



XҒТАР 678.6/.7; 544.23.522

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-147-2-24-37>

Ғылыми мақала

## Тікелей осмоста қолдану үшін полиэтилентерефталатты тректік мембраналардың тотығуы

И.В. Корольков\*<sup>1</sup>, А.Р. Сулейманова<sup>2</sup>, И.Б. Муслимова<sup>3</sup>, М.В. Здоровец<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

(E-mail: <sup>1</sup>i.korolkov@inp.kz, <sup>2,4</sup>info@inp.kz, <sup>3</sup>bazarbaykyzy@list.ru)

**Аңдатпа.** Бұл зерттеуде алғаш рет «үлкен құдық – кеуекті түбі» бірегей геометриясы бар тректік мембраналардың тотығуын талдау жүзеге асырылды. Олардың физикалық-химиялық сипаттамалары, оның ішінде беріктігі, ауа мен су бойынша өнімділігі, сондай-ақ гидрофобтық-гидрофильдік қасиеттері зерттелді. Зерттеу ерітінді концентрациясы мен кеуектің геометриясына байланысты сүзу ағынының өзгеруін қоса алғанда, тікелей осмос процестерінде мембраналардың өнімділігіне кеуектің пішіні мен мөлшерінің әсерін талдауды қамтыды. Осындай құрылымды мембраналар өздерінің механикалық қасиеттері мен өткізгіштігінің арқасында тікелей осмоста жоғары тиімділікті көрсетеді. Тотығудың оңтайлы жағдайлары мембраналардың гидрофильділігін жақсарту есебінен өнімділікті 28%-ға арттыруға ықпал етті, бұл олардың сүзгілеу қабілетінің ұлғаюына әкелді. Бұдан басқа, электр өткізгіштігі бойынша бағаланған суды тазарту деңгейі шамамен 100%-ға жететіні анықталды. Мембраналардың өнімділігі шоғырлану айырмашылығының өсуімен ұлғаюын байқау қызығырақ болып табылады, яғни бұл парциалдық қысымның ұлғаюына байланысты. Дегенмен, тікелей осмостан кейін мембраналарда каналдардың тұз шөгінділерімен ластанғаны анықталады, бұл сканерлейтін электрондық микроскопияның көмегімен расталды. Бұл қорытындылар өнеркәсіп пен коммуналдық шаруашылықта мембраналық технологияларды неғұрлым тиімді және экономикалық тиімді пайдалануды қамтамасыз ете отырып, сұйықтықтарды тазалау және сүзу саласында әртүрлі қолданулар үшін арнайы бейімделген мембраналарды жобалаудың жаңа тәсілдерін дамытуға ықпал етуі мүмкін.

**Түйін сөздер:** тректік мембраналар, тотығу, тікелей осмос, полиэтилентерефталат, гидрофильділік.

Түсті: 28.03.2024 Мақұлданды: 17.04.2024 Онлайн қолжетімді 29.06.2024

<sup>1</sup>\* И.В. Корольков

## Кіріспе

Соңғы бірнеше онжылдықта сұраныстың ұдайы өсуінен тұщы судың жетіспеушілігі адам қоғамының тұрақты дамуына қауіп төндіруде. Бұдан басқа, әртүрлі өнеркәсіптік төгінділер табиғи су ресурстарын ластап, елеулі экологиялық проблемалар туғызады. Сондықтан таза сумен қамтамасыз етудің шешуші мәні бар және суға өсіп келе жатқан қажеттілікті қанағаттандыру үшін қол жеткізілуі тиіс. Дистилляция [1], ион алмасу [2] және электродиализ [3] сияқты әртүрлі технологиялар таза су өндіру үшін зерттелді. Алайда бұл әдістер күрделі процедураларды талап етеді және энергияның көп мөлшерін тұтынады, немесе судың қайталама ластануына әкелетін көптеген химиялық заттарды қамтиды. Әлемдік су ресурстарының >97% -ын теңіз сулары құрайтынын ескере отырып, теңіз суын тұщыландыру суды тазартудың маңызды перспективасы әдісіне айналды [4].

Тұзсыздандыру – бұл тұзды судың құрамындағы тұздарды жою және адамның тұтынуына, сондай-ақ өнеркәсіптік және ауыл шаруашылығы мақсаттарына жарамды тұщы сумен қамтамасыз ету процесі және су тапшылығы дағдарысын шешу үшін сенімді және тиімді тәсіл ретінде қарастырылады [5]. Соңғы онжылдықтар ішінде мембраналық технология суды ғана емес, мұнай мен газды бөлудің және тазартудың кеңінен қолданылатын әдісіне айналды. Мембраналық бөлуді пайдаланудың артықшылығы химиялық заттардың болмауы немесе аздаған қажеттілігі, қарапайым алу және энергияны салыстырмалы түрде төмен тұтыну болып табылады.

Мембраналық тұщыландыру кезінде кері осмос (КО), тікелей осмос (ТО), микрофльтрация (МФ) [6], нанофльтрация (НФ) [7] және ультра сүзгілеу (УС) [6] әдістері қолданылады. Сүзгілеу процестері төрт топқа бөлінеді: МФ (0,1-2,0 мкм), УС (2-100 нм), НФ (1-10 нм) және КО (< 1 нм).

