

Технічні науки

УДК 628.16.081

Гулієнко Сергій Валерійович

*кандидат технічних наук, старший викладач кафедри
машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Гулиенко Сергей Валериевич

*кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры
машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

Hulienko Serhii

*Candidate of Engineering Science (PhD in Engineering),
Senior Lecturer of Department of
Machines and Apparatus of Chemical and Petroleum Industries
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

Симан Іван Володимирович

*магістрант кафедри машин та апаратів хімічних і
нафтопереробних виробництв
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорської»*

Симан Иван Владимирович

*магистрант кафедры машин и аппаратов химических и
нефтеперерабатывающих производств*

*Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Syman Ivan

*Master Degree Student of Department of Machines and Apparatus of
Chemical and Petroleum Industries of the
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"*

**ЗАБРУДНЕННЯ МЕМБРАН ТА МЕТОДИ ЇХ РЕГЕНЕРАЦІЇ:
КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД
ЗАГРЯЗНЕННЯ МЕМБРАН И МЕТОДЫ ИХ РЕГЕНЕРАЦИИ:
КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР
MEMBRANE FOULING AND METHODS OF ITS REGENERATION: A
CRITICAL REVIEW**

***Анотація.** Проведено огляд джерел літератури щодо процесів мембранного розділення водних розчинів і визначено основні проблеми їх розвитку. Відмічено, що найбільший негативний вплив на роботу мембранних установок чинять явища концентраційної поляризації та забруднення на поверхні мембран. Проведено огляд методів регенерації мембранних модулів та визначені напрямки подальших досліджень.*

***Ключові слова:** мембранне розділення, концентраційна поляризація, опір, регенерація, осад.*

***Аннотация.** Проведен обзор источников литературы о процессах мембранного разделения водных растворов и определены основные проблемы их развития. Отмечено, что наибольшее негативное влияние на работу мембранных установок оказывают явления концентрационной поляризации и*

загрязнения на поверхности мембран. Проведен обзор методов регенерации мембранных модулей и определены направления дальнейших исследований.

***Ключевые слова:** мембранное разделение, концентрационная поляризация, сопротивление, регенерация, осадок.*

***Summary.** The review about literature sources about membrane separation processes of water solutions was carried out and main problems in its development were determined. It was pointed out that main negative effect on membrane plants performance is influenced by phenomena of concentration polarization and fouling on membrane surface. The methods of membrane units regeneration was reviewed and directions of future researches were determined.*

***Key words:** membrane separation, concentration polarization, resistance, regeneration fouling, sludge.*

Вступ. Сьогодні у всьому світі мембранні методи очищення стічних вод вже не викликають сумнівів у своїй ефективності і конкурентоспроможності. Безліч закордонних компаній виробляють різноманітні мембрани, мембранні модулі і установки очищення природної і стічної води на їх основі.

Мембранні технології належать до категорії ресурсозберігаючих технологій, застосування яких дозволяє підвищити якість стічних вод, що скидаються, понизити кількість викидів забруднюючих речовин у водойми і мінімізувати забруднення природних вод за рахунок можливості повторного використання очищених стічних вод в замкнених системах водопостачання.

Широке використання мембранних методів у багатьох промислових процесах можливе завдяки тому, що властивості мембран можуть бути адаптовані до технічних вимог, задоволення яких потрібне для успішного проведення цих процесів [1-8].

Класифікація мембран. Мембрани, що використовуються в різних мембранних процесах, можна класифікувати за різними ознаками.

Найбільш простою являється класифікація усіх мембран на природні (біологічні) і синтетичні, які, у свою чергу, підрозділяються на різні підкласи, виходячи з властивостей матеріалу [9].

Мембранні методи розділення відрізняються типами використовуваних мембран, рушійними силами, що підтримують процеси розділення, а також сферами їх застосування [5].

Найбільше поширення отримали мембранні процеси, що протікають під дією тиску (баромембранні процеси).

Мембрани, що використовуються в цих процесах, залежно від розмірів пор і відповідно розмірів затримуваних часток, можна розділити на 4 типи: зворотноосмотичні, нанофільтраційні, ультрафільтраційні і мікрофільтраційні [10].

