

N.Potvorova, P.Vakuliuk, I.Furtat, A. Burban

IODINE IMMOBILIZATION ON THE SURFACE OF POLACRYLONITRILE MEMBRANES, MODIFIED BY UV-INITIATED GRAFT POLYMERIZATION OF N-VINYLPYRROLIDONE

A method of iodine immobilization on the surface of polyacrylonitrile (PAN) membranes, previously modified by UV-induced graft polymerization of N-vinylpyrrolidone on the surface, is developed. Transport, functional and antibacterial properties of the membranes is investigated. Chemical grafting of N-vinylpyrrolidone to the membrane surface is proved by IR-spectroscopy and measuring of the membrane contact angles. It was established that complex of the polyvinylpyrrolidone-I₂ have the prolonged antibacterial properties relatively to gram-negative bacterium Escherichia coli HB 101.

Key words: polyacrylonitrile membranes, iodine immobilization, UV-induced graft polymerization, antibacterial properties.

Матеріал надійшов 20.01.2013

УДК 542.816:66.081

Петрук В. В., Вакулюк П. В., Бурбан А. Ф.

ПОРОЖНИСТОВОЛОКОННІ МЕМБРАНИ ТА МОДУЛІ ДЛЯ МЕМБРАННО-ДИСТИЛЯЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Проведено аналіз теоретичних та експериментальних досліджень мембранної дистиляції (МД). Особливо увагу приділено властивостям гідрофобних мембран та їх формуванню. На основі проведеного аналізу зроблено висновки про перспективні наукові та технологічні розробки з отримання мембран та модулів для мембранно-дистиляційних процесів.

Ключові слова: мембранна дистиляція, порожнистоволоконні мембрани, фторовмісні полімери.

Вступ

Капілярні або пласкі мікропористі гідрофобні мембрани, які були розроблені насамперед для мікрофільтраційних процесів, зазвичай виготовляють з поліпропілену, полівініліденфлуориду та політетрафлуоретиліну [1]. Незважаючи на суттєві переваги МД над багатьма методами очищення та знесолення вод, наразі існує дуже обмежена кількість публікацій, присвячених темі розробки мембран спеціально для МД. Протягом тривалого часу для МД використовували гідрофобні мікрофільтраційні мембрани, які за цілою низкою показників не відповідали вимогам МД процесів. У зв'язку з цим існує гостра потреба в розробці

таких мембран, які могли б сприяти широкому використанню МД у промисловості.

З точки зору теплопередачі найбільш вигідним типом мембран є порожнистоволоконні. Так, для цього типу мембран за внутрішнього діаметру пор 0,3 мм коефіцієнт теплової поляризації досягає 0,8 при значенні критерію Рейнольдса 300. Якщо ж внутрішній діаметр пор становить 1 мм, для досягнення значення коефіцієнта теплової поляризації 0,85 необхідно значення критерію Рейнольдса 3000 [2]. Таким чином, для ефективності МД процесів важливі не лише характеристики поруватої структури мембрани, а й також її морфологія, особливості будови і конструкції мембранних

модулів, гідродинамічні та теплообмінні процеси тощо.

Необхідні властивості мембран для мембранної дистиляції

Величина мінімального капілярного тиску (МКТ) (liquid entry pressure) – мінімальний тиск, який треба прикласти, щоб рідина пододала гідрофобні сили мембрани і потрапила в пори. МКТ є індивідуальною характеристикою кожної мембрани, що визначає умови її змочування. Для підвищення значень МКП мембран використовують відповідні гідрофобні матеріали або зменшують максимальний розмір пор. Важливо враховувати, що зменшення розміру пор мембран водночас призводить до зменшення їх проникності [3].

Проникність (продуктивність). Проникність мембрани зростає зі збільшенням розміру пор, об'ємної пористості та зменшенням товщини мембрани. Якщо розмір пор мембрани дорівнює середній довжині вільного пробігу молекули води, то в середині пор відбувається кнудсенівська і молекулярна дифузії. Тобто, з огляду на те, що за тиску, близького за значенням до атмосферного, в порах завжди є повітря, молекули води дифундують крізь нього. В іншому випадку, коли розмір пор мембрани менший за середню довжину вільного пробігу, молекули пари води зіштовхуються зі стінками пор і відбувається лише кнудсенівська дифузія [4].

