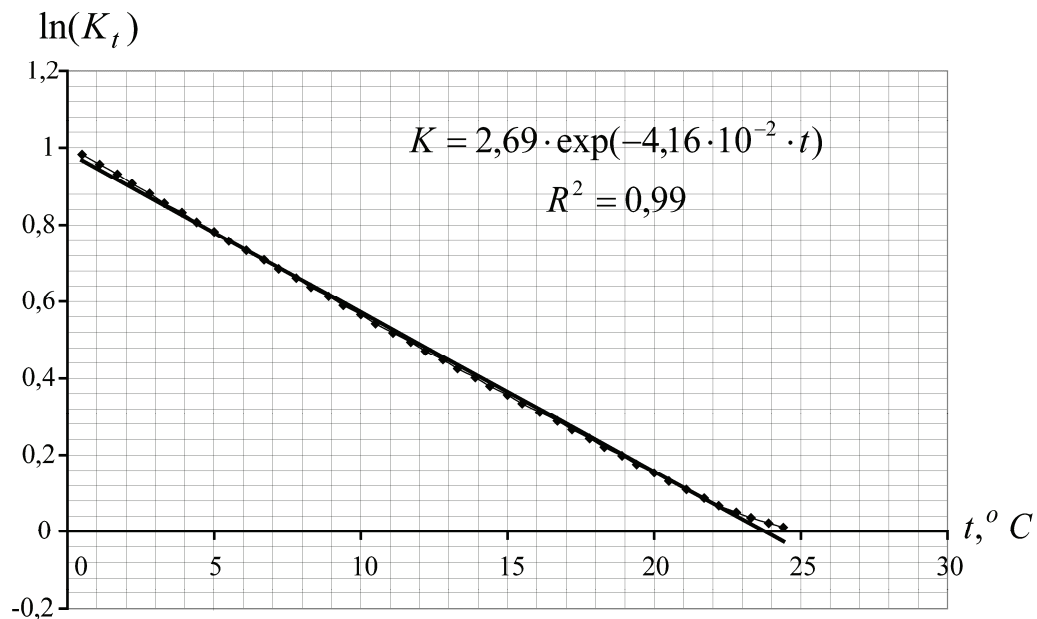


Рис. 3. Залежність безрозмірного коефіцієнта проникності мембран від температури води, що надходить на обробку, для інтервалу температур від 0,5 до 24,4°C

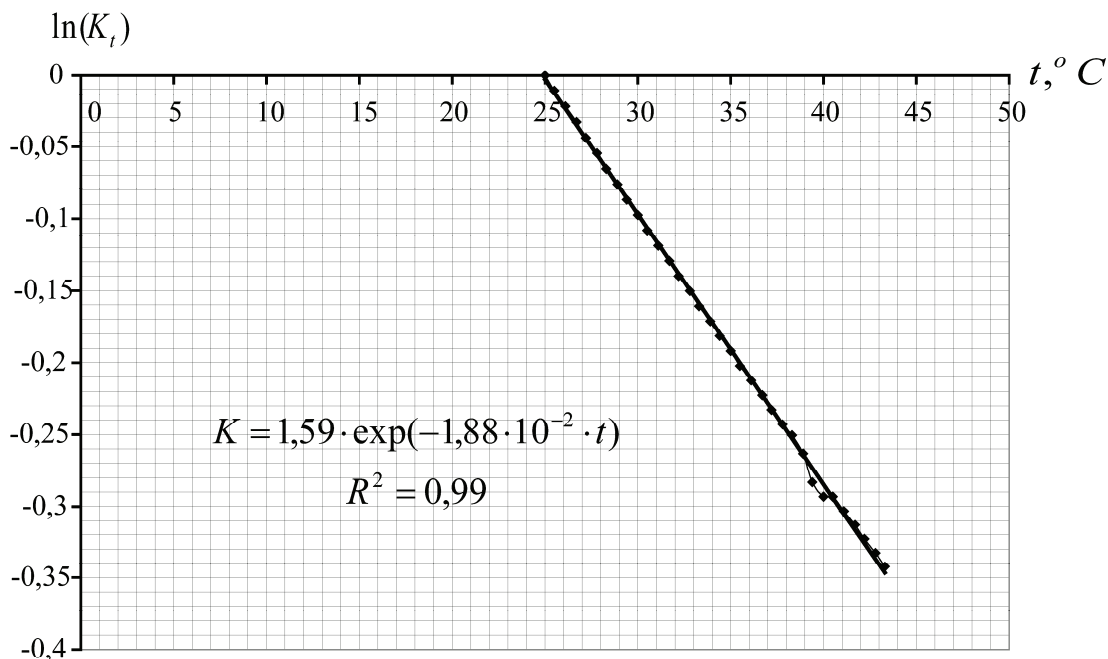


Рис. 4. Залежність безрозмірного коефіцієнта проникності мембран від температури води, яка поступає на очищення, для інтервалу температур від 25 до 43,3 $^{\circ}\text{C}$

