

*Дейниченко Г. В., д-р техн. наук, професор¹**Гузенко В. В., канд. техн. наук, доцент¹**Дмитревський Д. В., канд. техн. наук, доцент¹**Золотухіна І. В., д-р техн. наук, доцент¹*

¹ Державний біотехнологічний університет (м. Харків, Україна), e-mail: oborud.hduht@gmail.com.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ МЕМБРАННОГО РОЗДІЛЕННЯ ХАРЧОВИХ РІДИН

UDC 628.161

*Deynichenko G. V., Grand PhD of Engineering
Science, Professor¹**Guzenko V. V., PhD in Engineering sciences,
Associate Professor¹**Dmytrevsky D. V., PhD in Engineering sciences,
Associate Professor¹**Zolotukhina I. V., Grand PhD of Engineering Science,
Associate Professor¹*

¹ State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: oborud.hduht@gmail.com.

ANALYTICAL REVIEW OF MODERN METHODS OF INTENSIFICATION OF MEMBRANE SEPARATION OF FOOD LIQUIDS

Мета. Мета статті полягає у аналітичному дослідженні основних напрямків удосконалення процесових аспектів мембранного розділення харчових рідин з метою подальшого створення удосконаленого обладнання для концентрування молочної сировини.

Методи. В статті застосовані загальноприйняті теоретичного та комбіновані методи аналітичного дослідження із використанням сучасних комп'ютерних програм. На базі експериментальних досліджень та власних розробок методами порівняльного та системного аналізу а також класифікації авторським колективом створені класифікації технічного оснащення мембранних процесів. Для дослідження проаналізовано інформаційні джерела за обраною тематикою: монографії, статті, енциклопедії, дисертації.

Результати. Представлені результати аналітичних досліджень вирішення проблеми забруднення напівпроникних мембран в процесі мембранного розділення харчових рідин. Представлено класифікацію сучасних типів мембранного обладнання в залежності від характеру протікання процесу розділення. Представлено принципову схему традиційних методів зниження концентраційної поляризації на поверхні напівпроникних мембран та надано порівняльний аналіз найбільш ефективних з них. Наведено приклади інноваційних розробок зі зменшення та видалення поляризаційного шару з поверхні напівпроникної мембрани. Розроблено класифікацію методів боротьби з концентраційною поляризацією в процесі мембранного розділення з метою розробки мембранного обладнання з використанням комбінованих методів видалення забруднень на поверхні напівпроникних мембран. Запропоновано принципово нові методи класифікації мембранного обладнання та методів боротьби з забрудненнями на мембранах згідно вимог харчової промисловості. Отримані результати можуть бути використані в подальшому формуванні теоретичних та експериментальних досліджень під час розробки нових методів інтенсифікації мембранних процесів розділення харчових рідин.

Ключові слова: мембрана, процес, інтенсифікація, забруднення, поляризація, харчові рідини.

Надійшла до редакції 17.03.2022 р. © Г. В. Дейниченко, В. В. Гузенко, Д. В. Дмитревський, І. В. Золотухіна, 2022

Постановка проблеми. На сучасному етапі мембранні методи розділення харчових рідинних сумішей знаходять широке застосування. Використання напівпроникних мембран відкриває великі можливості у харчовій промисловості багатьох країн світу. Обробка молочної сировини, фруктових та овочевих соків, сиропів екстрактів, білків, різноманітних есенцій, пива та інших харчових продуктів може здійснюватися мембранними методами набагато дешевше, ніж наприклад випарюванням, або виморожуванням і без втрати летучих компонентів чи погіршення смаку, що часто супроводжує концентрування випарюванням. Також використання процесів мембранного розділення харчових рідин дозволяє збільшити вихід готового продукту до 25 % [1–4].

Поряд з цим неминучим явищем і проблемою є забруднення мембран в процесі розділення харчових рідин, що призводить до зростання опору масопереносу мембрани і, як наслідок, до зниження її питомої продуктивності. Причинами цього, в більшості випадків є концентраційна поляризація, адсорбція, гелеутворення, закупорювання або перекривання пор. У зв'язку з цим, актуальним є дослідження та створення нових методів запобігання забрудненню напівпроникних мембран та створення нових видів мембранного обладнання [5, 6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Раніше для мембранної обробки біологічних рідин в нашій країні використовувалися такі установки, як А1-ОУП, А1-ОУС, А1-ОУВ. Але вони мають велику потужність. Потенційне значення має також ультрафільтраційна установка А1-ЭУФ, яка використовується для ультрафільтрації в'язких рідин [7, 8].

