

**А.Р. Нармухамедова¹, И.В. Корольков^{1,2}, Ж.К. Жатқанбаева^{1*},
И.Б. Муслимова¹, Г.Б. Мельникова³, М.В. Здоровец^{1,2}**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

²Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

³А.В. Лыков атындағы Беларусь Ұлттық ғылым академиясының жылыу және массаалмасу институты, Минск, Беларусь

*Байланыс үшін автор: zhanpa01011973@mail.ru

Су-май қоспаларын бөлуге арналған ПЭТФ трек мембраналарды трихлороктилсиланмен гидрофобизациялау

Аңдатпа. Мақалада трихлороктилсиланмен полиэтилентерефталатты (ПЭТФ) трек мембраналарының модификациясының оңтайлы жағдайлары зерттелді. Трихлороктилсиланның концентрациясына және реакция уақытына байланысты тректі мембрананың кеуек диаметрі мен шеткі сулану бұрышының өзгеру нәтижелері келтірілген. Концентрациясы 15 ммоль/л трихлороктилсиланмен 24 сағат бойы тректі мембрананы өндегенде мембрананың шеткі сулану бұрышының ең жоғары көрсеткіші (1000) анықталды.

Алынған үлгілердің құрамындағы өзгерістер ИК-Фурье спектроскопиясымен сипатталды және газ өткізгіштікке сыналды. Май, су және органикалық еріткіштерді сүзуде сынақ хлороформ мен о-ксилол үшін жоғары өнімділік көрсетті (91,96мл/с*м² дейін), май үшін максималды өнімділік 5,81мл/с*м² құрады, ал су түрлендірілген мембранадан мүлдем өтпеді.

Түйін сөздер: трек мембраналары, полиэтилентерефталат, трихлороктилсилан, гидрофобизация, су-май қоспалары.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2021-136-3-27-34>

Кіріспе

Мұнай-газ, мұнай химиясы, фармацевтика, металлургия және тамақ өнеркәсіптерінің қарқынды өсуі көптеген минералды заттармен қатар мұнайлы және органикалық ағынды сулардың ауқымды өндірілуіне әкелді. «Қалыпты» апатсыз жағдайларда қолданылатын технологиялардың жетілмегендігінен мұнаймен ластанудың 75%-дан астамы гидросфераға түседі. Су қоймаларының мұнай өнімдерімен ластанудың көзі ретінде мұнай химиясының өнеркәсібі, металлургия, жолдар мен автокөлік кәсіпорындарының аумақтарынан, жанар-жағармай құю станцияларынан, автокөлік жуу орындарынан және басқа да коммуналдық шаруашылықтардан ағып шығатын ластанған ағынды сулар болып табылады. Құрамында мұнай және органикалық өнімдер бар ағынды суларды тазарту қажеттілігі [1], сонымен бірге тамақ өнеркәсібі пайдаланған майларды, әртүрлі мұнай өнімдерін қайта пайдалану үшін тазарту маңызды мәселелер қатарына жатады. Қазіргі уақытта осы екі мәселені шешуге арналған жұмыстар өзекті және өте қажетті болып келеді. Бір жағынан, қоршаған ортаны ластанудан қорғау және тазалаумен байланысты экологиялық мәселе, ал екіншісі экономикалық мәселе, себебі мұнай қалдықтарын судан тазартқаннан кейін оларды қайта пайдалану мүмкіндігі тұындайды.

Су-май эмульсияларын бөлуде қолданылатын мембраналық технологиялардың сөзсіз бір қатар артықшылықтары бар. Олар пермеаттың, яғни мембрана арқылы өтетін сұйықтықтың басқа технологиялармен салыстырғанда, жоғары сапасы, сұйылтылған тұрақты эмульсияларды бөлу мүмкіндігі, қондырғылардың аз ауданы, автоматтандырудың қарапайымдылығы, химиялық заттардың қажетсіздігі, сондықтан қалдықтардың азаюы және энергияны тұтынудың төмендеуі [2-4]. Мембраналардың барлық түрлерінің ішінде тректі мембраналар ерекше орын алады, өйткені олардың кеуектері өлшемі бойынша өте тар таралған, сонымен қатар олар өте жұқа бола тұра бөлудің және өнімділіктің жоғары көрсеткіштерін қамтамасыз ете алады.

Тәжірибе әдістемесі

Реагенттер мен еріткіштер. Трихлороктилсилан (ТХОС), о-ксилол және хлороформ Sigma Alldrich фирмасының (США) өнімдері қосымша тазартусіз қолданылды. Май ретінде күнбағыстан өндірілген өсімдік майы қолданылды.