Қазіргі кезде суды тұщыландырудың неғұрлым пайдаланылатын әдістерінің ішінде КО-тың мембраналық процесі пайдаланылады. Тұщыландыру қысыммен басқарылатын типтік процесс болып табылады, онда қозғалтқыш күш ретінде сыртқы гидравликалық қысым қолданылады, ал еріген заттар жартылай өткізгіш мембранамен (КО мембранасы деп аталады) алынып тасталады [8].

КО - сұйықтық/сұйықтық бөлген кездегі ең қатаң мембраналық процесс түрі. Негізінен, су мембранадан өтетін жалғыз зат болып табылады; ал барлық еріген және өлшенген материал дерлік сүзіледі.

Сонымен қатар, қолда бар мембраналардың төмен өнімділігіне байланысты суды ТО-пен тазарту бағыты аз зерттелген тақырып болып табылады. Сонымен бірге, тазартудың осы әдісі тұзсыздандыру процесінің энергия шығынын айтарлықтай төмендетуі мүмкін, өйткені онда қысым айырмашылығы да, температура айырмашылығы да талап етілмейді. ТО – еріткіш молекулаларының, мысалы судың жартылай өткізгіш мембраналар арқылы тасымалдануын сипаттайтын осмостың табиғи құбылысы. Тік осмостағы еріткішті тасымалдаудың қозғаушы күші осмотикалық қысымның айырмасы болып табылады. Концентрацияланған ерітінді ерітіндінің/судың молекулаларын сұйылтылған ерітіндіден, мысалы тұздалған ерітіндіден жартылай өткізетін мембранадан тартады, бұл ретте өзі сұйылтылады. Алынған сұйылтылған ерітінді белгілі

бір температураға дейін қыздырылады, бұл ретте еріткіштің/судың бөлшектері буланады, ал онда зат тұндырылады не ыдырайды және бастапқы тұзды суға қарағанда концентрациясы аз ерітінді алынады. Сұйытылған ерітіндіні қайта циркуляциялау үшін қайта шоғырландырады.

Алайда өнеркәсіптік ауқымда тікелей осмосты қолдануға кедергі келтіретін бірқатар техникалық кедергілер бар. Тікелей осмостың алдыңғы зерттеулерінің нәтижелері бойынша тікелей осмостың эксперименттік ағыны әдетте ерітінділердің классикалық теориясы – диффузия бойынша есептелген оның теориялық мәндеріне қарағанда едәуір төмен екені белгілі [11-13]. Күтілгеннен төмен ағын массаны тасымалдау процесінде ішкі және сыртқы концентрациялық поляризацияның (ІКП және СКП) болуымен түсіндіріледі, бұл осмостың қолжетімді қозғаушы күшін едәуір төмендетеді [11]. Қиылысу ағысының неғұрлым төмен жылдамдығы шекаралық қабаттың қалыңдығын және СКП дәрежесін арттырады. Сыртқы концентрациялық поляризацияны гидродинамикалық бақылауға болады, бірақ ішкі поляризация мембрананың кеуекті төсемінде болуы, бұл оны басқаруда белгілі бір қиындықтар тудырады. Концентрацияның концентрациялық поляризациясы құбылысы еріген заттың физикалық қасиеттерімен, сұйықтықтардың динамикасымен және ең маңыздысы мембрананың құрылымымен байланысты. Осылайша, негізгі міндеттердің бірі концентрациялық поляризацияны барынша азайтуға қабілетті оңтайландырылған – ағынның айтарлықтай төмендеуінің негізгі себебі болатын мембрананы жасау болып табылады [10-12]. Мұндай мембрананың коммерциялық кері осмос мембраналарымен салыстырғанда жоғары өнімділігі болуы тиіс [1,4]. Осылайша, тікелей осмос мембраналарының қажетті сипаттамалары ішкі концентрациялық поляризацияның төмен мәндерін қамтамасыз ететін жоғары кеуектілікпен салыстырмалы түрде жұқа негізде ұсталатын еріген заттың су өткізгіштігі мен төмен өткізгіштігі бар тығыз ультра жұқа белсенді қабат болады [10,12]. Бұдан басқа, мембрана мембрананың ластануын азайту үшін гидрофильді болуы тиіс [14] және ұзақ пайдалануға шыдау үшін жоғары механикалық беріктікке ие болуы тиіс.

Мембраналық технология саласындағы көптеген жұмыстар әдістердің өнімділігін арттыруға, энергия шығындарын азайтуға және экологиялық проблемаларды шешуге бағытталған. Соңғы уақытта тікелей осмос әдісі барған сайын өзектілікке ие болуда, ол перспективада сарқынды суларды тиімді тазарту, теңіз суын тұщыландыру және басқалар үшін табысты қолданылуы мүмкін, әрі мұндай мембраналардың өнімділігі коммерциялық мембраналармен салыстырылуы тиіс. Осы мақсаттарға қол жеткізу үшін әлемнің түкпір-түкпірінен келген ғалымдар мембраналардың құрылымы мен морфологиясын, олардың бағдарын, сорғыш ерітіндісі мен қоректік ерітіндінің сипаттамаларын жетілдіруге күш салуда. Алайда, соңғы уақытта осы саладағы сөзсіз прогреске қарамастан, бұл тақырып әлемдік қоғамдастық үшін өзекті болып қалуда.