Методом зниження концентраційної поляризації таких установок є турбулізація розподільного розчину за допомогою підвищення швидкості у над мембранному просторі до 3–5 м/с та застосування турбулізуючої вставки, що призводить до різкого підвищення втрат енергії [7]. Також для зниження концентраційної поляризації в потік вводять частки із густиною матеріалу (наприклад, полімери, скло), з якою вони виготовлені, близькою до густини розчину [8]. Але й цей спосіб не є ефективним. Недоліком всіх установок є зменшення швидкості процесу з часом внаслідок утворення поляризаційного шару на поверхні матеріалу [9].

Сьогодні зарубіжні компанії виробляють різний асортимент мембранного обладнання, що використовується в різних галузях народного господарства, а також для цільового використання зі специфічними властивостями. Основними виробниками різних видів обладнання є США, Японія, Китай, Данія [10–12].

Основними властивостями мембранного обладнання є відмінна стійкість до кислот, лугів та окислювачів; стійкість до розчинення; висока температурна стійкість; чудова здатність до поділу та дуже маленька відстань між порами; відмінна стійкість до механічних пошкоджень та абразивного зношування; дуже тривалий термін служби у порівнянні із полімерними мембранами; легкість у чищенні та санітарній обробці шляхом промивання зворотним потоком [13–16]. При цьому питання боротьби з забрудненням напівпроникних мембран не вирішено до сьогодні, і являє собою актуальне завдання, що стоїть перед вченими всього світу.

Мета статті. Мета статті полягає у аналітичному дослідженні основних напрямків удосконалення процесових аспектів мембранного розділення харчових рідин з метою подальшого створення удосконаленого обладнання для концентрування молочної сировини.

Щоб досягти зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

- дати удосконалену класифікацію існуючого мембранного обладнання з використанням методів інтенсифікації в процесі розділення харчових рідин;
- надати характеристику та класифікації найбільш прогресивних методів інтенсифікації мембранного розділення харчових рідин;
- на підставі результатів дослідження визначити напрямки подальших досліджень з удосконалення технологічного обладнання.

Виклад основного матеріалу дослідження. До всіх мембранних апаратів, незалежно від їх типу, пред'являються загальні вимоги, а саме: вони повинні мати велику робочу поверх-

ню в одиниці об'єму апарату, відрізнятися високими експлуатаційними характеристиками, забезпечувати високу швидкість руху рідини, що розділяється, з метою запобігання на поверхні напівпроникної мембрани концентраційної поляризації, працювати при невеликому перепаді тиску. В даний час всі мембранні апарати прийнято ділити на чотири основні типи: з плоскими, трубчастими, з рулонними мембранними елементами і з мембранами у вигляді порожнистих волокон (капілярними мембранами) [17].

Класифікувати сучасні мембранні установки можна з урахуванням технологічних характеристик обладнання в процесах розділення та очищення біологічних рідин [18–20]. Результати досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1 — Класифікація сучасних типів мембранного обладнання
(складено автором на основі [7, 18])

№, з/п	Показник	Вид
1	За організацією процесу	періодичної дії
		безперервної дії
2	За видом баромембранного процесу	мікрофільтраційні
		ультрафільтраційні
		зворотноосмотичні
3	За формою та типом укладання мембранного елемента	пластинчасті
		трубчасті
		капілярні
		рулонні
4	За способом розташування мембранного елемента	горизонтальні
		вертикальні
		похилі
5	За напрямком руху рідини, що розділяється	протитечієві
		циркуляційні
		тангенціальні
		радіальні
6	За наявністю додаткових процесів та пристроїв інтенсифікації	механічні (втулки та вставки довільної форми, сітка)
		фізичні (нагрівання; вібрація; магнітні, електричні та ультразвукові поля)
		гідродинамічні (перемішування, пульсуюча подача)
		хімічні (луки, кислоти)
7	За методом розташування модулів	паралельне розташування
		перехресне розташування
		непорядковане розташування
8	За формою та розташуванням модулів	циліндричні
		кубічні, прямокутні
		комбіновані
9	За конструктивним виконанням	одно- та двокорпусні
		безкорпусні
10	За кількістю апаратів розміщених в установці	одноступінчасті
		багаступінчасті

Як зазначалося раніше, широкому впровадженню баромембранних процесів перешкоджає зниження проникності мембран в процесі розділення, що полягає у виникненні шару осаду на поверхні мембрани — тобто концентраційну поляризацію.