Бастапқы материал. Тректі ойылған мембраналар қалыңдығы 12 мкм полиэтилентерефталатты үлдірлерді энергиясы 1,75 МэВ/нуклон Kr иондарымен DC-60 үдеткіште саулелендіру арқылы алынды. Содан кейін мембраналарды екі жағынан 30 мин УК-сәулесімен және 2,2 М NaOH ерітіндісімен 85°C температурада белгілі уақыт аралығында өңделді [5]. Химиялық өндеуден кейін гидрофобизациялау жүргізілді.

Ол үшін кеуек диаметрлері 240-250 нм болатын ПЭТФ негізіндегі трек мембраналары о-ксилолдағы трихлороктилсиланның әр түрлі концентрациядағы ерітінділеріне батырылып сол реагентпен сіндірілді. Тәжірибеге трихлороктилсиланның келесі концентрациялары алынды: 0,5 ммоль/л, 1 ммоль/л, 5 ммоль/л, 10 ммоль/л, 15 ммоль/л, 20 ммоль/л, 80 ммоль/л. Трихлороктилсилан 1-24 сағат аралығында мембранаға малынып сіндірілді, әрі қарай үлгілер ерітіндіден шығарылып тұрақты массаға дейін кептірілді.

Үлгілерді зерттеу әдістері. Мембрана мен трихлороктилсиланның әрекеттесу реакциясы үлгі бетіндегі су тамшысының шеткі жұғу бұрышы мен кеуек диаметрінің өзгеруі арқылы бақыланды. Кеуектің диаметрі газ өткізгіштік әдісімен есептелді. Газдың өткізгіштігі зертханалық қондырғыда 4903 кПа қысымда бағаланды, мембрананың кеуектерінің диаметрі келесі формуламен есептелді [6]:

$$r^3 = \frac{Q \cdot l}{\sqrt{\frac{2\pi}{R \cdot T \cdot M} \cdot \Delta p \cdot 4n}}$$

мұндағы r - кеуек радиусы (м), Q - ауа сыйымдылығы ($\text{м}^3/\text{сағ}$), l - мембрана қалыңдығы (м), Δp - қолданылатын қысым (Па), R - әмбебап газ тұрақтысы ($\text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$), M - ауаның молярлық массасы ($\text{кг}/\text{моль}$), n - беттік кеуектердің тығыздығы (сәулелену жылдамдығы ($1/\text{м}^2$) және T - температура (К).

Үлгілер ИҚ-спектроскопия әдісімен зерттелді. ИҚ-спектрлер бұзылған толық ішкі шағылысу (БТІШ) ATR-GladiATR (PIKE) тіркемесін қолдана отырып, "Инфралюм ФТ-08" спектрофотометрінде түсірілді.