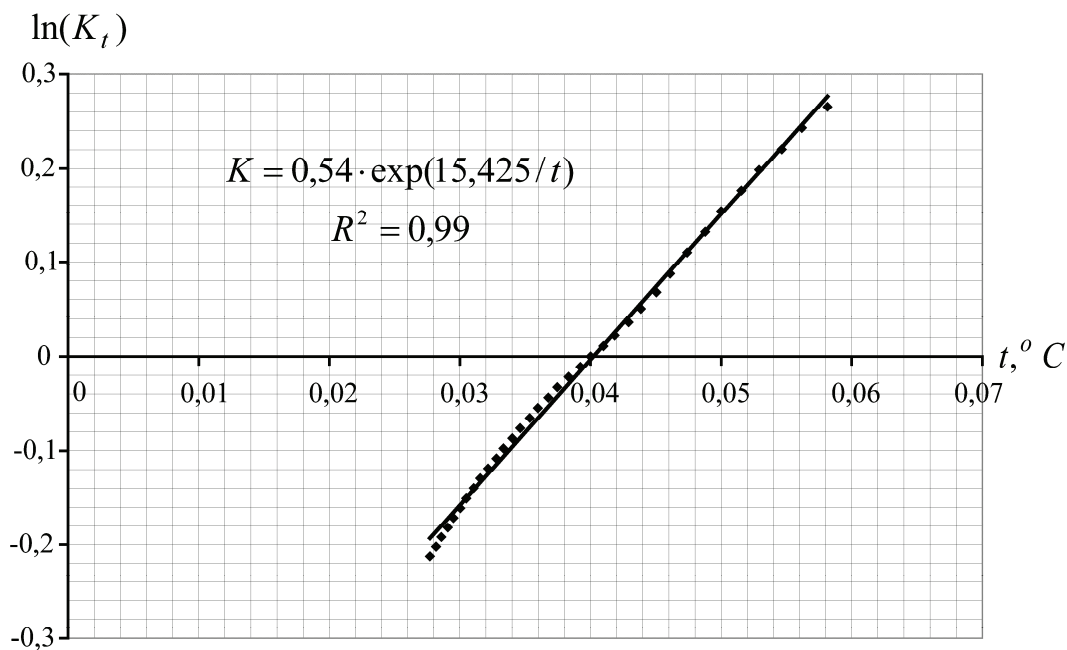


Рис. 5. Залежність безрозмірного коефіцієнта проникності мембран від температури води, що поступає на обробку, для інтервалу температур від 17,2 до 36,1 $^{\circ}\text{C}$

Відповідно, формули, які характеризують проникність мембран при 2-х діапазонах температур з високим ступенем достовірності, описуються наступним чином.

Для інтервалу температур від 0,5 до 24,4 $^{\circ}\text{C}$ рівняння має наступний вигляд:

$$K = 2,69 \cdot \exp(-4,16 \cdot 10^{-2} \cdot t). \quad (7)$$

Для інтервалу температур від 25 до 43,3 $^{\circ}\text{C}$ рівняння має наступний вигляд:

$$K = 1,59 \cdot \exp(-1,88 \cdot 10^{-2} \cdot t), \quad (8)$$

де K — безрозмірний коефіцієнт проникності мембрани;
 t — температура води, яка надходить на очищення, °С.

Використання двох рівнянь не завжди може бути зручним, а тому для полегшення користування коефіцієнтом та спрощення розрахунків можна користуватися однією формулою, яку було виведено для інтервалу температур 17,2-36,1°С, тобто для інтервалу температур, який найчастіше використовується. Рівняння має наступний вигляд:

$$K = 0,5377 \cdot \exp(15,425/t). \quad (9)$$

Якщо представити капітальні питомі витрати формулою

$$B_{к.пит.} = \frac{Q}{q \cdot S_1} \cdot C_{елем.} / (Q \cdot 8760 \cdot 3), \quad (11)$$

де $B_{к.пит.}$ — витрати капітальні питомі, дол. США;

Q — продуктивність, $m^3/год$;

q — витрата на одиницю площі мембранного елемента, $л \cdot m^2/год$;

$C_{елем.}$ — ціна одного елемента, дол. США;

3 — термін експлуатації, років

та підставити замість q (витрата на одиницю площі елемента) вираз рівняння (1), так як дослідження проводилися з одним елементом, то отримаємо формулу (12), що показує залежність капітальних питомих витрат від тиску води, яка очищується.

$$B_{к.пит.} = \frac{C_{елем.} \cdot (67,3 + (P - \phi))}{212868 \cdot (P - \phi)}, \quad (11)$$

де S_1 — площа одного мембранного елемента, m^2 .

Витрати електроенергії на привід насосу зазвичай визначаються за наступною формулою як добуток тиску на питому продуктивність зворотньоосмотичного обладнання:

$$E_e = \frac{0,1 \cdot P \cdot q}{367 \cdot \eta}, \quad (12)$$

де q — продуктивність насоса, $m^3/год$;

P — тиск, бар;

η — ККД насоса.

Витрати на електроенергію можна визначити за формулою:

$$B_e = E_{e/e} \cdot C_{1кВт}, \quad (13)$$

де $C_{1кВт}$ — ціна одного $кВт \cdot год$, дол. США.