В даний час єдиної думки щодо способів ефективного впливу на інтенсивність прояву забрудненості мембранної поверхні частинками дисперсної фази продукту концентраційної поляризації не вироблено. Багато авторів схильні в думці, що найбільш перспективним напрямком її усунення є визначення гідродинамічних умов проведення баромембранного процесу, сприяють зниженню інтенсивності формування шару концентраційної поляризації і як наслідок — зменшення, що розділяється.

Ю. С. Поляковим запропоновано класифікацію способів зниження концентраційної поляризації на поверхні напівпроникних мембран (рис. 1) при розділенні рідких високомолекулярних полідисперсних систем РВПС [21].



Рисунок 1 — Схема класифікації способів зниження концентраційної поляризації за баромембранного розділення РВПС (складено на основі [21])

Відповідно до класифікаційної схеми автор виділяє два основні напрями вирішення проблеми. Перше пов'язано з інтенсифікацією процесу перерозподілу частинок дисперсної фази від поверхні мембран до центральної осі потоку РВПС, що розділяється, що дозволяє вирівнювати рівні їх концентрації у поверхні мембрани і в об'ємі розчину. Другий напрямок заснований на встановленні низької швидкості процесу баромембранного поділу, при якій концентраційна поляризація не досягає значних величин.

Серед способів активного на процес формування шару концентраційної поляризації можна виділити механічні, фізичні та хімічні [22].

Механічні способи запобігання чи зниження інтенсивності утворення поляризаційного шару найбільш поширені. До них відносяться створення інтенсивної турбулізації потоку рідини, що розділяється над поверхнею мембрани [23], зміна конфігурації каналу баромембранного апарату і подача розділеної РВПС тангенціально до поверхні мембрани [24], зміна режимів потоку розділяється системи в каналі апарату, підвищення швидкості потоку системи до 4...5 м/с [25], використання у складі розділеної РВПС твердих частинок дисперсної фази як турбулізатори потоку [26].

До фізичних методів зниження рівня концентраційної поляризації відносять підвищення температури мембрани чи рідини, що розділяється, до 60...70 °C [22]. Однак багато біологічних рідин, що піддаються мембранному поділу, зокрема, білково-вуглеводна молочна сировина, містять ряд термолабільних компонентів, в яких при дії високої температури відбуваються незворотні зміни високомолекулярних речовин. З погляду збереження нативних властивостей систем, що розділяються, термічний спосіб зниження рівня концентраційної поляризації не завжди виправданий.

Відомий спосіб зниження рівня концентраційної поляризації та апарат для його здійснення за допомогою ультразвуку [26]. Ультразвук від генератора надходить хвилеводом на відбивач і збуджує в розчині, що розділяється, кавітацію, в результаті якої в потоці виникають пульсуючі бульбашки. Пухирці, надаючи силовий вплив на осілі частинки поляризаційного шару, відривають їх від поверхні мембрани, після чого ці частинки відносяться з рідиною, що розділяється. Таким чином, вся поверхня мембрани очищається від частинок поляризаційного шару, що призводить до відновлення початкового гідравлічного опору в апараті та заданої продуктивності мембрани.

Слід зазначити, що використання ультразвуку є технічно складним способом, який потребує додаткового апаратного забезпечення, що далеко не завжди є виправданим. До того ж, ультразвукові хвилі можуть негативно впливати на складові компоненти ЖВПС, що потребує проведення додаткових досліджень такого впливу в кожному конкретному випадку [18].

Ще одним фізичним способом усунення поляризаційного шару на поверхні напівпроникної мембрани є розглянутий у роботі [20] метод імпульсного переполюсування. Автори стверджують, що цей метод у процесі електродіалізу є ефективним безреагентним способом вирішення проблеми утворення поляризаційного шару. Встановлено струмові режими проведення процесу, при яких застосування реверсного електродіалізу є технологічно вигідним, розроблено математичну модель процесу, справедливу в довільній багатоіонній мембранній системі. Даний спосіб є новим, вимагає подальших наукових досліджень, тому поки що не може бути рекомендований для практичного застосування.