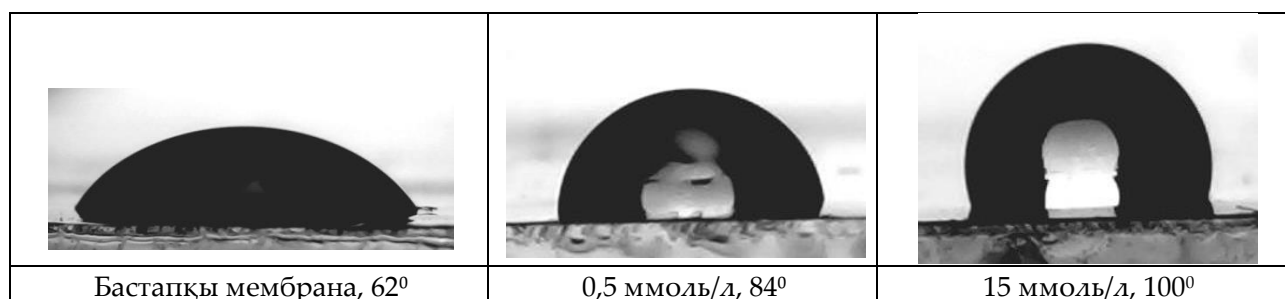
Нәтижелерді талқылау

Мақалада алғаш рет полиэтилентерефталат негізіндегі тректі мембраналар сулы-органикалық, сулы-майлы қоспаларды және мұнайды сүзуде пайдалану үшін гидрофобизацияланды. Осындай қоспалардың модельді ерітінділері ретінде о-ксилол, хлороформ және мұнай сүзілді. Мембрананы гидрофобизациялау үшін диаметрі 240 нм болатын ПЭТФ негізіндегі тректі мембраналар трихлороктилсиланның әр түрлі концентрациясымен 1-24 сағат аралығында өңделді. Мембрананы өндеу барысында мембрананың беттік құрылымы, яғни кеуектердің диаметрі өзгереді. Кеуектердің диаметрінің өзгеруін қадағалайтын сүзі сынағы көптеген жұмыстарда мембраналардың газ өткізгіштігін анықтайтын әдіспен анықталған [7]. Кеуектердің диаметрінің өзгеруімен гидрофобизацияланудың байланысы үлгі бетіндегі су тамшысының шеткі жұғу бұрышын өлшеу арқылы анықталды. Бастапқы және трихлороктилсиланның әр түрлі концентрациясымен өңделген мембраналардың кеуек диаметрінің өзгеруі 1-кестеде берілген және шеткі жұғу бұрышының өзгеруі үлгілердегі су тамшыларының фотосуреттерінде (1-сурет) келтірілген.

1 кесте

Трихлороктилсилан концентрациясына байланысты кеуектер диаметрінің және мембрананың шеткі жұғу бұрышының өзгеруі

Трихлороктилсилан концентрациясы, ммоль/л	Кеуек диаметрі, нм	Шеткі жұғу бұрышы, °
0	240 ± 3	62 ± 4
0,5	259 ± 4	84 ± 5
1	240 ± 5	57 ± 6
5	234 ± 4	87 ± 7
10	243 ± 3	91 ± 3
15	243 ± 3	100 ± 3
20	215 ± 4	94 ± 5
80	211 ± 8	86 ± 6



1 сурет. Бастапқы және өңделген мембраналардың бетіндегі су тамшыларының фотосуреттері

Нәтижелер бойынша, трихлороктилсиланның 15 ммоль/л концентрациясында шеткі жұғу бұрышы ең жоғары мәні және кеуек құрылымын сақтай отырып, мембрананың максималды гидрофобизациялануын көрсетті. Сондықтан трихлороктилсиланның осы концентрациясы онтайлы деп анықталды және әрі қарай реакция уақыты да оңтайландырылды. Мембрана үлгілері концентрациясы 15 ммоль/л трихлороктилсиланмен 1 және 24 сағат аралығында өңделді. Нәтижелер 2-кестеде көрсетілген.

2 кесте

Мембрананың шеткі жұғу бұрышының және кеуек диаметрлерінің трихлороктилсиланмен өңдеу уақытына тәуелді өзгеруі (C=15 ммоль/л)

Реакция уақыты, сағ	Кеуек диаметрі, нм	Шеткі жұғу бұрышы, °
0	240 ± 3	62 ± 4
1	254 ± 2	85 ± 7
2	252 ± 3	96 ± 6
4	248 ± 5	97 ± 7
8	238 ± 4	95 ± 4
24	243 ± 3	100 ± 3

2-кестеден көрініп тұрғандай, мембрананың максималды гидрофобизациясы үшін трихлороктилсиланның концентрациясы 15 ммоль/л және өңдеу уақыты 24 сағат болуы керек. Сонымен қатар, мембрананы түрлендірудің анықталған осы онтайлы жағдайларын

пайдалана отырып, кеуек диаметрлері әртүрлі болатын ПЭТФ трек мембраналарының модификациясы жүргізілді және шеткі жүзу бұрышы өлшенді. Мәліметтер 3-кестеде көрсетілген.