Осы жұмыс шеңберінде алғаш рет «үлкен құдық - кеуекті түбі» күрделі геометриялы ТМ тотығу бойынша зерттеулер жүргізілді. жарылуға беріктігі, ауа және су бойынша өнімділігі сияқты ТМ физикалық-химиялық қасиеттері зерттелді, тректердің геометриясы мен диаметріне байланысты, тікелей осмос процестерінде ТМ өнімділігіне зерттеу жүргізілді, сүзілетін сұйықтық ағынының өзгеруінің тректер геометриясына

тәуелділігі анықталды, ерітіндінің шоғырлануына байланысты сүзілетін сұйықтық ағынының өзгеру тәуелділігі анықталған, сондай-ақ ТМ-нің селективтілігі мен ластану дәрежесіне зерттеулер жүргізілген.

### **Тәжірибе әдістемесі**

*Зерттеу үлгілері.* Зерттелетін полимерлік пленка қалыңдығы 23 мкм «Mitsubishi Polyester Film» (Германия) компаниясы шығарған Hostaphan® типті полиэтилентерефталаттан (ПЭТФ) таңдап алынды. Полимер пленканы сәулелеу ДЦ-60 ауыр иондар үдеткішінде екі кезеңде жүргізіледі. Мембраналар фотосенсибилизациядан кейін 2,2 М натрий гидроксиді ерітіндісінде химиялық өңдеуге ұшырайды, белгілі бір кезеңдер ішінде берілген өлшемдегі кеуектердің диаметрін алу үшін қолданылатын температура – 85°C.

Сондай-ақ тәжірибелерде мынадай реактивтер пайдаланылды: сутегі асқын тотығы, сірке қышқылы, тұз қышқылы, көк толуидин, деионизацияланған су, тазартылған су, натрий хлориді, олар х.т. және т.а.т.

ПЭТФ ТМ УК сәулелену әсерімен сутегі пероксидімен тотықтандыру. ПЭТФ ТМ (6,5 × 12 см<sup>2</sup>) үлгілерін рН = 3 (HCl) кезінде 0,3 моль концентрациясы H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ерітіндіде тотықтандырды. Тотығу үш қатар эксперименттерде 15-180 мин. Сондай-ақ, ПЭТФ пленкадан УК-шамға дейінгі қашықтық 7, 10, 15 см шегінде өзгерді, Қышқылданғаннан кейін үлгілер екі рет деионизацияланған сумен жуылып, кептірілді. УК-сәулеленудің әсерімен тотығу OSRAM Ultra Vitalux E27 (UVA: 315-400 нм, 13,6 Вт; UVB: 280-315 нм, 3,0 В) 15-120 минутқа. ПЭТФ ТМ тотықтыруды жүргізу схемасы мен процесі алдыңғы жұмыстарда егжей-тегжейлі сипатталған [15-17].

#### *Толуидинді көк бояу әдісімен функционалдық топтарды сандық бағалау*

Түпкі карбоксил топтарын анықтау үшін рН = 10 (NaOH) концентрациясы 0,5 мМ көк толуидин ерітіндісінің 10 мл дайындалды. Өлшемі 1x1 см<sup>2</sup> ПЭТФ ТМ үлгілерін толуидин көк ерітіндісіне салып, бояғышты толық сіңіру үшін 3 сағат бойы ұсталынады. Алынған боялған үлгілер NaOH ерітіндісінде және деионизацияланған суда екі реттен жуылды.

Десорбция үшін боялған үлгілер 50% сірке қышқылының ерітіндісіне түсіріліп, 10-15 минут бойы ұсталды, Боялған сірке ерітіндісінің оптикалық тығыздығын  $\lambda = 630$  нм кезінде анықтады. Калибрлеу кестесі бойынша карбоксил топтарының шоғырлануын табады.

*Түрлендірілген мембраналардың құрылымы мен қасиеттерін физика-химиялық әдістермен зерттеу*

*Сулаудың шеткі бұрышын (СШБ) анықтау.* Мембрананың гидрофильді-гидрофобты қасиеттерін анықтау үшін статикалық құлау әдісімен ұлғайған кезде сандық микроскоппен 1000X өлшенетін СШБ анықтау әдісі пайдаланылды.

Үлгіні арнайы заттық үстелге қойып, жиектері бекітілді. Содан кейін үлгіге шприц-дозатор көмегімен тамшы түсірілді. Тамшыны бір жағынан шам арқылы жарықтандырады, екінші жағынан микроскопты бейнекамераға түсіреді. Тамшы түсірілімдері арнайы ImageJ бағдарламасымен өңделді, онда тамшыны эллиптикалық сипаттау арқылы СШБ автоматты түрде есептеледі.

Бетті сканерлейтін электрондық микроскопиямен (СЭМ) зерттеу. JEOL JSM-7500F (SEM) сканерлейтін электрондық микроскоп ПЭТФ-ТМ модификациясына дейін және кейін ұяшықтардың диаметрлері мен морфологиясын сипаттау үшін пайдаланылды.