Хімічні способи на процес формування шару концентраційної поляризації полягають у додаванні в розділяється систему інгібуючих речовин, що запобігають утворенню осаду, або у використанні хімічних реагентів для регенерації мембран після їх забруднення, тобто. закупорювання пір [6, 12]. Однак, ці способи неприйнятні при баромембранному розділенні харчових рідких систем, тому вони не можуть розглядатися як предмет досліджень у цій дисертації.

Нами розроблена класифікація способів зниження концентраційної поляризації на поверхні напівпроникних мембран за розділення рідких високомолекулярних полідисперсних систем, яка може бути представлена як інтенсифікація процесу в залежності від технологічних особливостей робочого середовища та технічного оснащення мембранних модулів в харчових виробництвах (табл. 2).

Незважаючи на різноманіття методів боротьби з концентраційною поляризацією, ні один з них не призводить до повної нейтралізації її впливу. Тому виправданий пошук таких умов роботи мембранних апаратів, які забезпечували б максимальний ефект при мінімальних витратах.

З усіх розглянутих у таблиці способів активного впливу на процес формування шару концентраційної поляризації найбільш прийнятним з точки зору збереження нативних

Таблиця 2 — Способи зменшення забруднення напівпроникних мембран
(складено автором на основі [6, 7])

№, з/п	Характеристика способу	Вид способу	Реалізація (вимоги)
1	Інтенсифікація процесу переміщення розчину, що розділяється шляхом зміни технологічних умов	Підвищення температури системи, що розділяється	Не вище 60 °С
		Підвищення температури мембранного елементу	Термостійкість мембрани до 50 °С
		Зміна робочого тиску в каналі баромембранного апарату	Стійкість мембрани (0,1...1,0 МПа)
		Використання мембран з підвищеним гідравлічним опором	Багатошаровий матеріал
2	Механічні та конструкційні методи інтенсифікації	Механічні пристрої та механізми для турбулізації потоку системи	Мішалки та вставки довільної форми, барбатуєчі пристрої
		Зміна конфігурації каналу баромембранного апарату	Втулки, сітки, патрубки
		Зміна положення мембранного елементу або його рух навколо осі	Вертикальні, горизонтальні, похилі елементи
		Використання частинок дисперсної фази для механічного впливу на примембранний шар	Кульки, стружка довільної форми, стиснене повітря тощо
3	Фізичні та гідродинамічні методи інтенсифікації	Зміна режимів потоку системи, що розділяється в каналі апарату	Протичійна, радіальна, тангенціальна, пульсуюча подача
		Використання впливу фізичних явищ на поверхню мембрани	Ультразвук, вібрація, електричні та магнітні поля
4	Хімічні методи інтенсифікації	Для харчової промисловості не допустимі	Луги, кислоти

властивостей компонентів рідких високомолекулярних полідисперсних систем, що розділяються є механічні способи. Незважаючи на наявну в літературі значну кількість способів і пристроїв механічного запобігання утворення поляризаційного шару на поверхні мембран, їх потенційні можливості далеко не вичерпані. Тому виникає задача розробки принципово нових мембранних установок з використанням засобів повного або часткового усунення концентраційної поляризації з поверхні мембрани, що буде сприяти підвищенню ефективності процесу мембранної обробки харчових рідин.

Висновки. Таким чином, забруднення напівпроникних мембран в процесі обробки харчових рідин становить проблему, що може бути вирішено шляхом теоретичних та експериментальних досліджень у напрямку удосконалення мембранного обладнання. Тому на початку представлено загальну класифікацію існуючого мембранного обладнання в залежності від чинників, що можуть впливати на процес забруднення мембран. Представлено класифікації методів зниження поляризаційного шару на поверхні мембранних елементів та обґрунтовано вибір напрямку подальших технічних розробок з метою зменшення або видалення забруднень в процесі мембранного розділення молочної сировини.

Список літератури

1. Дейниченко Г. В., Гузенко В. В., Гафуров, О. В. Якість харчових рідин ультрафільтраційно-го концентрування. *Товари і ринки*. 2015. № 2 (20). С. 140–149.
2. Milić J. K., Petrinić I., Goršek A., Simonič M. Ultrafiltration of oilin-water emulsion by using ceramic membrane: Taguchi experimental design approach. *Central European Journal of Chemistry*, 2014. № 12(2). Pp. 242–249.
3. Bhattacharjee C., Saxena V., Dutta S. Fruit juice processing using membrane technology: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2017. № 43. Pp. 136–153.

