

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



ЗМІЄВСЬКИЙ ЮРІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК 66.081.6: 637.142.2

**НАУКОВІ ЗАСАДИ БАРО- ТА ЕЛЕКТРОМЕМБРАННИХ ПРОЦЕСІВ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та
фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Мирончук Валерій Григорович,
Національний університет харчових технологій МОН
України, завідувач кафедри технологічного обладнання
та комп'ютерних технологій проектування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Ободович Олександр Миколайович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
головний науковий співробітник відділу
тепломасообміну в дисперсних системах

доктор технічних наук, професор
Корнієнко Ярослав Микитович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського" МОН України, завідувач кафедри машин
та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

доктор хімічних наук, старший науковий співробітник
Мельник Людмила Олексіївна,
Інститут колоїдної хімії та хімії води ім.
А.В. Думанського НАН України, старший науковий
співробітник відділу хімії, фізики і біології води

Захист відбудеться "7" листопада 2018 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, аудиторія А-311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий "4" жовтня 2018 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02,
к.т.н, доцент

С.І. Літвинчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Харчова промисловість є однією з основних бюджетоутворюючих галузей України. Розроблення нових та удосконалення існуючих технологій на базі сучасних досягнень науки і техніки забезпечує подальший розвиток харчової галузі економіки країни.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальних проблем ефективного застосування мембранних процесів у технологіях харчових виробництв для забезпечення їх енергозаощадження, мінімізації відходів та екологічної безпеки.

Розвитку теоретичних основ та удосконаленню апаратурного оформлення мембранних процесів присвячені роботи провідних науковців цієї галузі: Брика М.Т., Бурбана А.Ф., Гуцалюка В.М, Дитнерського Ю.І., Дейниченка Г.В., Дзязько Ю.С., Євдокимова І.О., Заболоцького В.І., Корнієнка Я.М., Кучерука Д.Д., Ліпатова М.М., Мельник Л.О., Ніконенко В.В., Чагаровського А.П., Balanec B., Duke M., Hinkova A., Kovacs Z., Vatai G., Vourch M. та інших.

Аналіз показує, що на сьогодні існує низка невикористаних резервів для інтенсивного впровадження мембранних технологій у виробництво. Недостатність існуючих даних, щодо ефективності мембранних процесів та їх неузгодженість ускладнюють створення високоефективних мембранних технологій. Для усунення цих прогалин потрібні інноваційні підходи на основі новітніх теоретичних уявлень про явища, що відбуваються в процесі мікроочищення та концентрування розчинів харчових виробництв. Використання теоретичних положень фізико-хімічної механіки суцільного середовища складних хіміко-технологічних систем, закономірностей масоперенесення та гідродинаміки дають можливість доповнити існуючу теорію та практику баро- та електромембранних процесів. З огляду на вищесказане, проведення наукових досліджень баро- та електромембранних процесів з метою їх широкого застосування у технологіях харчових виробництв є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних напрямків наукових робіт Національного університету харчових технологій, зокрема до тем: «Розроблення наукових основ технологічних процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв з метою створення високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації і автоматизації для харчових та переробних галузей АПК» (2011-2015 рр.) та «Розроблення високотехнологічних процесів та обладнання харчових виробництв» (2016-2020 рр.) в межах кафедральної теми «Інтенсифікація тепломасообмінних процесів з метою створення високоефективного обладнання харчових виробництв (номер державної реєстрації 0112U006800)» кафедри технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування, а також в межах держбюджетних тематик проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій «Розроблення наукових основ очищення сироватки мембранними методами з метою використання отриманих розчинів у харчовій промисловості» (0108U011256, 2009-2011 рр.), «Розроблення

удосконаленої технології демінералізації молочної сироватки з отриманням очищеної води» (0112U001081, 2012-2013 рр.), «Розроблення технологій мікророзділення у процесах концентрування та очищення біологічних рідин» (0115U003030, 2015-2016 рр.), «Баро- та електромембранні процеси в технологіях очищення рідких середовищ харчової промисловості» (0117U001247, 2017-2019 рр.), в яких автор був відповідальним виконавцем на посаді старшого наукового співробітника.