Бұл жұмыста үлгінің үстіңгі қабатының микроструктурасын зерттеу, сондай-ақ мембраналардың үстіңгі қабатындағы көздің диаметрін анықтау қайталама электрондар режимінде жүргізілген. Үдеткіш кернеу 1 кВ орнатылды, үлгінің алдында электрондарды тежеу және бастапқы шоқ энергиясын 100 В дейін төмендету жүзеге асырылды, Мембраналардың беті алтын қабатпен жабылды, бұл үлгінің бетінде статистикалық әлеуеттің жинақталуын болдырмау есебінен бейнелеу сапасын жақсартты. Тозаңдандыру қабатының қалыңдығын стандартты калибрлеу кестесі бойынша ток пен тозаңдандыру уақытын (15-20 нм аспайтын) таңдау жолымен анықтады.

### Нәтижелер мен талқылаулар

Алынған тректік мембраналардың параметрлері 1 кестеде берілген.

#### 1-кесте. Күйдірудің әртүрлі уақытында өлшенген СЭМ каналдарының диаметрлері

| Күйдіру уақыты, с | SEM бойынша диаметрі «кеуекті түбі», (конустың негізі) нм | SEM бойынша диаметрі «құдықтар», мкм | Конустың жоғарғы диаметрі «кеуекті түбі» (өткізгіштігі бойынша), нм |
|-------------------|---|--------------------------------------|---|
| 10                | 20  | 2,01                                 | 0,8   |
| 20                | 17  | 2,01                                 | 1,4   |
| 30                | 35  | 2,02                                 | 2,1   |
| 40                | 50  | 2,20                                 | 2,8   |
| 60                | 73  | 2,20                                 | 3,1   |
| 80                | 100   | 2,32                                 | 5,6   |
| 100               | 130   | 2,33                                 | 8,5   |
| 160               | 278   | 2,46                                 | -   |
| 200               | 288   | 2,50                                 | -   |
| 240               | 293   | 2,85                                 | -   |
| 560               | 429   | -                                    | -   |

Одан әрі мембраналардың гидрофильді қасиеттерін арттыру және тікелей осмос өнімділігін арттыру мақсатында OSRAM Ultra Vitalux E27 (UVA: 315-400 Нм, 13,6 Вт шамдарының көмегімен ультракүлгін сәулелену арқылы экологиялық таза және техноогиялық тұрғыдан оңай жүзеге асырылатын сутегі тотығында мембраналарды тотықтандыру жүргізілді; UVB: 280-315 нм, 3.0 В). Тректік мембраналардың үлгілері (5 × 7,5 см<sup>2</sup>) концентрациясы 300 мМ Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> ерітіндісінде рН = 3 (HCl) кезінде тотықтандырылды.

Қышқылдандыру үлгіден УК-шамға дейінгі арақашықтық 15-180 минут бойы үш қатар экспериментте 5-тен 15 см-ге дейін жүргізілді. Қышқылданғаннан кейін үлгілерді екі рет деионизацияланған сумен жуып, 5 сағат бойы бөлме температурасында ауада кептіреді.

Процестің тиімділігі сулаудың шеткі бұрышының (СШБ) өзгеруі бойынша, сондай-ақ мынадай әдістеме бойынша өлшенген карбоксильді топтардың шоғырлануының өзгеруі бойынша бақыланды: мөлшері 1 см<sup>2</sup> ПЭТФ ТМ үлгісі  $5 \cdot 10^{-4}$  М шоғырланумен ТК 10 мл сілтілі ерітіндіге (NaOH, pH = 10) орналастырылды және 3 сағат бойы шейкерде үздіксіз сілкіп, осылайша бояғыштың мембрананың бетіне барынша толық сіңуін қамтамасыз етеді. Сілкілеу аяқталғаннан кейін үлгіні NaOH (pH = 10) ерітіндісінде және екі рет деионизацияланған суда жуып, содан кейін ауадағы сүзгі қағазында кептіреді. Боялған үлгілерді десорбциялауды 5 мл 50% сірке қышқылының ерітіндісінде шейкерде қарқынды сілкілеу кезінде 10 мин бойы жүргізді. Боялған ерітіндінің оптикалық тығыздығын толқынның ұзындығы 633 нм болғанда анықтаған, түпкі карбоксильді топтардың шоғырлануын калибрлеу кестесі бойынша анықтаған.

Беріктік қасиеттерін анықтау зертханалық қондырғыдағы мембранға төзімді болатын ең жоғары қысымды анықтау әдісімен жүргізілді. Қондырғы баяу өзгертін қысыммен жүктеу кезінде ТМ зертханалық үлгілерінің үзілуіне беріктікті өлшеуге арналған.

СШБ, карбоксил топтарының шоғырлануы мен үзілуге беріктігін өзгерту нәтижелері 2 кестеде келтірілген. Бұл ретте бастапқы мембранамен 40 с химиялық өңдеу уақыты бар мембрана таңдалды.

Ұсынылған деректерден көрініп тұрғандай, УК-шамға дейінгі арақашықтық – 10 см, тотығу уақыты мембрананың әрбір жағынан 60 минуттан. Бұл жағдайларда үлдірдің барынша гидрофилизациясы болады, бұл беріктік сипаттамаларын сақтаумен бірге СШБ өзгеруінен және карбоксил топтарының шоғырлануынан көрінеді. Әртүрлі жағдайларында су тамшыларының фотосуреттері 3 кестеде берілген.