4. Berk Z. Food process Engineering and Technology. USA : Elsevier, 2009. 605 p.
5. Beicha A., Zaamouche R., Sulaiman N. M. Dynamic ultrafiltration odel based on concentration polarisation — cake layer interplay. *Desalination*, 2009. Vol. 242. Pp. 138–148.
6. Семенов А. Г. Развитие гелевого загрязнения мембраны при тангенциальной ультрафильтрации раствора высокомолекулярного соединения. *Технология и техника пищевых производств*. 2011. № 1. С. 79–83.
7. Гафуров О. В. Усовершенствование процесса ультрафильтрации белково-углеводного молочного сырья и его аппаратурное оформление: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Х. 2016. 226 с.
8. Мирончук В. Г., Змієвський Ю. Г. Мембрані процеси в технології комплексної переробки сироватки : монографія. Київ : НУХТ, 2013. 153 с.
9. Некоз О. І., Литвиненко О. А., Пашенко Б. С. Інтенсифікація технології водоочищення для харчових підприємств. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2016. № 179. С. 139–145.
10. Золотухіна І. В. Наукове обґрунтування технологій напівфабрикатів на основі цільового використання нутрієнтів білково-вуглеводної молочної сировини: дис... д-ра техн. наук: 05.18.16. Харків: ХДУХТ. 2021. 303 с.
11. Дейниченко Г. В., Мазняк З. О., Гузенко В. В. Разработка оборудования для мембранного концентрирования жидких высокомолекулярных полидисперсных систем. *Первый независимый сборник*. 2015. № 1. Ч. 1. С. 32–36.
12. Kumar P., Sharma N., Ranjan R., Kumar S. Perspective of Membrane Technology in Dairy Industry. A Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2013. 9 (26). P. 1347–1358. doi: 10.5713/ajas.2013.13082.7.
13. Hu K., Dickson J. M. Membrane Processing for Dairy Ingredient Separation. Oxford : Wiley Blackwell, 2015. 269 p. doi: 10.1002/9781118590331.
14. Deynichenko G., Guzenko V., Dmytrevskiy D., Chervonyi V., ... Korolenko O. Research method of reducing polarization layer at ultrafiltration of cottage cheese whey. *EUREKA: Life Sciencess*, 2020. no. 4. pp. 8–14.
15. Lobasenko B., Semenov A. Intensification of ultrafiltration concentrating by the separation of the concentration boundary layer. *Foods and Raw Materials*. 2013. Vol. 1. No. 1. Pp. 74–81. <https://doi.org/10.12737/1560>.
16. Peinemann V., Pereira Nunes S., Giorno L. Membranes for food applications. Borchester, UK: Wiley-VCH, 2011. 264 p.
17. Ярославцев А. Б. Мембраны и мембранные технологии. М.: Научный мир, 2013. 612 с.
18. Ribeiro A., Ning B., Goncalves G. The optimisatiol of soybean oil degumming on a pilot plan scale using a caramic membrane. *Journ. Food Eng.* 2008. Vol. 87. № 4. Pp. 514–521.
19. Дейниченко Г. В., Мазняк З. О., Золотухіна І. В. Ультрафільтраційні процеси та технології раціональної переробки білково-вуглеводної молочної сировини: монографія. Харків : Факт, 2008. 208 с.
20. Первов А. Г. Современные методы подготовки очистки питьевой и технической воды с применением мембран: обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация : монография. М. : Издательство асоциации строительных вузов, 2009. 232 с.
21. Drioli E., Giorno L. Membrane operations: innovative separations and transformations . Weinheim, UK: Wiley-VCH, 2009. 578 p.
22. Drioli E., Ali A., Macedonio F. Membrane Operations for Process Intensification in Desalination. *Membrane Desalination*. 2017. № 7(1). Pp. 70–100. doi: 10.3390/app7010100.
23. Peeva P. D., Knoche T., Pieper T., Ulbricht M. Cross-flow ultrafiltration of protein solutions through unmodified and surface functionalized polyethersulfone membranes — Effect of process conditions on separation performance. *Separation and Purification Technology*. 2012. № 92. Pp. 83–92.
24. Тамин А. Мембранные технологии в производстве напитков и молочных продуктов. М. : Профессия, 2016. 416 с.

25. Cai M. S. Zhao, H. Liang, Mechanisms for the enhancement of ultrafiltration and membrane cleaning by different ultrasonic frequencies. *Desalination*. 2010. Vol. 263. Pp. 133–138.