Зворотноосмотичні мембрани за селективними властивостями найбільш селективні і ефективні по коефіцієнту розділення розчинів. У них найменші пори. Крім того, існують теорії, які розглядають зворотноосмотичні мембрани як не пористі. Середній відсоток затримання зворотноосмотичними мембранами 97-99% усіх розчинених речовин [11]. Вони використовуються в харчовій промисловості, фармацевтиці, в системах комунального господарства, а також у багатьох виробничих процесах, де є потреба в отриманні води, підвищеної якості. Як правило, вони є фінішним етапом очищення природної і стічної води [12].

Для реалізації процесів мембранного розділення використовується декілька типів апаратів, особливості застосування яких наведені в спеціалізованій літературі [13–16].

Забруднення мембран. В процесі зворотного осмосу з часом відбувається забруднення мембран осіданнями зважених часток і погано розчинних сполук. Це призводить до зниження питомої продуктивності мембранної поверхні. Причиною цього являється виникнення біля поверхні мембрани, з напірного боку, концентраційного поляризаційного шару, що перешкоджає проходженню фільтрату крізь мембрану [17]. Механічні і колоїдні частки в таких умовах мають тенденцію до укрупнення і утворення агрегатів, які можуть відкладатися на мембрані, блокуючи її. Неконтрольований процес накопичення таких осадів при неправильній експлуатації установки може швидко привести до безповоротного погіршення характеристик мембранних апаратів [18, 19].

Зокрема, як показано в роботі [19] зниження продуктивності мембранних установок на 95-97% визначається забрудненням поверхні мембран і лише на 3-5% ущільненням їх капілярно-пороватої структури. Найбільш розповсюджені типи осадів, як показано в роботах [18, 19] - мінеральні осади, гідроксиди металів, колоїдні плівки органічного та біологічного походження, які можуть локалізуватися в різних частинах мембранної установки [20]. Причини забруднення мембран визначаються фізико-хімічними та поверхневими властивостями самої мембрани та частинок забруднюючої фази. В деяких роботах відмічається комплексний склад забруднень в промислових зворотноосматичних установках.

Однією з головних причин забруднення мембран є формування на їх поверхні карбонатних осадів, утворення яких визначається умовами рівноваги, інтенсивністю масообміну при кристалізації, а також наявністю домішок [19].

У випадку полімерних мембран, на ступінь забруднення впливають властивості мембран, в першу чергу морфологія полімеру та гідрофільність поверхні. Зокрема, встановлено, що гідрофобні мембрани в меншій мірі

схильні до забруднення, що дозволяє зменшити вплив забруднення за рахунок модифікації мембран [18].

Щоб зменшити швидкість забруднення, розчини, що розділяються, перед поданням в мембранний апарат піддають попередній обробці: проводять коагуляцію з подальшим осадженням, фільтрування на піщаному фільтрі, а потім на мікрофільтрі, підкисляють розчин, щоб запобігти випаданню солей жорсткості і так далі. Проте, рано чи пізно виникає необхідність очищення мембрани від забруднень [14]. Якщо попередня обробка стоку була високоефективною (за вартістю - порівнянною із зворотним осмосом), то очищення мембрани можна проводити раз на місяць і навіть ще рідше, в інших випадках (коли окрім фільтрів нічого не застосовується) це може бути один раз в тиждень [18]. Про необхідність очищення мембрани можна судити по зниженню продуктивності або зростанню гідравлічного опору модулів. Наприклад, рулонні модулі рекомендується очищати, коли їх продуктивність знижується на 20% або перепад тиску в напірному каналі модуля зростає в 1,5 рази в порівнянні з первинним значенням [21]. Проте, у ряді випадків, при порушенні регламентних термінів очищення мембранних модулів, з концентраційного поляризаційного шару на поверхню мембрани випадає осад, що закриває пори. У цих випадках видалення його дуже затратне [22].

Методи регенерації мембран. Розрізняють такі групи методів регенерації мембран [23, 24]: механічні, гідродинамічні, фізичні, хімічні й комбіновані, що включають частково прийоми перших чотирьох методів.