Слід зауважити, що за теоретичними розрахунками величини потоку більші у випадках, коли враховують тільки кнудсенівську дифузію, нехтуючи молекулярною. Наприклад, для мембран з політетрафлуоретилену марки TF200 (середній розмір пор 0,2 мкм, пористість 80 %), об'ємна різниця температур 10 К, при розрахунках лише для кнудсенівської складової дифузії значення потоку у 2,3 (за температури вихідного розчину 45°C) - 2,6 (за температури вихідного розчину 20°C) разів вище, ніж відповідні значення, розраховані для комбінованої кнудсенівської і молекулярної дифузії [5]. Для мембран TF450, які мають більший розмір пор (середній розмір пор 0,45 мкм, пористість 80 %), різниця між цими значеннями величини потоку з врахуванням лише Кнудсенівського типу течії у 3,7 (за температури вихідного розчину 45 °C) - 4,3 (за температури вихідного розчину 20 °C) разів вищі, ніж при комбінованій кнудсенівській і молекулярній дифузії. Це доводить, що збільшення розміру пор не завжди призводить до збільшення потоку. Отже, в деяких випадках

необхідно використовувати, мембрани з розміром пор, меншим або таким самим, як середня довжина пробігу молекули води [6].

Теплопровідність. Втрата тепла внаслідок теплової провідності матеріалу мембрани більша у тонких мембран. Існує кілька шляхів зменшення теплопровідності мембран:

- використання для формування мембран матеріалів з низькою теплопровідністю. На жаль, матеріали, які зазвичай використовують для формування мембран, мають приблизно однакові значення теплопровідності;
- використання високопористих мембран, оскільки теплопровідність кисню, абсорбованого в пори мембрани, на порядок менше за теплопровідність самої мембрани. Також із зростанням пористості збільшується площа поверхні мембрани, що призводить до збільшення проникності;
- використання товстих мембран, однак, це призводить до зменшення величини потоку;
- використання комплексних гідрофобно/гідрофільних мембрани з тонким гідрофобним шаром та товстим гідрофільним шаром, пори якого заповнені молекулами води, теплопровідність яких значно менша за теплопровідність мембран [6,7].

Отже, мембрани, що відповідають певним дистиляційним параметрам мають бути:

- тонкі, оскільки потік пермеату обернено пропорційний товщині мембрани;
- погано змочуватися;
- у їхні пори не повинен проникати розчин, з яким контактує мембрана. Це може бути кількісно виражено рівнянням Лапласа:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r_{p,max}} \cos \theta, \quad (1)$$

де ΔP - різниця тисків; γ - поверхневий натяг розчину; θ - кут контакту між розчином і мембраною; r_p - розмір найбільшої пори [7].

Аналізуючи рівняння можна дійти висновку, що умовами непроникності є:

- Відносно невеликі розміри пор. Всередині пор мембрани не повинно бути капілярної конденсації.
- Великий поверхневий натяг між вихідним розчином та мембраною. Тобто мембрана не повинна змочуватись робочим розчином.
- Низька поверхнева енергія мембрани, характерна для гідрофобних полімерів. Гідрофобність мембрани забезпечує утримання поділу рідина – пара з однієї або обох

- поверхонь мембрани та розділення поверхонь випаровування і конденсації.
- Контроль за забрудненням мембран, що суттєво впливає на їхні властивості.
 - Перенесення кризь пори мембрани лише пари.
 - Незмінювана рівновага пара – рідина у процесі розділення компонентів розчину [7].

Продуктивність мембранної дистиляції також залежить від конструктивних особливостей модуля. Капілярні модулі мають низку суттєвих переваг порівняно із плоскими модулями, серед яких найголовнішими є простота конструкції та зменшення температурної поляризації. На ефективність мембранної дистиляції капілярних модулів суттєво впливає розташування мембран всередині корпуса.

Рушійна сила транспортування при мембранно-дистиляційному процесі повинна підвищуватися зі зростанням температури на вході. Традиційна конструкція ґрунтується на фіксації лише кінців пучка паралельних мембран, що призводить до довільного вкладання мембран в модуль (рис. 1).