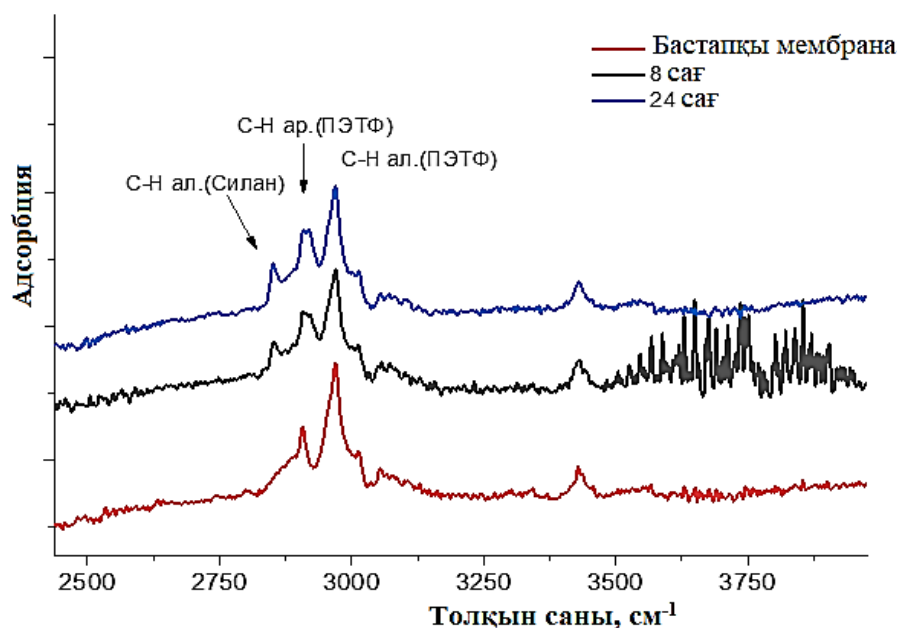
3 кесте

Шеткі жүзу бұрышының ПЭТФ трек мембраналарының кеуек диаметрлеріне тәуелді өзгеруі

Кеуек диаметр, нм	Бастапқы мембрананың шеткі жүзу бұрышы, °	Өңделген мембрананың шеткі жүзу бұрышы, °
200	48 ± 7	101 ± 5
250	57 ± 2	97 ± 7
300	46 ± 4	91 ± 4
350	48 ± 4	94 ± 4

Зерттелетін үлгілердің ИҚ-спектрлері 400-4000 см⁻¹ диапазонында, 2 см⁻¹ ажыратымдылықта түсірілді, сканерлеу саны 25. Бастапқы ПЭТФ тректі мембранаға жататын жолақтар 2970 см⁻¹ (бензол сақинасы С-Н), 2912 см⁻¹ (алифаттық С-Н), 1713 см⁻¹ (С=О тобы), 1615, 1470, 1430, 1409 см⁻¹ (көміртегі қаңқасының ароматты тербелістері), 1340 см⁻¹ (О-СН), 1238 см⁻¹ (С(О)-О эфирлік топтарының байланыстарының тербелісі), 970 см⁻¹ (О-СН₂) жатады.

Трихлороктилсиланмен өңдеуі ПЭТФ тректі мембраналар үлгісінің спектрінде бастапқы спектрдегі жолақтардан басқа 2850 см⁻¹ толқын жиілігінде шыңның пайда болуына алып келді. 2400 - 4000 см⁻¹ диапазонында түсірілген ИҚ спектрлер 2-суретте көрсетілген.



2 сурет. 2400 - 4000 см⁻¹ аралығындағы бастапқы және модификацияланған мембраналардың ИҚ-спектрлері

Су-май қоспаларын бөлудегі мембраналардың тиімділігін бағалау үшін бұл жұмыста су-май эмульсиялық жүйенің моделі ретінде жеке органикалық еріткіштер адын ала зерттеулерден өткізілді. Ол үшін су, хлороформ, о-ксилол және өсімдік май ерітінділері кеуек диаметрлері әртүрлі болатын мембраналарда өткізіліп олардың өнімділігі анықталды. Өнімділік нәтижелері 4-кестеде келтірілген.

Трихлороктилсиланмен модификацияланған ПЭТФ трек мембраналарының өнімділігі

Кеуек диаметр, нм	Өнімділік, мл/с*м ²			
	Су	Хлороформ	о-ксилол	Май
200	-	8,13 ± 0,14	13,15 ± 0,29	2,46 ± 0,07*
250	-	14,02 ± 0,39	26,37 ± 0,34	5,17 ± 0,17*
300	-	23,80 ± 0,85	55,43 ± 1,51	3,25 ± 0,20
350	-	25,31 ± 0,47	91,93 ± 4,27	5,80 ± 0,17
*қысым 700 мбар				

Бұл үшін вакуумды сүзуге арналған қондырғы мен вакуумдық сорғы қолданылды. Сүзу 900 мбар қысымда жүргізілді, бірақ диаметрі 200 нм және 250 нм болатын үлгі мұндай қысым кезінде май өткізбеді, сондықтан май үшін қысым 700 мбар дейін азайтылды. Сонымен қатар, су қысым кезінде өтпеді, осылайша судан майдың бөлінуіне қол жеткізіледі.