Механічні методи регенерації мембран можуть бути використані тільки в тих випадках, коли відклади (осади) мають низьку адгезію до поверхні мембрани й мають гелеподібну або пухку структуру, а самі мембрани, як правило, трубчастого типу. Сутність механічних методів полягає в тому, що разом із потоком рідини в напірний канал мембранного апарата вводять

еластичні губчасті полімерні кулі, які зчищають забруднення, що утворюються. Обов'язковою умовою використання таких куль є те, що їх діаметр повинен бути суттєво більшим (у 1,1-4 рази) діаметра трубки, всередині якої вони рухаються [10].

При утворенні відкладів, які мають значну спорідненість із поверхнею мембрани, використання суто механічного методу їх очищення не є ефективним. У таких випадках використовуються, як правило, комбінування механічного очищення із хімічним (кислоти, луги, ПАР тощо) [10].

Незважаючи на очевидну простоту й ефективність механічних методів очищення, вони мають ряд суттєвих обмежень і недоліків. Зокрема, як вже було зазначено, вони можуть бути застосовані лише в апаратах трубчастого й, в окремих випадках, плоскокамерного типу [14], тобто не використовуються в апаратах зворотного осмосу, які мають іншу конструкцію.

Іншим способом, який полегшує використання механічних методів очищення мембран, слід вважати застосування намивних шарів або динамічних мембран шляхом введення в розчин, що розділяється, дисперсних добавок. При цьому легко видаляються з поверхні мембрани забруднений рухливий динамічний шар із наступним нанесенням нового шару (реформування мембран) [25].

Гідродинамічні способи очищення включають в себе змив із напірного каналу концентраційного поляризаційного шару сильним струменем води, газорідною емульсією, пульсуючим потоком, зворотне промивання пермеатом. Сюди ж відноситься спосіб, який полягає в різкому скиданні тиску, що застосовується у деяких типах мембранних апаратів. При цьому мембрана розширюється і одночасно виникає осмотичний потік зі сторони пермеату, що приводить до відшарування забруднень від мембрани. Після цього вони вимиваються із апарату сильним потоком води в напірному каналі. На

практиці найбільше розповсюдження отримав спосіб, який полягає в промиванні напірного каналу модулів сильним струменем води. Це найпростіший спосіб серед гідродинамічних способів очистки. Промивна вода, в якості якої часто використовується сам розчин який розділяється, з більшою швидкістю прокачується через мембранні апарати при низькому тиску. Чим більше швидкість, тим краще. Обмеженням являється тільки допустимий перепад тиску для модуля, який може стать занадто великим через гідравлічний опір. Для рулонних модулів допустима величина перепаду тиску в напірному каналі порядку 0,2 МПа. [26].

Подача в напірний канал газорідної емульсії по ефективності може бути вище чим промивка сильним струменем, але складніше в організації і дорожче, тому і рідко використовується на практиці. При подачі в напірний канал пульсуючого потоку виникають гідравлічні удари, які сприяють відшаруванню осадів від мембрани [22]. Цей спосіб прийнятний в таких конструкціях апаратів зворотного осмосу, де мембрана, підкладка і опора, яка протидіє тиску, міцно зв'язані одне з іншим і утворюють одне ціле. В іншому разі мембрана швидко вийде з ладу.

При зворотній промивці пермеат насосом подається під мембрану, проходить через неї у напрямку, протилежному звичайному, і надходить в напірний канал. Завдяки цьому видаляються забруднення із пор мембрани і відшаровуються осадки, які перекривають пори. Цей спосіб можна використати також тільки в таких конструкціях, де мембрана, підкладка і опора утворюють єдине ціле [27].

У порівнянні з хімічними методами очистки гідродинамічні простіші і дешевші. На жаль, з їх допомогою можна видалити тільки концентраційний поляризаційний шар, який не зв'язаний з мембраною [28].

Сутність фізичних методів регенерації полягає у впливі на мембрани електричних та магнітних полів, ультразвуку, п'єзоелектричної вібрації, а також при проведенні мембранного процесу в умовах дії відцентрових сил [23]. У наш час фізичні методи очистки перебувають у стадії експериментальних досліджень.