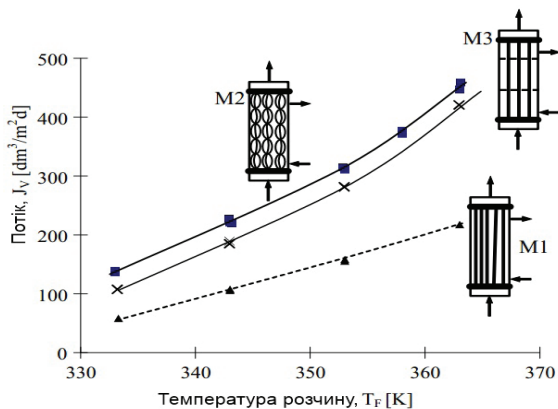


Рис. 1. Залежність температури розчину на вході в мембранний модуль від потоку. М1-пучок паралельних мембран; М2-сплетені капіляри; М3-мембрани містяться в комірках

Це створює несприятливі умови для охолодження поверхні мембран дистилятом і знижує ефективність модуля. У модулі М3 мембрани містяться у кожній другій комірці з шести перегородок сітки, розташовані по всьому корпусу на відстані 0,1-0,15 м. Найсприятливіші умови роботи мембранного модуля спостерігаються при розташуванні мембран у вигляді сплетених капілярів. Таке положення мембран покращує гідродинамічні властивості (сплетені мембрани працюють як статичний міксер), внаслідок чого ефективність модуля підвищується [8].

Було досліджено [8] порожнистоволоконні

модулі з трьома типами упаковки: паралельні волокна, пучки зі скручених волокон, та пучки з переплетених волокон. Упаковка з паралельних волокон виготовляється з тканого матеріалу, в якому поперечні волокна відіграють роль фіксаторів. Тканини згортають у рулони та упаковують. Найвища продуктивність у мембран зі скрученими або переплетеними волокнами. Останній тип МД має найбільш щільну упаковку - до 40 - 50 %. Пучки зі сплетеними волокнами діють як турбулізатори. В цілому гідродинамічний режим в порожнистоволоконних МДМ забезпечує максимальну продуктивність, навіть за ламінарного режиму ($Re = 450$).

Пористість мембран, що використовують для МД, варіює в діапазоні від 0,06 до 0,85, а середній діаметр пор - від 0,2 до 1,0 мкм Товщина мембран 100 - 300 мкм.

Крім того, матеріали, які використовують для отримання мембран для мембранної дистиляції, повинні мати досить високу хімічну, термо- і теплостійкість в агресивних водних середовищах.

Мембрани, які використовують у МД, повинні мати також низьку теплопровідність, яка залежить від температури і ступеня кристалізації полімеру, тому значення теплопровідності може коливатися у досить широкому діапазоні.

Серед полімерних матеріалів, що відповідають цим вимогам і мають волоконотворювальну здатність, можна назвати поліпропілен, полістирол, політетрафлуоретилен, полівініліденфторид, поліетилен, полівінілхлорид, полі-органосилоксан тощо.

Таблиця 1. Поверхнева енергія деяких сполук, які використовують для формування мембран для МД

Матеріал мембрани	Поверхнева енергія (кН/м)
Політетрафторетилен (ПТФЕ)	9,1
Поліпропілен (ПП)	30,0
Полівініліденфторид (ПВДФ)	30,3
Поліетилен (ПЕ)	33,2

Формування порожнистоволоконних мембран

Останнім часом різноманітні наукові дослідження були спрямовані на виробництво як плоских, так і порожнистоволоконних мембран спеціально для процесу мембранної дистиляції. Сьогодні політетрафлуороетилен

(ПТФЕ), поліпропілен (ПП) та полівініліденфлуорид (ПВДФ) є найбільш поширеними та доступними гідрофобними мембранними матеріалами. Серед цих трьох полімерів лише ПВДФ придатний для отримання асиметричних мембран добре розробленим та технічно простим методом інверсії фаз. Крім того, ПВДФ хімічно стійкий, добре розчиняється в апротонних органічних розчинниках при температурах, нижче 60 °С. Тому ПВДФ є предметом вивчення в полімерній хімії та привертає особливу увагу дослідників для різних процесів мембранного розділення [9].