Мета роботи – наукове обґрунтування баро- та електромембранних процесів для створення ресурсоенергоощадних та екологічно безпечних харчових технологій. У відповідності з поставленою метою сформульовані такі **завдання досліджень**:

- виконати системний аналіз сучасних теорій і практик баро- та електромембранних процесів;
- розробити наукові засади процесу нанофільтрації та діананофільтрації молочної сироватки з врахуванням способів її попередньої обробки;
- встановити і науково обґрунтувати механізм утворення осаду в процесі нанофільтрації молочної сироватки та обґрунтувати технологію хімічної регенерації мембран;
- встановити механізм селективного розділення в процесі концентрування нанофільтраційного пермеату молочної сироватки зворотним осмосом;
- науково обґрунтувати перспективність застосування баромембранних процесів для концентрування очищеного соку бурякоцукрового виробництва;
- встановити механізм масоперенесення в модифікованих мембранах для інтенсифікації баро- та електромембранних процесів у технологіях харчових виробництв;
- надати рекомендації промисловості щодо практичного використання результатів наукових досліджень баро- та електромембранних процесів харчових технологій.

Об'єкт досліджень – баро- та електромембранні процеси.

Предмет досліджень – закономірності баро- та електромембранних процесів харчових технологій та характеристики полімерних, іонообмінних та модифікованих наночастинками цирконію мембран.

Методи досліджень. В роботі використано наступні методи досліджень: фізичне моделювання баро- та електромембранних процесів із застосуванням сучасних лабораторних установок та контрольовано-вимірювальних приладів; математичне моделювання зазначених процесів ґрунтувалось на чисельних методах кінцевих елементів; статистична обробка експериментальних результатів та обчислення проведені за допомогою сучасних комп'ютерних програм. При дослідженні структури мембран застосовували трансмісійну та сканувальну електронну мікроскопію, еталонну контактну порометрію, вольт-амперні та потенціометричні вимірювання тощо. При визначенні фізико-хімічних показників розчинів, що розділялись, використовували загальноновживані сучасні методики та відповідне лабораторне обладнання.

Наукова новизна одержаних результатів:

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробленні наукових засад баро- та електромембранних процесів харчових технологій, що базуються на нових уявленнях про механізми розділення багатокомпонентних гетерогенних рідин. В результаті виконаних комплексних теоретичних та експериментальних досліджень отримано нові наукові результати:

- вперше виявлено ефект зменшення проникності лактози крізь зворотноосмотичні мембрани за умов їх концентрації в розчині вище 1 %. Експериментально підтверджена прийнята гіпотеза, що за цих умов в процесі зворотноосмотичного концентрування лактозовмістних розчинів, відбувається утворення нуклідів лактози, що підвищує селективність зворотноосмотичних мембран в межах 20 %;

- вперше обґрунтовано наукові засади розділення молочної сироватки нанофільтрацією при русі рідкої фази в напірних каналах з числом Рейнольдса 400...600, що забезпечує рівень концентраційної поляризації менше 1,6 при вмісті жирової фази $0,060 \pm 0,005$ %.

- вперше доведено, що модифікування гетерогенних іонообмінних мембран гідрофосфатом цирконію дозволяє підвищити їх зарядову селективність на третину та інтенсифікувати електромембранний процес демінералізації молочної сироватки;

- експериментально встановлено, що утворена наночастинками цирконію вторинна пористість, підвищує затримуючу здатність модифікованих гідрофосфатом цирконію полімерних композиційних і трекових мембран по високомолекулярних сполуках. Розмір утворених пор становить близько 100 нм;

- отримала подальший розвиток теорія процесу формування осаду під час нанофільтрації молочної сироватки, що полягає у виявленні його двостадійного механізму;

- експериментально встановлено залежність гідравлічних опорів динамічної мембрани та концентраційної поляризації в процесі розділення багатокомпонентних гетерогенних рідин нанофільтрацією від тиску та вмісту сухих речовин;

- науково обґрунтовано, що процес діананофільтрації дозволяє збільшити рівень демінералізації молочної сироватки до 60 ± 2 %, що в 2,4 рази перевищує цей показник для традиційної нанофільтрації.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- встановлені раціональні режими процесу нанофільтрації та діананофільтрації молочної сироватки; запропоновані режими регенерації нанофільтраційних мембран; визначені раціональні конструктивні характеристики нанофільтраційних апаратів;