Қорытынды

Зерттеу нәтижелері бойынша трихлороктилсиланмен ПЭТФ трек мембраналарының модификациясының оңтайлы шарттары анықталды, бұл мембрананың максималды гидрофобизациясына алып келді. Нәтижесінде алынған үлгілер 900 мбар қысымда хлороформ мен о-ксилол, ал 700 мбар қысымда май үшін жоғары өнімділікті көрсетті және суды өткізбеді. Трихлороктилсиланмен модификацияланған мембраналар кейіннен су-май қоспаларын бөлу үшін пайдаланылуы мүмкін, сондықтан су-май эмульсиялары мен мұнайды гидрофобизацияланған мембраналардың өнімдігін анықтау жұмыстары алдағы зерттеулерде жоспарлануда.

Зерттеуді ҚР БҒМ қаржыландырды (грант нөмірі AP09057934).

Әдебиеттер тізімі

1. Lioubimtseva E., Henebry G.M., Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations // J. Arid Environ. -2009. -vol. 73. -P.963-977. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2009.04.022.
2. Tanudjaja H.J., Hejase C.A., Tarabara V.V., Fane A.G., Chew J.W., Membrane-based separation for oily wastewater: A practical perspective // Water Res. -2019. -vol. 156. -P.347-365. DOI: 10.1016/j.watres.2019.03.021.
3. Li J.J., Zhou Y.N., Luo Z.H. Polymeric Materials with Switchable Superwettability for Controllable Oil/Water Separation: A Comprehensive Review. // Progress in Polymer Science. -2018. -vol. 87. - P.1–33. DOI: doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.06.009.
4. M. Padaki, R. Surya Murali, M.S. Abdullah, N. Misdan, A. Moslehyani, M.A. Kassim, N. Hilal, A.F. Ismail Membrane technology enhancement in oil-water separation. A review. // Desalination. – 2015. -vol. 357. -P. 197-207. DOI: 10.1016/j.desal.2014.11.023.
5. Korolkov, I.V.; Mashentseva, A.A.; Gueven, O.; Niyazova, D.T.; Barsbay, M.; Zdorovets, M. V The Effect of Oxidizing Agents/Systems on the Properties of Track-Etched PET Membranes. // Polym. Degrad. Stab. -2014. -Vol. 107. -P. 150–157.
6. Mulder, M. Transport in Membranes. In Basic Principles of Membrane Technology. -Springer: Dordrecht, The Netherlands, 1996. -P. 210-279.
7. Korolkov I.V., Narmukhamedova A.R., Melnikova G.B., Muslimova I.B., Yeszhanov A.B.,

Zhatkanbayeva Zh. K., Chizhik S.A., Zdorovets M.V. Preparation of Hydrophobic PET Track-Etched Membranes for Separation of Oil–Water Emulsion// Membranes. -2021. -Vol. 11(8). -p. 637. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes11080637>.

**А.Р. Нармухамедова¹, И.В. Корольков^{1,2}, Ж.К. Жатқанбаева¹,
И.Б. Муслимова¹, Г.Б. Мельникова³, М.В. Здоровец^{1,2}**

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

³Институт тепла и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

Гидрофобизация ПЭТФ трекových мембран трихлороктилсиланом для применения в разделении водо-масляных смесей

Аннотация. В данной статье были исследованы оптимальные условия модификации полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) трекových мембран обработкой трихлороктилсиланом. Приведены результаты изменения диаметров пор мембран и краевого угла смачивания в зависимости от концентрации трихлороктилсилана и времени вымачивания образцов. Определено, что при обработке мембраны трихлороктилсиланом с концентрацией 15 ммоль/л в течение 24 часов угол смачивания достигает наибольшего значения (100°).

Изменения в структуре полученных образцов также были охарактеризованы с помощью ИК-Фурье-спектроскопии и испытаны на газопроницаемость. Тест фильтрации водно-органических и водо-масляных смесей показал высокую производительность для хлороформа и о-ксилола (до 91,96 мл / c*m²), для масла максимальная производительность составляет 5,81 мл / c*m², при этом вода не проникала через модифицированную мембрану.

Ключевые слова: трекových мембраны, полиэтилентерефталат, трихлороктилсилан, гидрофобизация, водо-масляные смеси.

**A.R. Narmukhamedova¹, I.V. Korolkov^{1,2}, Zh.K. Zhatkanbaeva¹,
I.B. Muslimova¹, G.B. Melnikova³, M.V. Zdorovets^{1,2}**

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

² Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

³ Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykova National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus

Hydrophobization of PET track membranes with trichlorooctylsilane for use in the separation of water-oil mixtures

Abstract. The article investigates the optimal conditions for the modification of polyethylene terephthalate (PET) track-etched membranes with trichlorooctylsilane. The article presents results of changes in the pore diameters and the contact angle depending on the concentration of trichlorooctylsilane and the soaking time. It has been determined that when the membrane is treated with trichlorooctylsilane with a concentration of 15 mmol / L for 24 hours, the contact angle reaches the highest value (100°).