Кополімери полі(вініліденфлуоридгексафлуоропропілен) (ПВДФ-ГФП) і полі-вініліденфторид-тетрафторетилен (ПВДФ-ТФЕ) останнім часом також використовують для формування плоских та порожнистоволоконних мембранно-дистиляційних мембран методом інверсії фаз [10]. Кополімер ПВДФ-ГФП є вельми перспективним матеріалом для отримання мембран. Порівняно з ПВДФ кополімер ПВДФ-ГФП є більш гідрофобним, має більш високу розчинність, нижчу кристалічність, меншу температуру склування і більше вільного об'єму в зв'язку з включенням аморфної фази ГФП у блоки вініліденфлуориду. Вміст флуору збільшується внаслідок додавання груп ГФП, які підвищують гідрофобність ПВДФ-ГФП.

Незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених виготовленню ПВДФ мембран з метою поліпшення їхніх властивостей, більшість з них орієнтовані на отримання плоских і гідрофільних порожнистоволоконних мембран. Значно менше праць присвячено виготовленню і дослідженню гідрофобних пористих ПВДФ порожнистоволоконних мембран, особливо для мембранно-дистиляційного процесу.

Так само, як і плоскі, порожнистоволоконні мембрани для мембранної дистиляції отримують різними методами. Наприклад, пористі порожнистоволоконні мембрани було отримано [11] з різних полімерів, в тому числі ПВДФ, для контактної мембранної дистиляції за допомогою техніки сухо/мокрого прядіння. Як розчинник використали диметилсульфоксид (ДМСО). Отримані порожнистоволоконні мембрани мали менші розміри пор, ніж у мікрофільтраційних мембран. Так, порожнисті волокна з ПВДФ мали середній розмір пор 4,0-24,8 нм, пористість 56-73%, внутрішній діаметр 0,675-0,844 нм та зовнішній діаметр 0,982-1,071 нм.

Використання техніки мокромоного прядіння дозволяє отримати різні асиметричні мікропо-

ристі ПВДФ порожнистоволоконні мембрани з різними розмірами пор (0,031-0,068 мкм), ефективною пористістю і морфологією для вакуумної мембранної дистиляції за допомогою методу інверсії фаз з використанням розчиннику ДМАА і нерозчинної добавки LiCl та води. Було встановлено [12], що склад розчину полімеру є найважливішим параметром впливу на морфологію та проникність порожнистоволоконних ПВДФ мембран. Збільшення ПВДФ знижує ефективну пористість поверхні та середній розмір пор як внутрішньої, так і зовнішньої поверхні волокна.

У роботі [13] отримано ПВДФ мембрани для контактної мембранної дистиляції з використанням N-метил-2-піролідону як розчинника та етиленгліколю як нерозчинної добавки. Концентрація ПВДФ становила 12 мас.%, етиленгліколю - 8 мас.%. Отримані ПВДФ порожнисті волокна мали середній розмір пор 0,16 мкм та дуже вузький розподіл пор за розмірами. При використанні водного розчину солі 3,5 мас.% як сировини при температурі сировини 79,3 °С та температурі пермеату 17,5 °С, продуктивність ПВДФ порожнистоволоконних мембран становила 41,5 кг/м²-год, а селективність сягала 99,99 %.

Деякими дослідниками [14] було отримано полівініліденфлуорид-політетрафлуоретиленові порожнистоволоконні мембрани з покращеною гідрофобністю. Також ПВДФ мембрани були виготовлені методом коекструзії, в цьому випадку розчинник N-метилпіролідон циркулював через зовнішній канал подвійної фільери. За цим методом формування розчинника і розчину, що містить ПЕГ, проходять крізь повітряний прошарок перед зовнішньою коагуляцією. Отримані порожнистоволоконні мембрани мають високу пористість зовнішнього поверхневого шару. Порівнянно зі стандартним методом сухо/мокрого прядіння, що використовують для отримання інших порожнистоволоконних мембран для мембранної дистиляції, мембрани, отримані методом коекструзії, мають більш високу продуктивність, що може перевищувати продуктивність мембран, отриманих традиційними методами, в два-три рази. Продуктивність таких мембран досягає значень 67 кг/м²-год, а ступінь затримання сольового розчину хлориду натрію 3,5% (мас.) становить 99,9 % [15].