Також відомі хімічні методи регенерації мембран [23, 28]. Ефективність хімічних методів очищення мембран залежить від ряду факторів: типу і хімічної стійкості мембран, типу і структури забруднень, складу миючого розчину й умов регенерації.

Як компоненти миючих розчинів використовуються різні класи речовин: мінеральні та органічні кислоти, альдегіди, луги, ПАР, ензими, солі фосфорних кислот, гідроген пероксид тощо. Слід відзначити, що як і конкретні методи регенерації, так і склад миючих засобів практично завжди є предметом патентування і в науковій літературі не публікуються. Аналіз доступних патентних даних, вміщених у науково-технічній літературі [23], дає можливість згрупувати склади миючих засобів відповідно до класів забруднювачів.

Так, для видалення щільних мінеральних відкладів як основні компоненти миючих розчинів використовують органічні та мінеральні кислоти (щавлева, лимонна, хлоридна, сульфатна), які розчиняють солі кальцію і феруму. Складніше видалити силікати, оксиди і гідроксиди металів, для чого використовують розчини із вмістом фосфатна кислоти, натрій або амоній флуоридів і ПАР (аніонних та нейоногенних) [29].

Для регенерації хімічними методами можуть використовуватися як традиційні хімічні реагенти, так і спеціально розроблені хімічні препарати. При цьому ефективність різних типів реагентів виявляється різною залежно від виду забруднень. Для окремих видів осаду більш ефективним виявляються

лужні розчини, тоді в інших випадках ефективнішими є кислі розчини, чи ферметні препарати. В деяких випадках більш ефективними виявляються комбінації промивних розчинів. При виборі промивного агента та його концентрації необхідно враховувати хімічну стійкість мембран, оскільки реакція між матеріалом мембрани та промивним агентом призводить до руйнування активного шару мембрани. Крім того, до порушень структури мембрани може призвести затримка у проведенні хімічного промивання через мікробіологічну активність. Було запропоновано ряд комплексних підходів, що включають злагодження роботи системи попередньої обробки та промивання, а також порядок проведення процедур промивання з вилученням окремих компонентів шару забруднень [14].

Регенерацію мембран рекомендується проводити у два етапи: очищення мембран реагентами від забруднень і обробка їх спеціальними реагентами, що забезпечують остаточне відновлення характеристик мембран. До складу останніх входять полімери (полівініловий спирт, кополімер вінілацетату з малеїновим ангідридом тощо) [23]. Двохстадійну регенерацію мембран проводять у циркуляційному режимі.

Накопичений багаторічний досвід щодо хімічної регенерації різних мембран дозволив фірмам-розробникам рекомендувати визначені за складом хімічні реагенти й рецептури їх виготовлення для видалення забруднень різних типів. Прикладом можуть бути рекомендації фірми «Дюпон» (США) щодо хімічної регенерації поліамідних мембран В10 [29, 30].

При проектуванні установок зворотного осмосу способи попередньої очистки оброблюваного розчину і методи очистки мембран від забруднень повинні вибиратись в такій сукупності, щоб забезпечити мінімальну вартість процесу розділення. Якщо зекономити на передочищенні то обов'язково отримаємо збільшення затрат на промивання мембран. Перші промислові

установки зворотного осмосу експлуатувались взагалі без попередньої очистки початкового розчину, в результаті чого повністю виходили з ладу на протязі декількох тижнів (способи очистки мембран від забруднень тоді ще мало були вивчені).

В наш час вважається, що оптимальні затрати на попередню очистку повинні складати на менше 40-60% від всіх затрат на розділення вхідного стоку з використанням зворотного осмосу [31].

Якщо промислові установки зворотного осмосу укомплектовані апаратами попередньої очистки і хімічні очистки мембран проводяться з періодичністю, яка рекомендована виробником установки, строк служби зворотноосмотичних мембран може складати 3-4 роки [26]. Для захисту мембран від відкладень різних забруднювачів використовують спеціальну речовину – антискалант. Антискалант вводять у воду, що подається на осмос в незначній кількості (біля 5 грам на 1 м³). Він потрапляє разом з водою на осмос і утворює на поверхні зворотноосмотичних мембран тонку плівку з яскраво вираженими антиадгезивними якостями. Забруднювачі потрапляють на цю плівку, ковзають по ній під дією водного потоку, що проходить через мембрану і не можуть закріпитись на поверхні мембран. Це дозволяє використовувати осмос на антискаланті на протязі більш довгого часу без проведення хімічних очисток. Антискалант не отруйний, він складається із суміші високомолекулярних органічних кислот. В пермеат він не потрапляє, так як не може пройти через зворотноосмотичну мембрану [18].