## 2-кесте. Үлгіден УК-көзіне дейінгі қашықтыққа және тотығу уақытына байланысты СШБ және карбоксил топтарының концентрациясының өзгеруі

| Үлг. № | УК-көзіне дейінгі қашықтық, см | Сәулелену уақыты, мин | СШБ, <sup>0</sup> | [COOH], мкМ/г | Үзілуге беріктігі, МПа |
|--------|--------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------|------------------------|
| 1      | -                              | 0                     | 65                | 3,4           | >0,7                   |
| 2      | 7                              | 15                    | 62                | 5,4           | >0,7                   |
| 3      | 7                              | 30                    | 61                | 7,2           | 0,23                   |
| 4      | 7                              | 60                    | 60                | 10,5          | 0,11                   |
| 5      | 7                              | 90                    | 59                | 19,4          | 0,04                   |
| 6      | 10                             | 15                    | 61                | 8,3           | >0,7                   |
| 7      | 10                             | 30                    | 61                | 8,6           | 0,47                   |
| 8      | 10                             | 60                    | 58                | 10,7          | 0,39                   |

|    |    |     |    |      |      |
|----|----|-----|----|------|------|
| 9  | 10 | 90  | 57 | 22   | 0,11 |
| 10 | 15 | 15  | 60 | 4,4  | >0,7 |
| 11 | 15 | 30  | 60 | 4,6  | 0,23 |
| 12 | 15 | 60  | 57 | 4,8  | 0,17 |
| 13 | 15 | 90  | 62 | 7,5  | 0,10 |
| 14 | 15 | 120 | 45 | 14,8 | 0,04 |
| 15 | 15 | 180 | 44 | 39,6 | 0,04 |

Тректердің диаметрлері мен арналар геометриясына байланысты ТМ өнімділігін тікелей осмос режимінде бағалау үшін «үлкен құдық – кеуекті түбі» – 1,2Е + 06/1,0Е + 09 геометриясы бар, қалыңдығы 20 мкм, тректердің әртүрлі диаметрлері бар, сондай-ақ тотығуға дейін және кейін ПЭТФ негізінде мынадай мембраналар таңдалды: бұрын табылған оңтайлы жағдайлар. Алынған мембраналардың өнімділігін зерттеу үшін тікелей осмос процестерінде 10 мМ NaCl (сүзілетін ерітінді) және 1-4 М NaCl (сорғыш ерітіндісі) қолданылды. Ағындардың жылдамдығы перестальтикалық сорғыштардың көмегімен бақыланды.

Теориялық байқау қысымы эксперимент басында тұз концентрациясын пайдалана отырып, Вант-Холф теңдеуі бойынша есептелген:

$$\pi = i \frac{\Delta CRT}{M_i} \quad (1)$$


мұндағы  $i$  – Вант-Холф коэффициенті және мінсіз ерітінділер үшін 2-ге тең.












Эксперимент кезінде қозғалыстағы осмостың күші сорғыш ерітіндісінің сұйылуынан азаяды.

1 суретте химиялық өңдеу уақытына байланысты тікелей осмос процесінде су ағысының өзгеру диаграммалары берілген. Химиялық уақытының ұлғаюымен өнімділіктің артуы байқалады, бұл табиғи түрде мембраналардың көздері көлемінің ұлғаюымен байланысты.

2 суретте мембраналардың өнімділігінің сорғыш концентрациясына тәуелділігі берілген. Сондай-ақ ерітінділер концентрациясының айырмашылығының ұлғаюымен өнімділіктің артуы байқалады, бұл парциалдық қысымның ұлғаюымен түсіндіріледі.

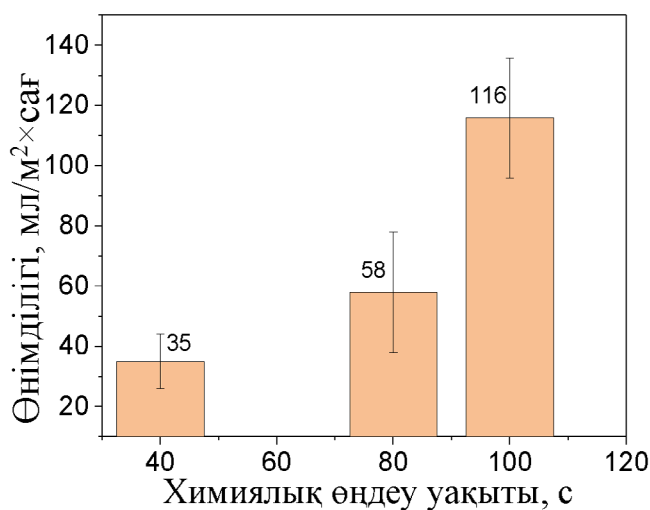
### 3-кесте. Сәулелену уақытына және УК-көзіне дейінгі қашықтыққа байланысты тамшылар нысандарының өзгеруі

| Үлг. № | УК-көзіне дейінгі қашықтық, см | Сәулелену уақыты, мин | Тамшы суреті  |
|--------|--------------------------------|-----------------------|---|
| 1      | -                              | 0                     |  |