Changes in the structure of the obtained samples were also characterized by FTIR spectroscopy and gas-permeability test. Filtration test of water-organic and water-oil mixtures showed high fluxes for chloroform and o-xylene (up to 91,96 ml/c*m²), for oil maximum flux is 5,81ml/c*m², while water did not penetrate through the modified membrane.

Keywords: track membranes, polyethylene terephthalate, trichlorooctylsilane, hydrophobization, water-oil mixtures.

References

1. Lioubimtseva E., Henebry G.M., Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations. *J. Arid Environ.* 73, 963-977 (2009). DOI: 10.1016/j.jaridenv.2009.04.022.
2. Tanudjaja H.J., Hejase C.A., Tarabara V.V., Fane A.G., Chew J.W., Membrane-based separation for oily wastewater: A practical perspective. *Water Res.* 156, 347-365 (2019). DOI: 10.1016/j.watres.2019.03.021.
3. Li J.J., Zhou Y.N., Luo Z.H. Polymeric Materials with Switchable Superwettability for Controllable Oil/Water Separation: A Comprehensive Review. *Progress in Polymer Science.* 87, 1–33(2018). DOI: doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.06.009.
4. Padaki M., Surya Murali R., Abdullah M.S., Misdan N., Moslehyani A., Kassim M.A., Hilal N., Ismail A.F. Membrane technology enhancement in oil-water separation. A review. *Desalination.* 357, 197-207(2015). DOI: 10.1016/j.desal.2014.11.023.
5. Korolkov, I.V., Mashentseva, A.A., Gueven, O., Niyazova, D.T., Barsbay, M., Zdorovets, M.V. The Effect of Oxidizing Agents/Systems on the Properties of Track-Etched PET Membranes. *Polym. Degrad. Stab.* 107, 150–157(2014).
6. Mulder M. Transport in Membranes. In *Basic Principles of Membrane Technology*. Dordrecht, Springer, The Netherlands, 1996, 210-279).
7. Korolkov I.V., Narmukhamedova A.R., Melnikova G.B., Muslimova I.B., Yeszhanov A.B., Zhatkanbayeva Zh. K., Chizhik S.A., Zdorovets M.V. Preparation of Hydrophobic PET Track-Etched Membranes for Separation of Oil–Water Emulsion, *Membranes.* 11(8), 637(2021). DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes11080637>.

Авторлар туралы мәлімет:

Нармухамедова А.Р. – химия кафедрасының магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Қажымұқан көшесі, 13, Нұр-Сұлтан, Қазақстан.

Корольков И.В. – ядролық физика институтының аға ғылыми қызметкері, Ph.D., қауымдастырылған профессор, Ядролық физика институты, Ибрагимов к-сі, 1, Алматы, Қазақстан.

Жатқанбаева Ж.К. – химия кафедрасының доценті, химия ғылымдары кандидаты, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Қажымұқан көшесі, 13, Нұр-Сұлтан, Қазақстан.

Муслимова И.Б. – химия кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Қажымұқан көшесі, 13, Нұр-Сұлтан, Қазақстан.

Мельникова Г.Б. – техника ғылымдарының кандидаты, мемлекеттік ғылыми мекемесінің нанопроцестер және технологиялар зертханасының аға ғылыми қызметкері, А. В. Лыков атындағы Беларусь Ұлттық Ғылым академиясының жылу және масса алмасу институты, Минск, Беларусь.

Здоровец М.В. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, инженерлік бейіндегі зертхананың жетекшісі, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Абылайхан даңғылы, 2/1, Нұр-сұлтан, Қазақстан.

Narmukhamedova A.R. – Master's student of the Department of Chemistry, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukana str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Korolkov I.V. - Ph.D., Senior Researcher at the Institute of Nuclear Physics, Associate Professor, Institute of Nuclear Physics, Almaty, 1 Ibragimova str., Kazakhstan.

Zhatkanbayeva Zh.K – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukana str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Muslimova I.B. – doctoral student of the Department of Chemistry, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Nur-Sultan, Kazakhstan.

Melnikova G.B. – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Nano processes and Technologies of the State Scientific Institution “Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Belarus.

Zdorovets M.V. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, Head of the Engineering Laboratory, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2/1 Ablaihan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.