- удосконалено методику розрахунку багатоконтурних баромембранних апаратів безперервної дії;

- запропоновано спосіб концентрування розчинів сахарози цукрового виробництва зворотним осмосом до вмісту сухих речовин в межах 33 ± 5 %;

– обґрунтована доцільність застосування модифікованих наночастинками цирконію полімерних мембран для баромембранного розділення післяспиртової зернової барди;

– розроблено апаратурно-технологічні схеми переробки молочної сироватки, нанофільтраційного пермеату молочної сироватки та розчинів цукрової промисловості, які передбачають застосування баро- та електромембранних процесів;

– розроблено проект технічних умов та технологічної інструкції на ТУ У 15.5-02070938-255:2018 «Концентрат мінеральних речовин для ремінералізації питної води» (від 27.02.2018 р.);

– результати наукових досліджень впроваджені у виробництво на молокопереробних підприємствах ПАТ «Дубномолоко» (акт від 11.10.2013 р.), ПАТ «Літинський молокозавод» (акт від 20.11.2013 р.), ПОСП ім. Шевченка (акт від 10.02.2015 р.), ПАТ «Городенківський сирзавод» (акт від 07.02.2018 р.); спиртовому заводу - Червонослобідський МПД ДП «Укрспирт» (акт від 27.04.2015 р.); приватному підприємстві «Logrus» (акт від 15.02.2018 р.), що спеціалізується на впровадженні сучасних технологій та обладнання на підприємствах харчової промисловості; розрахунковий економічний ефект від впровадження результатів наукових досліджень становить 2 млн. 68 тис. грн на рік для молочних підприємств продуктивністю 300 т молока на добу та 1 млн. 94 тис. грн. на рік для спиртового підприємства продуктивністю 3000 дал спирту на добу.

– основні положення дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Національного університету харчових технологій під час виконання науково-дослідних робіт, при вивченні фахових дисциплін, в курсовому та дипломному проектуванні (акт від 27.12.2017 р.).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій базується на результатах теоретичних досліджень і натурних експериментів, виконаних із застосуванням сучасних методик. Результати наукових досліджень отримані із застосуванням фундаментальних закономірностей масоперенесення, фізико-хімічної механіки та гідродинаміки; використанням сучасних інтегрованих систем MathCad, MathLab, Statistica, Origin, AutoCad, КОМПАС, Curve Expert, Microsoft Office тощо; застосуванням методів математичного моделювання та статистичного оброблення дослідних даних; адекватністю результатів фізичних та аналітичних експериментів.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні плану проведення досліджень, виконанні обробки та аналізу отриманих результатів, формулюванні загальних висновків та рекомендацій; проектуванні, виготовленні та налагодженні лабораторних установок; розробленні методик досліджень, одержанні експериментальних даних; розробленні математичної моделі баромембранних процесів; удосконаленні методики розрахунку багатоконтурних баромембранних установок безперервної дії; розробленні наведених у роботі апаратурно-технологічних схем переробки рідин харчової промисловості; апробації запропонованих технічних рішень.