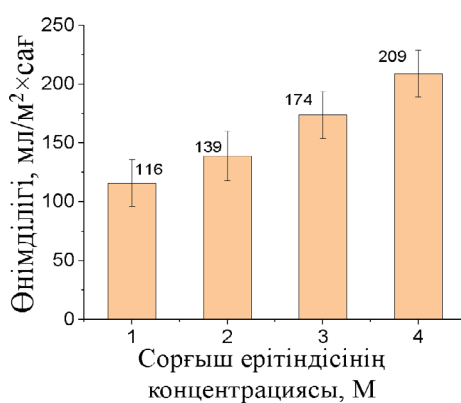
|    |    |     |   |
|----|----|-----|---|
| 2  | 7  | 15  |    |
| 3  | 7  | 30  |    |
| 4  | 7  | 60  |    |
| 5  | 7  | 90  |    |
| 6  | 10 | 15  |    |
| 7  | 10 | 30  |    |
| 8  | 10 | 60  |    |
| 9  | 10 | 90  |    |
| 10 | 15 | 15  |  |
| 11 | 15 | 30  |  |
| 12 | 15 | 60  |  |
| 13 | 15 | 90  |  |
| 14 | 15 | 120 |  |
| 15 | 15 | 180 |  |

Сондай-ақ оңтайлы жағдайларда қышқылданудың сұйықтық ағынының жылдамдығына әсері зерттелді. Тікелей осмос өнімділігінің 28% -ға артқаны байқалады. Тотығу мембраналардың гидрофильді қасиеттерінің ұлғаюына әкеледі, бұл өз кезегінде өнімділіктің ұлғаюына әкеледі (3 сурет).

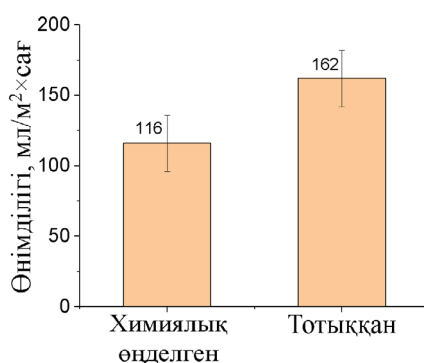




1-сурет. Химиялық өңдеу уақытына байланысты тікелей осмос өнімділігінің өзгеруі



2-сурет. Сорғыш ерітіндісінің концентрациясына байланысты тікелей осмос өнімділігінің өзгеруі



3-сурет. Тотыққан және химиялық өңделген ПЭТФ ТМ үшін тікелей осмос өнімділігінің өзгеруі

Барлық мембраналар үшін электр өткізгіштігі бойынша бағаланған тазалау деңгейі шамамен 100% -ды құрайтынын атап өткен жөн. ТО кейін мембраналар СЭМ әдісімен зерттелді. Мембраналар арналарының тұзды шөгінділермен ластануы байқалады.

Нәтижелерге сүйене отырып, күйдіру уақытының ұлғаюымен өнімділіктің артуы байқалады, мембраналардың гидрофильділігі тотығу салдарынан ұлғайды. Сондай-ақ сорғыш ерітінділері концентрациясының айырмашылығының ұлғаюымен өнімділіктің ұлғаюы байқалады. Бірақ мембраналар арналарының ұзақ пайдаланудан кейін ластануы әлі де байқалады.

### **Қорытынды**

Бұл жұмыста мембраналарды гидрофилизациялау мақсатында «үлкен құдық - кеуекті түбі» геометриясы бар тректік мембраналардың ПЭТФ тотықтыру әдістері зерттелді. Алынған мембраналар үзілуге беріктік әдістерімен, сулану шеткі бұрышын және карбоксил топтарының концентрациясын айқындаумен сипатталған. Кеуектердің әртүрлі өлшемдері мен гидрофилденген беті бар алынған мембраналар тікелей осмос әдісімен суды тұзсыздандыруда сыналған.

«Үлкен құдық – кеуекті түбі» геометриясы бар мембраналар өзінің беріктік қасиеттерінің, өнімділігі мен өткізгіштігінің арқасында тікелей осмос процестерінде қолдану үшін перспективалы материал болып табылады. Оңтайлы жағдайларда сұйықтық ағынының жылдамдығына тотығудың әсерін зерттеу тікелей осмос өнімділігінің 28% -ға ұлғайғанын көрсетті. Тотығу мембраналардың гидрофильді қасиеттерінің артуына әкеледі, бұл өз кезегінде өнімділіктің артуына әкеледі. Барлық мембраналар үшін электр өткізгіштігі бойынша бағаланған тазалау деңгейі шамамен 100% -ды құрағанын атап өткен жөн. Сондай-ақ ерітінділер концентрациясының айырмашылығының ұлғаюымен өнімділіктің ұлғаюы байқалады, бұл парциалдық қысымның ұлғаюымен түсіндіріледі. Алайда, тікелей осмостан кейін, СЭМ әдісімен зерттелген мембраналарда мембраналар арналарының тұзды шөгінділермен ластануы байқалады.

### **Мүдделер қақтығысы жоқ**

### **Авторлардың қосқан үлесі**

Концептуализация – **И.В. Корольков** және **М.В. Здоровец**; әдістемесі – **А.Р. Сулейманова** және **И.В. Корольков**; валидация – **И.Б. Муслимова** және **А.Р. Сулейманова**; тергеу – **И.Б. Муслимова** және **А.Р. Сулейманова**; түпнұсқа жобасын дайындау – **И.В. Корольков** және **И.Б. Муслимова**; шолу жазу және өңдеу – **И.В. Корольков**. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасымен танысып, келісті.