Також для виготовлення порожнистоволоконних мембран запропоновано змішані матриці ПВДФ/наноглина [16]. Ці мембрани отримано методом сухо/мокрого прядіння, в якості зовнішнього та внутрішнього коагулянтів було використано воду. Частка вільного

об'єму отриманих порожнистоволоконних мембран дорівнює 90%. Було встановлено, що введення частинок глини в полімерну матрицю збільшує механічну міцність мембран і поліпшує їх довгострокову стабільність. Ці волокна мають більшу пористість і таким чином шар нанорозмірних пор забезпечує високу продуктивність, добрі теплоізоляційні характеристики та знижує ризик змочування пор мембрани. Розмір пор зовнішньої поверхні мембран менше (50 нм), ніж такий внутрішньої поверхні (1,0 мкм). При очищенні водного розчину 3,5% (мас.) NaCl методом контактної дистиляції отримують об'ємний потік води вище, ніж 79,2 кг/м²·год зі ступенем очищення 100 %.

У роботі [17] запропоновано синергічне використання двох пороутворювальних агентів (LiCl та ПЕГ 1500), що призводить до утворення волокон з більшою пористістю та високою гідрофобністю. В деяких наукових працях використовують воду як пороутворювальний агент для отримання плоских та порожнистоволоконних мембран для мембранної дистиляції, іноді їх поєднують з іншими добавками, такими як LiCl.

У роботі [18] методом інверсії фаз отримали одношарові порожнисті гідрофобні ПВДФ та ПВДФ-ТФЕ мембрани для очищення води за допомогою контактної мембранної дистиляції. Було помічено, що при введенні 50 мас.% частинок (<1 мкм) ПТФЕ в полімерну матрицю ПВДФ утворюється повністю губчаста мікроструктура зі значенням крайового кута змочування 103°. Мембрани при цьому мають вузький розподіл пор за розміром з відносно низьким середнім діаметром пор між 0,116 і 0,308 мкм та високою пористістю вище 73%.

В праці [19] було використано дибутилфталат (ДФФ), полівініліпіролідон (ПВП) і ПЕГ як добавку для отримання ПВДФ-ГФП мембран. З'ясувалось, що при додаванні ДФФ та ПЕГ мембрани мають асиметричну структуру та відносно невеликі розміри пор, в той час як при додаванні ПВП мембрани мають симетричну і мікропористу структуру.

Було досліджено ПЕГ як добавку при формуванні порожнистоволоконних мембран [20]. Відмічено, що морфологія ПВДФ-ГФП мембран в цьому випадку значно змінюється зі складом полімеру і розчинника.

Температурна поляризація

Температура розчину у мембранному модулі завжди нижча за температуру розчину в системі внаслідок теплопередачі крізь мембрану.

Це явище отримало назву температурної поляризації:

$$KТП = \frac{\Delta T_m}{T_{\text{гар.}} - T_{\text{хол.}}}, \quad (2)$$

де $T_{\text{гар.}}$ – температура гарячої сторони, °С;
 $T_{\text{хол.}}$ – температура холодної сторони, °С;
 ΔT_m – зміна температури на мембрані, °С.

Співвідношення (2) є коефіцієнтом температурної поляризації. Він позначає вплив загальної рушійної сили ($T_{\text{гар.}} - T_{\text{хол.}}$), яка забезпечує реальну рушійну силу ΔT_m . В ідеальному випадку КТП дорівнює 1, тобто температура в приповерхневій зоні дорівнює температурі в об'ємі.

Вплив температурної та концентраційної поляризації на продуктивність і селективність мембран завжди негативний. Часткове зменшення такого негативного впливу можливе за рахунок зміни швидкості та характеру потоку розчину і пермеату. Турбулізація також дозволяє зменшити негативний вплив температурної і концентраційної поляризації та інтенсифікувати процес МД, особливо в апаратах з плоскими камерами. Турбулізацію створюють перемішуванням за допомогою напірних каналів або турбулізаторів. Інтенсивне перемішування розчину дає змогу збільшити потік майже удвічі, це пов'язано з частковим зняттям температурної і концентраційної поляризації [21]. Змінюючи швидкість потоку розчину, можна частково зменшити негативний ефект. Також зменшити негативний вплив поляризації можливо турбулізуючи потік, особливо в апаратах з плоскими камерами [22].