26. Arnal J. M., García-Fayos B., Sanch M. Membrane Cleaning. *Expanding Issues in Desalination*. 2011. Pp. 3–84.

References

1. Dejnichenko G. V., Guzenko V. V., Gafurov, O. V. (2015). *Yakist'harchovih ridin ul'trafil'tracijnogo koncentruvannya* [Quality of food liquids of ultrafiltration concentration]. *Tovari i rinki* [Goods and markets], 2 (20), p. 140–149.

2. Milić J. K., Petrinić I., Goršek A., Simonič M. (2014). Ultrafiltration of oil-in-water emulsion by using ceramic membrane: Taguchi experimental design approach. *Central European Journal of Chemistry*, № 12(2). Pp. 242–249.

3. Bhattacharjee, C., Saxena, V., Dutta, S. (2017). Fruit juice processing using membrane technology: A review, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, no 43, pp. 136–153.

4. Berk, Z. (2009). *Food process Engineering and Technology*. USA : Elsevier, 605 p.

5. Beicha, A., Zaamouche, R., Sulaiman, N. M. (2009). Dynamic ultrafiltration model based on concentration polarisation — cake layer interplay, *Desalination*, no. 242, pp. 138–148.

6. Semenov, A. G. (2011). *Razvitie gelevogo zagriznenija membrany pri tangencial'noj ul'trafil'tracii rastvora vysokomolekuljarnogo soedinenija* [The development of gel contamination of the membrane during tangential ultrafiltration of a solution of a macromolecular compound], *Tehnologija i tehnika pishhevyh proizvodstv* [Technology and technique of food production], no 1, pp. 79–83.

7. Gafurov, O. V. (2016). *Usovershenstvovanie processa ul'trafil'tracii belkovo-uglevodnogo molochnogo syr'ja i ego apparaturnoe oformlenie* [Improvement of the process of ultrafiltration of protein-carbohydrate milk raw materials and its instrumentation. PhD in Engineering sciences thesis]. Kharkiv: KhDUKhT, 256 p.

8. Myronchuk, V. G., Zmiyevs'kyj, Yu. G. (2013), *Membrani procesy v tekhnologiyi kompleksnoi pererobky syrovatky* [Membrane processes in technology of whey processing complex], Kyiv : NUXT, 126 p.

9. Nekoz, O. I., Litvinenko, O. A., Pashchenko, B. S. (2016). *Intensyfikaciya tekhnologiyi vodoochyshhennya dlya xarchovyx pidpryemstv* [Intensification water treatment technologies for food companies]. *Visnyk Xarkivskogo nacionalnogo tekhnichnogo universytetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasylenka* [Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture], no. 179, pp. 139–145.

10. Zolotukhina, I. V. (2021). *Naukove obgruntuvannya tekhnologij napivfabrykativ na osnovi ciljovogho vykorystannya nutrijentiv bilkovo-vuglevodnoji molochnoji syrovyny* [Scientific substantiation of technologies of semi-finished products on the basis of target use of nutrients of protein-carbohydrate dairy raw materials. PhD in Engineering sciences thesis]. Kharkiv, KhDUKhT, 303 p.

11. Deynychenko, G. V., Maznyak, Z. O., Guzenko, V. V., Udovenko, O. O., Omel'chenko, O. V. (2016). *Rozrobka pry'stroju dlya intensyfikaciyi procesu ul'trafil'tracijnogo koncentruvannya ridkyx vy'sokomolekulyarnyx polidy'spersnyx sy'stem* [Development of a device for intensifying the process of ultrafiltration high-concentration liquid polydisperse systems], *Pratsi Tavriys'koho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu* [Proceedings of the Tavriya State Agrotechnological University], no. 16(1), pp. 70–75.

12. Kumar, P., Sharma, N., Ranjan, R., Kumar, S. (2013). Perspective of Membrane Technology in Dairy Industry: A Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, vol. 9, iss. 26, pp. 1347–1358. doi: 10.5713/ajas.2013.13082.

13. Hu, K., Dickson, J. M. (2015). *Membrane Processing for Dairy Ingredient Separation*. Wiley Blackwell, Oxford. doi: 10.1002/9781118590331.