У роботі [14] було розроблено спосіб регенерації рулонованих зворотноосмотичних і нанофільтраційних мембранних модулів для підготовки питної та технологічної води шляхом застосування температурної кавітації, що зумовлює суттєве збільшення терміну їх роботи без порушення якісних характеристик води. Експериментально встановлено, що при тиску $P =$

0,005-0,009 МПа і температурі насичення до 45 °С відбувається ефективно видалення осаду з поверхні мембрани без порушення функціональних властивостей мембран у рулонованих модулях. Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що при застосуванні температурної кавітації досягається відновлення продуктивності зворотноосмотичних мембран до 92% від початкової продуктивності при значеннях $Re = 15-25$ і зменшенні в 1,5 рази тривалості процесу в порівнянні з традиційними способами промивання. Запропонований спосіб дозволяє відновити до 92% питомої продуктивності зворотноосмотичних мембранних модулів типу ТФС при зменшенні їх продуктивності до 40%, що в 2 рази перевищує існуючий критичний поріг, при якому можливе ефективне відновлення за існуючими технологіями. Окрім того було запропоновано інтенсифікувати процес шляхом підвищення тиску. В такому разі буде відбуватися стискання парових бульбашок, оновлення поверхні масообміну та колоїдне подрібнення частинок осаду. Для перевірки даної гіпотези були проведені експериментальні дослідження з використанням різних мембранних модулів та характеристик періодичності циклів підвищення тиску (кількість циклів, тривалість промивання при тиску насичення, кількість промивного розчину, який подавався при підвищеного тиску).

Крім того було доведено, що для випадку періодичного підвищення тиску величина коефіцієнта регенерації більша в 1,6 рази, порівняно з режимом промивання під розрідженням. Отже, одержані результати свідчать про ефективність періодичного підвищення тиску в промивній камері вище тиску насичення для інтенсифікації процесу вилучення осаду за рахунок турбулізації пограничного шару та оновлення поверхні контакту фаз, підтверджуються за результатами планування експерименту.

Висновки

1. Мембранні методи підготовки води є одними з найефективніших, що обумовило їх поширення в промислових установках.
2. Основною проблемою при експлуатації мембранних установок є явище концентраційної поляризації та утворення осадів на поверхні мембрани.
3. Існуючі методи регенерації дозволяють зменшити негативні наслідки утворення осадів, однак мають обмежену ефективність.
4. В попередній роботі [14] запропоновано метод регенерації мембранних модулів з використанням температурної кавітації.
5. Також в попередній роботі [14] було встановлено, що використання режиму пульсацій тиску підвищує ефективність проведення процесу. Однак не було визначено параметри пульсації та їх вплив на ефективність регенерації, що обумовлює актуальність подальших досліджень в цьому напрямку.

Література

1. Свитцов А.А. Мембранные технологии в России / The Chemical Journal // Химический журнал. – 2010. - №10. – С. 22.26.
2. Баландина А.Г., Хангильдин Р.И., Ибрагимов И.Г., Мартяшева В.А. Развитие мембранных технологий и возможность их применения для очистки сточных вод предприятий химии и нефтехимии / Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. - № 5. – С. 336-370.
3. Kilgus M., Gepert V., Dinges N., Merten C., Eigenberger G., Schiestel T. Palladium coated ceramic hollow fibre membranes for hydrogen separation. Desalination. – 2006. - pp. 95-96.
4. Тимашев С.Ф. Физикохимия мембранных процессов. М.: Химия, 1980. – 232 с.

5. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. Пер. с англ. М.: Мир, 1999. – 513 с.
6. Хванг С.Т., Каммермейер К. Мембранные процессы разделения. Пер. с англ. М.: Химия, 1981. – 464 с.
7. Андрианов А.П. Исследование и оптимизация работы установок очистки воды методом ультрафильтрации: автореф. дис... М.: МГСУ. – 2003. – 22 с.
8. Тверской В.А. Мембранные процессы разделения. Полимерные мембраны. М.: МИТХТ им. М.В.Ломоносова, 2008. – 59 с.
9. Орлов Н.С. Ультра - и микрофильтрация. Теоретические основы. М.: МХТИ им. Д.И.Менделеева, 1990. – 174 с.
10. Дитнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 1986. – 272 с.
11. Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии. М.: ДеЛи принт, 2007. – 280 с.
12. Хохрякова Е.А., Резник Я.Е. Водоподготовка / Под ред. д.т.н. С.Е. Беликова. — Москва: Издательский Дом «Аква-Терм», 2007. – С. 100-112. – 240 с.
13. Волков С.В., Шахов С.В., Антипов С.Т. Аппарат для ультрафильтрации и обратного осмоса (Патент SU 1807883).
14. Гулієнко С.В. Дисертація на здобуття наукового ступеня к.т.н. Процес регенерації рулонованих мембранних модулів. Київ.: НТУУ «КПІ». - 2016.
15. Baker R. W. Membrane technology and applications. – 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
16. Porter M. Handbook of industrial membrane technology. – Westwood, New Jersey: Noyes publications. – 619 p.
17. Дытнерский Ю.И., Кочаров Р.Г., До Ван Дай. Некоторые закономерности процесса разделения бинарных растворов неорганических солей

- обратным осмосом. Теоретические основы химической технологии, 1975. Т. 9. №1. – 26 с.
18. Орестов С.О., Мітченко Т.Є. Фізикохімічні основи дії інгібіторів фоулінгу мембран зворотного осмосу та шляхи їх оптимального використання / Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. 2013. №2(12). С. 3-17.
 19. Федоренко В.И. Ингибирование осодкообразования в установках обратного осмоса / Серия Критические технологии. Мембраны. – 2003. - №2. – С. 23-30.
 20. Первов А.Г., Андрианов А.П., Телитченко Э.А. Влияние биологического загрязнения на работу обратноосмотических и ультрафильтрационных элементов / Серия Критические технологии. Мембраны. – 2004. - №1. – С. 3-18.
 21. Кочаров Р.Г. Основы технологического расчета мембранных аппаратов для разделения жидких смесей. Труды МХТИ им. Д.И.Менделеева. - 1982. – Вып. 122. – 39-51 с.
 22. Духин С.С., Кочаров Р.Г, Гутиеррес Л.Э.Р. Расчет селективности мембран при обратноосмотическом разделении многокомпонентных растворов электролитов с учетом межфазного скачка потенциалаю Химия и технология воды, 1987, т. 9, №2. – 99-103 с.
 23. Ісаєв С.Д., Брик М.Т. Запобігання забрудненню і регенерація мембран, що використовуються в процесах водоочистки. Наукові записки. Том 21. Біологія та екологія. – 2003. – С. 50-58.
 24. Gun T. Desolination. - 1989. - V. 71. - P. 325.
 25. Garth S, Ron T. Food Technol. - 1991. - V.45. - P. 98.
 26. Ладыгин К.В. Ультразвуковая очистка обратноосмотических мембран при обезвреживании фильтрата полигонов твердых бытовых отходов.

Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Московский государственный машиностроительный университет. Москва. - 2015. – 98 с.

27. Дытнерский Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация.- М.: «Химия», 1978. – С. 176, 168. – 352 с.
28. Карелин Ф.Н. Обессоливание воды обратным осмосом. М: Стройиздат, 1988.
29. Кавицкая А.А. Химия и технология воды. - 1990. - Т.12. - С. 875.
30. Ebrahim S., Malik A. Desalination. - 1987. - V.66. - P. 201.
31. Кретов И.Т., Антипов С.Т., Шахов С.В., Ключников А.И. Черемушкина И.В., Рязанов А.Н. Мембранный аппарат с погружным фильтрующим элементом (Патент RU 2148427).