**Қаржыландыру:** жоқ

### Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Zou S., Gu Y., Xiao D., Tang C.Y. The role of physical and chemical parameters on forward osmosis membrane fouling during algae separation // *Journal of Membrane Science*. - 2011. - Vol. 366, № 1–2. - P. 356–362. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.10.030>.
2. Achilli A., Cath T.Y., Marchand E.A., Childress A.E. The forward osmosis membrane bioreactor: A low fouling alternative to MBR processes // *Desalination*. - 2009. - Vol. 239, № 1–3. - P. 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.02.022>.
3. Wang R., Shi L., Tang C.Y., Chou S., Qiu C., Fane A.G. Characterization of novel forward osmosis hollow fiber membranes // *Journal of Membrane Science*. - 2010. - Vol. 355, № 1–2. - P. 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.03.017>.
4. Fang W., Wang R., Chou S., Setiawan L., Fane A.G. Composite forward osmosis hollow fiber membranes: Integration of RO- and NF-like selective layers to enhance membrane properties of anti-scaling and anti-internal concentration polarization // *Journal of Membrane Science*. - 2012. - Vol. 394–395. - P. 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.12.034>.
5. Cornelissen E., Harmsen D., Dekorte K., Ruiken C., Qin J., Oo H., Wessels L. Membrane fouling and process performance of forward osmosis membranes on activated sludge // *Journal of Membrane Science*. - 2008. - Vol. 319, № 1–2. - P. 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.03.048>.
6. Holloway R., Childress A., Dennett K., Cath T. Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate // *Water Research*. - 2007. - Vol. 41, № 17. - P. 4005–4014. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.05.054>.
7. Miller J., Evans L. Forward osmosis: a new approach to water purification and desalination. - Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2006. - [Report] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/255636596\\_Forward\\_Osmosis\\_A\\_New\\_Approach\\_to\\_Water\\_Purification\\_and\\_Desalination](https://www.researchgate.net/publication/255636596_Forward_Osmosis_A_New_Approach_to_Water_Purification_and_Desalination)
8. McCutcheon J.R., McGinnis R.L., Elimelech M. Desalination by ammonia–carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance // *Journal of Membrane Science*. - 2006. - Vol. 278, № 1–2. - P. 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.10.048>.
9. Petrotos K.B., Quantick P., Petropakis H. A study of the direct osmotic concentration of tomato juice in tubular membrane – module configuration. I. The effect of certain basic process parameters on the process performance // *Journal of Membrane Science*. - 1998. - Vol. 150, № 1. - P. 99–110. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(98\)00216-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(98)00216-6).
10. Xu Y., Peng X., Tang C.Y., Fu Q.S., Nie S. Effect of draw solution concentration and operating conditions on forward osmosis and pressure retarded osmosis performance in a spiral wound module // *Journal of Membrane Science*. - 2010. - Vol. 348, № 1–2. - P. 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.11.013>.
11. McCutcheon J.R., Elimelech M. Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis // *Journal of Membrane Science*. - 2006. - Vol. 284, № 1–2. - P. 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.07.049>.
12. Mccutcheon J.R., Elimelech M. Modeling water flux in forward osmosis: Implications for improved membrane design // *AIChE Journal*. - 2007. - Vol. 53, № 7. - P. 1736–1744. <https://doi.org/10.1002/aic.11197>.
13. Greenlee L.F., Lawler D.F., Freeman B.D., Marrot B., Moulin P. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges // *Water Research*. - 2009. - Vol. 43, № 9. - P. 2317–2348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>.

14. Howe K.J., Clark M.M. Fouling of Microfiltration and Ultrafiltration Membranes by Natural Waters // Environmental Science & Technology. - 2002. - Vol. 36, № 16. - P. 3571–3576. <https://doi.org/10.1021/es025587r>.

15. Korolkov I.V., Güven O., Mashentseva A.A., Atıcı A.B., Gorin Y.G., Zdorovets M.V., Taltenov A.A. Radiation induced deposition of copper nanoparticles inside the nanochannels of poly(acrylic acid)-grafted poly(ethylene terephthalate) track-etched membranes // Radiation Physics and Chemistry. - 2017. - Vol. 130. - P. 480–487

16. Korolkov I.V., Mashentseva A.A., Güven O., Niyazova D.T., Barsbay M., Zdorovets M.V. The effect of oxidizing agents/systems on the properties of track-etched PET membranes // Polymer Degradation and Stability. - 2014. - Vol. 107. - P. 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.05.008>.

17. Russakova A.V., Altynbaeva L.Sh., Barsbay M., Zheltov D.A., Zdorovets M.V., Mashentseva A.A. Kinetic and Isotherm Study of As(III) Removal from Aqueous Solution by PET Track-Etched Membranes Loaded with Copper Microtubes // Membranes. - 2021. - Vol. 11, № 2. - P. 116. <https://doi.org/10.3390/membranes11020116>.