14. Dejnichenko, G., Guzenko, V., Dmytrevskiy, D., Chervonyi, V., Korolenko, O. (2020). Research method of reducing polarization layer at ultrafiltration of cottage cheese whey. *EUREKA: Life Sciences*, no. 4, pp. 8–14.

15. Lobasenko, B., Semenov, A. (2013). Intensification of ultrafiltration concentrating by the separation of the concentration boundary layer, *Foods and Raw Materials*, no. 1(1), pp. 74–81. <https://doi.org/10.12737/1560>.
16. Peinemann, V., Pereira Nunes, S., Giorno, L. (2010). *Membranes for food applications*, Borchester, UK: Wiley-VCH, 264 p.
17. Yaroslavcev, A. B. (2013). *Membrany i membrannye technologii* [Membranes and membrane technology], Moscow, Nauchny mir, 612 p.
18. Ribeiro, A., Ning, B., Goncalves, G. (2008). The optimisation of soybean oil degumming on a pilot plant scale using a ceramic membrane, *V. 87, № 4, P. 514–521*.
19. Dejnichenko, G. V., Maznyak, Z. O. and Zolotuhina, I. V. (2008), *Ul'trafil'tratsiyni protsesy ta tekhnolohiyi ratsional'noyi pererobky bilkovo-vuhlevodnoyi molochnoyi syrovyny* [Multifiltration processes and technology rational processing of Ultrafiltration Protein-Carbohydrate Raw Milk], Kharkiv, Fakt Publ.
20. Pervov, A. G. (2009). *Sovremennyye metody podgotovki ochistki pit'evoy i tekhnicheskoy vody s primeneniem membran: obratnyy osmos, nanofil'traciya, ul'trafil'traciya* [Modern methods of preparation and purification of drinking water technology using membranes: reverse osmosis, nanofiltration, ultrafiltration]. Moscow, Izdatel'stvo asociacii stroitel'nykh vuzov.
21. Drioli E., Giorno L. (2009). *Membrane operations: innovative separations and transformations*. Weinheim, Wiley-VCH, 578 p.
22. Drioli E., Ali A., Macedonio F. (2017). Membrane Operations for Process Intensification in Desalination. *Membrane Desalination*, 7(1), pp. 70–100. doi: 10.3390/app7010100.
23. Peeva P. D., Knoche T., Pieper T., Ulbricht M. (2012). Cross-flow ultrafiltration of protein solutions through unmodified and surface functionalized polyethersulfone membranes — Effect of process conditions on separation performance. *Separation and Purification Technology*, no. 92, pp. 83–92.
24. Tamin A. (2016). *Membrannyye tekhnologii v proizvodstve napitkov i vina* [Membrane technologies in the production of beverages and wine]. Moscow. 416 c.
25. Cai M. S. Zhao, H. Liang. (2010). Mechanisms for the enhancement of ultrafiltration and membrane cleaning by different ultrasonic frequencies. *Desalination*, vol. 263. pp. 133–138.
26. Arnal J. M., García-Fayos B., Sanch M. (2011). Membrane Cleaning. *Expanding Issues in Desalination*, 3–84.

Objective. The purpose of the article is analyze the main directions of improving the process aspects of membrane separation of food liquids in order to further create improved equipment for the concentration of raw milk.

Methods. The article uses generally accepted theoretical and combined methods of analytical research using modern computer programs. On the basis of experimental researches and own developments by methods of the comparative and system analysis and also classification by author's collective classifications of technical equipment of membrane processes are created. For the research the information sources on the chosen subject are analyzed: monographs, articles, encyclopedias, dissertations.

Results. The results of analytical studies to solve the problem of contamination of semipermeable membranes in the process of membrane separation of food liquids are presented. The classification of modern types of membrane equipment depending on the nature of the separation process is presented. The schematic diagram of traditional methods of reducing the concentration polarization on the surface of semipermeable membranes is presented and a comparative analysis of the most effective of them is given. Examples of innovative developments to reduce and remove the polarization layer from the surface of a semipermeable membrane are given. A classification of methods for combating concentration polarization in the process of membrane separation has been developed in order to develop membrane equipment using combined methods of removing contaminants on the surface of semipermeable membranes. Fundamentally new methods of classification of membrane equipment and methods of pollution control on membranes according to the requirements of the food industry are offered. The obtained results can be used in the further formation of theoretical and experimental research during the development of new methods of intensification of membrane processes of separation of food liquids.

Keywords: membrane, process, intensification, pollution, polarization, food liquids.