Зворотній ефект має концентраційна поляризація під час фільтрації розчинів летких органічних сполук, їхня концентрація у розчині завжди більша ніж, біля поверхні мембрани. Загалом концентраційна поляризація має менший вплив на потік, ніж температурна поляризація.

Течія у порожнистоволоконних модулях організується за принципом протитоку. При цьому температури на виході і на вході з мембрани різні. Як видно з табл. 2, різниця температур суттєва навіть у випадку відносно коротких волокон (довжина 400 мм). Це призводить до різниці середніх температур у різних ділянках волокна, тобто умови масоперенесення різняться вздовж волокна. Різниця вхідної і вихідної температури збільшується зі збільшенням довжини волокон та швидкості потоку [23].

Таблиця 2. Залежність впливу довжини волокон та різниці температур на об'ємну швидкість витікання потоку

Температура, °С				Швидкість течії, м·хв ⁻¹		Потік	Коефіцієнт теплопереносу, К·10 ⁻⁷ , Вт·(м ² ·К) ⁻¹	Константи проникності, кг·(м ² ·с·Па) ⁻¹
Розчин		Дистилят		Розчин	Дистилят			
Вхід	Вихід	Вхід	Вихід					
52	36,9	32,9	48,1	2,44	2,43	2,1	3280	3,31
55	33,5	26,5	48,2	2,94	2,93	3,5	3260	3,39
60,2	32	24,4	53,1	2,46	2,43	4,1	3140	3,44
65	29,3	21,8	59,1	1,7	1,63	3,7	2620	3,15
69	41,6	35,2	63,4	2,44	2,38	5,1	3090	3,44
70,7	38,7	32,4	66,3	2,83	1,73	4,6	2870	3,51

Висновки

Отже, мембранна дистиляція є одним із перспективних методів розв'язання низки технологічних завдань. Висока компактність установок дозволяє використовувати їх практично на будь-яких об'єктах. Для високопродуктивних процесів значно ефективнішим є застосування мембранних модулів зі сплетеними волокнами, оскільки у такому випадку потік буде більш турбулізованим, ніж у інших модулях. Наведені у статті дані засвідчують, що на-

разі застосовується доволі широкий спектр мембранних матеріалів, з яких найбільш перспективними є флуоровмісні полімери, оскільки дозволяють отримувати мембрани з високою гідрофобністю, селективністю, хімічною та механічною стійкістю. Використання згаданих мембран на основі флуоровмісних полімерів та методу контактної мембранної дистиляції дасть можливість досягти продуктивності 18-25 л/м²·год. та є перспективним з точки зору подальших фундаментальних досліджень.

Список літератури

- Schneider K. Membranes and modules for transmembrane distillation / K. Schneider, W. Holz, R. Wollbeck // *Journal of Membrane Sciences*. – 1988. – №39. – P. 25-42.
- Kurokawa H. Heat recovery characteristics of membrane distillation / H. Kurokawa, T. Sawa // *Heat Transl. Jap. Res.* – 1996. – №25. – P. 130-139
- Drioli E. Integrated membrane operations in desalination process / E. Drioli, F. Lagana // *Desalination*. – 1999. – №122. – P. 141-145.
- Khayet M. Design of novel direct contact membrane distillation membranes / M. Khayet, T. Matsuura // *Desalination*. – 2006. – №192. – P. 105 – 111.
- Брик М. Т. Мембранна дистиляція / М.Т. Брик, Р.Р. Нигматулин // *Успехи химии*. – 1994. – №63. – С. 1114-1129.
- Martinez-Diez L. Theoretical and experimental studies on membrane distillation / L. Martinez-Diez, F.J. Florido-Diaz // *Desalination*. – 2001. – №139. – P. 373-379.
- Martinez-Diez L. Study of evaporation efficiency in membrane distillation / L. Martinez-Diez, F.J. Florido-Diaz, M.I. Vazquez-Gonzalez // *Desalination*. – 1999. – №126. – P.193-198.
- Li B. Novel membrane and device for direct contact membrane distillation-based desalination process/ B. Li, K.K. Sirkar // *Eng.Chem.Res.* – 2004. – №43. – P.5300-9.
- Simonea S. Preparation of hollow fibre membranes from PVDF/PVP blends and their application in VMD / S. Simonea, A. Figoli, A. Criscuoli // *Journal of Membrane Science*. – 2010. – №364. – P. 219-232.
- Sundaram N.T. Microstructure of PVDF-co-HFP based electrolyte prepared by preferential polymer dissolution process / N.T. Sundaram, A. Subramania // *Journal of Membrane Science*. – 2007. – №289. – P.1-6.
- Li B. Novel membrane and device for vacuum membrane distillation based desalination process/ B. Li, K.K. Sirkar // *J. Membr. Sci.* – 2005. – №257. – P.60-75.
- Wu B. Removal of 1,1,1-trichloroethane from water using a poly(vinylidene fluoride) hollow fiber membrane module: vacuum membrane distillation operation / B. Wu, X. Tan, K. Li // *Separation and Purification Technology*. – 2006. – №52. – Vol. 301 – P.9.
- Martinez L. On transport resistances in direct contact membrane distillation / L. Martinez, J.M. Rodriguez-Maroto // *Journal of Membrane Science*. – 2007. – №295. – P. 28-39.
- Wang K.Y. Hydrophobic PVDF hollow fiber membranes with narrow pore size distribution and ultra-thin skin for the fresh water production through membrane distillation / K.Y. Wang, T.S. Chung, M. Gryta // *Chemical. Engineering Science*. – 2008. – №63. – P. 2587-2589.