**И.В. Корольков\*, А.Р. Сулейманова, И.Б. Муслимова, М.В. Здоровец**

*Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,  
Алматы, Казахстан*

### **Окисление полиэтилентерефталатных трековых мембран для применения в прямом осмосе**

**Аннотация.** В данном исследовании впервые осуществлен анализ окисления трековых мембран с уникальной геометрией пор "большой колодец – пористое донышко". Были изучены их физико-химические характеристики, включая прочность, производительность по воздуху и воде, а также гидрофобно-гидрофильные свойства. Исследование охватило анализ влияния формы и размера пор на производительность мембран в процессах прямого осмоса, включая изменение потока фильтрации в зависимости от концентрации раствора и геометрии пор. Выявлено, что мембраны с такой структурой пор демонстрируют высокую эффективность в прямом осмосе, благодаря своим механическим свойствам и проницаемости. Оптимальные условия окисления способствовали повышению производительности на 28% за счет улучшения гидрофильности мембран, что привело к увеличению их фильтрационной способности. Кроме того, было установлено, что уровень очистки воды, оцененный по электропроводности, достигает приблизительно 100%. Интересным является наблюдение, что производительность мембран увеличивается с ростом разности концентраций, что обусловлено увеличением парциального давления. Тем не менее, после прямого осмоса в мембранах обнаруживается загрязнение каналов соляными отложениями, что было подтверждено с помощью сканирующей электронной микроскопии. Эти выводы могут способствовать развитию новых подходов к проектированию мембран, специально адаптированных для различных применений в области очистки и фильтрации жидкостей, обеспечивая тем самым более эффективное и экономически выгодное использование мембранных технологий в промышленности и коммунальном хозяйстве.

**Ключевые слова:** трековые мембраны, окисление, прямой осмос, полиэтилентерефталат, гидрофильность.

**I.V. Korolkov\*, A.R. Suleimanova, I.B. Muslimova, M.V. Zdorovets**

*Institute of Nuclear Physics, Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan*

### **Oxidation of poly(ethylene terephthalate) track-etched membranes for using in direct osmosis**

**Abstract.** This study is the first to analyze the oxidation of track-etched membranes with a unique "large well – porous bottom" pore geometry. Their physical and chemical characteristics including strength, air, water performance, and hydrophobicity-hydrophilicity properties were studied. The study covered the analysis of the effect of pore shape and size on membrane performance in direct osmosis processes, encompassing the variation of filtration flux as a function of solution concentration and pore geometry. Membranes with this pore structure exhibit high performance in direct osmosis due to their mechanical properties and permeability. Optimal oxidation conditions contributed to a 28% increase in performance by improving the hydrophilicity of the membranes, leading to an increase in their filtration capacity. In addition, it was found that the level of water purification evaluated by electrical conductivity reached approximately 100%. The membrane performance increases with increasing concentration difference due to the rise in partial pressure. Nevertheless, after direct osmosis, the membranes show fouling of the channels with salt deposits, according to scanning electron microscopy data. These findings may contribute to the development of new approaches to the design of membranes specifically adapted to different applications in the field of liquid purification and filtration. This could result in more efficient and cost-effective use of membrane technologies in industry and utilities.

**Keywords:** track-etched membranes, oxidation, direct osmosis, poly(ethylene terephthalate), hydrophilicity

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

**Корольков И.В.** – корреспондент авторы, «Ядролық физика институт» ШЖҚ РМҚ-ның Астаналық филиалының технологиялық трек мембраналары зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, PhD, қауымдастырылған профессор, Абылай хан даңғылы, 2, 010009, Астана қ., Қазақстан Республикасы;

**Сулейманова А.Р.** – «Ядролық физика институт» ШЖҚ РМҚ-ның Астаналық филиалының технологиялық трек мембраналары зертханасының стажер-зерттеуші, Абылай хан даңғылы, 2, 010009, Астана қ., Қазақстан Республикасы;

**Муслимова И.Б.** – «Ядролық физика институт» ШЖҚ РМҚ-ның Астаналық филиалының технологиялық трек мембраналары зертханасының инженері Абылай хан даңғылы, 2, 010009, Астана қ., Қазақстан Республикасы;

**Здоровец М.В.** – «Ядролық физика институт» ШЖҚРМК-ның Астаналық филиалының технологиялық трек мембраналары зертханасының директоры, физика-математика ғылымдарының кандидаты, профессор, Абылай хан даңғылы, 2, 010009, Астана қ., Қазақстан Республикасы;

**Korolkov I.V.** – corresponding author, leading researcher of the Technological laboratory of track-etched membranes of the Astana branch of the RSE «Institute of nuclear physics» Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, PhD, Associate Professor, Abylay Khan Ave., 2/1, 010009, Astana, Republic of Kazakhstan;

**Suleimanova A.R.** – research assistant of the Technological laboratory of track-etched membranes of the Astana branch of the RSE «Institute of nuclear physics» Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Abylay Khan Ave., 2/1, 010009, Astana, Republic of Kazakhstan;

**Muslimova I.B.** – engineer of the Technological laboratory of track-etched membranes of the Astana branch of the RSE «Institute of nuclear physics» Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Abylay Khan Ave., 2/1, 010009, Astana, Republic of Kazakhstan;

**Zdorovets M.V.** – Director of the Astana branch of the RSE «Institute of nuclear physics» Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Professor, Abylay Khan Ave., 2/1, 010009, Astana, Republic of Kazakhstan;



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).