Нижче на рисунку наведено графіки з отриманими оптимальними параметрами тиску при різній вартості електроенергії за вищенаведеними формулами. Вартість електроенергії прийнято для промислових споживачів в доларах США. Враховуючи те, що витрати на мембранні елементи були обчислені з урахуванням строку експлуатації в 3 роки, значення оптимального тиску будуть меншими, ніж при скорочених термінах експлуатації мембран.

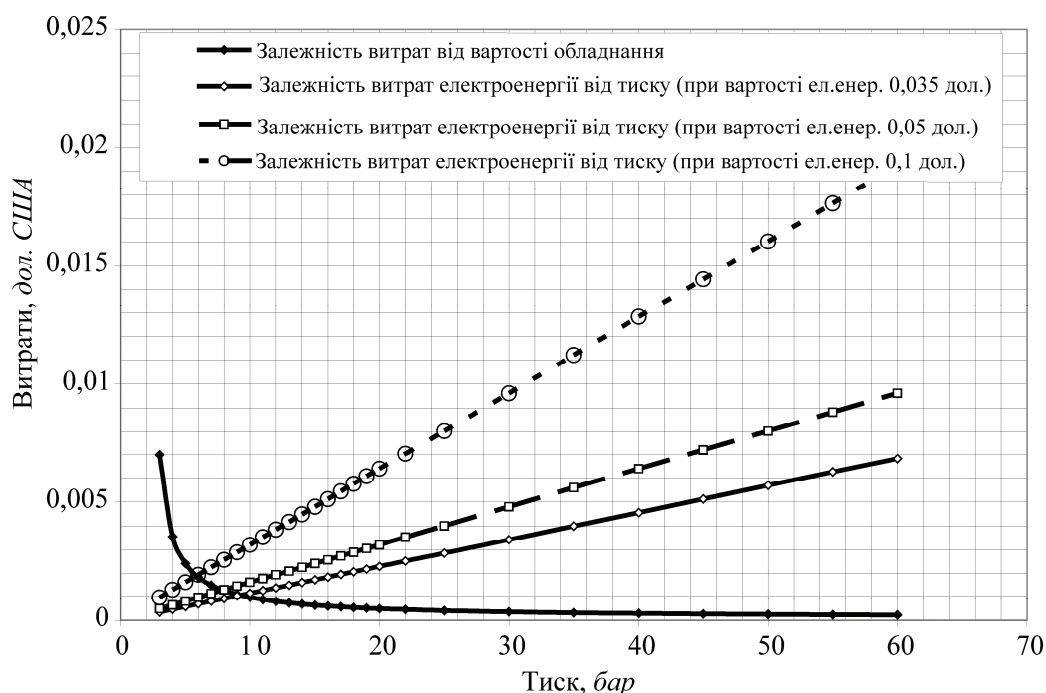


Рис. 6. Знаходження точки оптимального тиску води, що поступає на очищення при різній вартості електроенергії

В залежності від вартості електроенергії та в деякій мірі від вартості мембран оптимальний тиск води, яка надходить на очищення, належить інтервалу 11-18 бар, при якому забезпечується економія електроенергії та витрат на заміну елементів. Так, при достатньо високій вартості електроенергії спостерігається переміщення точки оптимального тиску в бік зниження, а при низькій вартості електроенергії оптимальний тиск має більші значення. Також має значення період експлуатації мембранних елементів. За допомогою цієї методики можливе вдале проектування установок.

Висновки

1. Одержано залежності питомої продуктивності мембран від тиску води, яка надходить на знесолення, та її температури.
2. Запроваджено метод визначення оптимального тиску води, яка поступає на знесолення, з урахуванням вартості електроенергії та зворотньоосмотичних апаратів.
3. Оптимальний тиск ретентату складає 9 бар при вартості електроенергії 0,035 дол. США, 8 бар при вартості електроенергії 0,05 дол. США, 6 бар при вартості електроенергії 0,1 дол. США.
4. Наведено аналогію процесів питомого переносу через мембрани з формулою Вагелера-Ленгмюра для іонообмінних матеріалів та формулами Висоцького С.П. для іонообмінних мембран.

Список літератури

1. Висоцький С.П. Мембранная и ионитная технологии водоподготовки в энергетике / С.П. Висоцкий. — К: Техника, 1989. — 176с.
2. Гриссбах Р. Теория и практика ионного обмена / Р. Гриссбах. — М.: Изд. иностранной литературы, 1963. — 186 с.
3. Wastewater recycling to potable water standards // Filtration&Seperation Septemer. — 2010. — October. — P.38-40.
4. Висоцький С.П. Знесолення води із використанням зворотньоосмотичної технології при різній конфігурації включення апаратів / С.П. Висоцький, Г.В. Фаткуліна, М.В. Коновальчик // Вісті автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / АДІ ДонНТУ. — Горлівка, 2005. — №1. — С. 62-67.

Рецензент: к.т.н., проф., Є.О. Воробйов, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ»

Стаття надійшла до редакції 20.05.10

© Висоцький С.П., Коновальчик М.В., 2010