15. Bonyadi S. Highlyporousand macrovoid-free PVDF hollow fiber membranes for membrane distillation by a solvent-dope solution co-extrusion approach / S. Bonyadi, T.S. Chung // Journal of Membrane Science. – 2009. – №331. – P.66–74.
16. Wang K.Y. Mixedmatrix PVDF hollow fiber membranes with nanoscale pores for desalination through direct contact membrane distillation / K.Y. Wang, S.W. Foo, T.S. Chung // Ind. Eng. Chem. Res. – 2009. – №48 – P. 4474.
17. Teoh M. Membrane distillation with hydrophobic macrovoid-free PVDF-PTFE hollow fiber membranes / M. Teoh, T. Chung // Separation and Purification Technology. – 2009. – №.66. – P. 229–236.
18. Hou D. Fabrication and characterization of hydrophobic PVDF hollow fiber membranes for desalination through direct contact membrane distillation / D. Hou, J. Wang, D. Qu // Separation and Purification Technology. – 2009. – №69. – P. 78–86.
19. Teoh M. M. Chung Membrane distillation with hydrophobic macrovoid-free PVDF-PTFE hollow fiber membranes / M.M. Teoh, T.-Sh. Chung // Separation and Purification Technology. – 2009. – №66. – P. 229–236.
20. Cao J.H. Structure and ionic conductivity of porous polymer electrolytes based on PVDF-HFP copolymer membranes / J.H. Cao, B.K. Zhu, Y.Y. Xu // Journal of Membrane Science. – 2006. – №281.– P. 446–453.
21. Hwang Y.J. Electrochemical studies on poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) membranes prepared by phase inversion method / Y.J. Hwang, S.K. Jeong, K.S. Nahm // European Polymer Journal. – 2007. – №43. – P. 65–71.
22. Bonyadi S. Flux enhancement in membrane distillation by fabrication of dual layer hydrophilic–hydrophobic hollow fiber membranes / S. Bonyadi, S. Chung // J. Membr Sci. – 2007. – № 306. – P. 134–46.
23. Bonyadi S., A novel approach to fabricate macrovoid free and highly permeable PVDF hollow fiber membranes for membrane distillation / S. Bonyadi, T. Chung, R. Rajagopalan // AIChE J. – 2009. – in press.

V. Petruk, P. Vakuliuk, A. Burban

HOLLOW FIBER MEMBRANES AND MODULES FOR THE PROCESSES OF MEMBRANE DISTILLATION

In the research the theoretical and experimental studies of membrane distillation (MD) were analyzed. Special attention was provided to the properties of membranes and methods of their formation. As a result of the analysis the conclusions were made concerning the perspectives of scientific and technological works for the receiving the membranes and modules for the processes of membrane distillation.

Key words: membrane distillation, hollow fiber membranes, fluorinated polymers.

Матеріал надійшов 20.01.2013