Модифікування мембран та дослідження їх структури було виконано за сприяння д.х.н., ст.н.с. Дзязько Ю.С., аналіз та узагальнення результатів досліджень проведено спільно з науковим консультантом д.т.н., проф. В. Г. Мирончуком.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і були схвалені на щорічних наукових конференціях Національного університету харчових технологій в 2011-2017 рр. (м. Київ); міжнародних науково-практичних конференціях «Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії» у 2012, 2014 та 2016 рр. (м. Київ); всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми розвитку харчових виробництв, готельного, ресторанного господарств і торгівлі» у 2011 р. та «Інноваційні технології розвитку у сфері харчових виробництв, готельно-ресторанного бізнесу, економіки та підприємництва» у 2016 р., міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності», 2017 р. (м. Харків); II міжнародній Польсько-Українській науковій конференції «Membrane and Sorption Processes and Technologies» у Києво-Могилянській академії в 2015 р. (м. Київ); II міжнародній науково-технічній конференції «Технічні науки: стан, досягнення і перспективи розвитку м'ясної, олієжирової та молочної галузей», 2013 р., (м. Київ); всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми харчової промисловості», 2013 р. (м. Тернопіль); міжнародній конференції «Ion transport in organic and inorganic membranes», 2012-2013 рр. (м. Краснодар); міжнародній науково-технічній конференції «Инновационное развитие малых городов России: научный, технологический и образовательный потенциал», 2013 р., (м. Мелеуз); XII міжнародній науковій конференції «МЕМБРАНЫ-2013», 2013 р. (м. Володимир); науковій конференції з міжнародною участю «Food Science, Engineering and Technologies», 2013 р. (м. Пловдив, Болгарія); міжнародній науковій конференції «Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2014)», 2014 р., та міжнародній науково-технічній конференції «Новітні науково-технічні рішення в харчовій промисловості», 2015 р. (м. Львів), міжнародному науковому семінарі «Application of Membrane Technologies for Water Reclamation and Whey Desalination in Food Industry», 2017 р. (м. Ізмір, Турція) та інших.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 73 наукові роботи: 2 монографії; 9 статей, що індексуються у міжнародній наукометричній базі даних SCOPUS; 14 статей у фахових виданнях України; 6 статей у збірниках матеріалів конференцій; 32 тези доповідей; 4 патенти України на винахід та 6 патентів України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 8 розділів із списками використаних літературних джерел, загальних висновків та 10 додатків. Основний зміст роботи викладено на 291 сторінці, з яких 10 повністю заповнені рисунками та таблицями, в роботі міститься 116 рисунків і 44 таблиці. Повний список використаних літературних джерел містить 536 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень та розкрито її зв'язок з науковими програмами; сформульовано мету та завдання досліджень, розкрито предмет, об'єкт, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача; наведено дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** проаналізовано сучасний стан теорій та практики процесів нанофільтрації та зворотного осмосу, розкрито особливості будови мембран для їх реалізації та основні принципи механізмів селективного розділення іонів та органічних сполук.

На основі аналізу процесу діафільтрації обґрунтовано необхідність досліджень часткового та динамічного способів розбавлення розчинів харчових виробництв для забезпечення максимальної ефективності їх очищення від баластних сполук.

Узагальнення даних літературних джерел в частині мембранних технологій свідчить, що теоретичні уявлення процесу формування осаду при розділенні багатоконпонентних розчинів харчової промисловості потребують узгодження та доповнення. Відзначено, що їх склад та, відповідно, способи їх попередньої обробки суттєво впливають на показники мембранних процесів. Обмеженість інформації щодо впливу жирової фази на ефективність баромембранного розділення розчинів харчових виробництв потребує розроблення відповідних наукових положень на основі експериментальних та аналітичних досліджень. Аналіз сучасних технологій регенерації полімерних мембран дозволили визначити найбільш ефективні реагенти для відновлення їх проникності.

Показана актуальність досліджень щодо застосування модифікованих мембран для баро- та електромембранних процесів внаслідок набуття ними нових властивостей, які зменшують ступінь їх забруднення органічними сполуками.

Науково обґрунтовано, що для узагальнення результатів експериментальних досліджень баромембранних процесів доцільно застосовувати напівемпіричні математичні моделі, які з високим ступенем достовірності відображають реальний процес.

Зроблено висновок, що для забезпечення необхідних гідродинамічних умов в напірних каналах доцільно застосовувати багатоконтурні апарати безперервної дії, методика розрахунку яких потребує уточнення.

На основі аналізу науково-технічної інформації сформульовано завдання досліджень та визначені шляхи їх вирішення.

У **другому розділі** науково обґрунтовано об'єкт та предмет досліджень, сформульовані основні гіпотези, які потребували експериментального підтвердження, наведені методи досліджень, будова та принцип дії експериментальних установок, методика обробки експериментальних даних, методики модифікування і дослідження властивостей та характеристик іонообмінних та полімерних мембран. Проаналізовано характеристики іонообмінних гетерогенних та полімерних композиційних мембран щодо

можливості їх застосування для баро- та електромембранних процесів при розділенні розчинів харчової промисловості.

Дослідження баромембранних процесів проводили за розробленою нами методикою на експериментальних установках непроточного (тупикового) та проточного типів. Ефективна площа мембрани становила $1,96 \cdot 10^{-3}$ та $2,1 \cdot 10^{-3}$ м² відповідно.

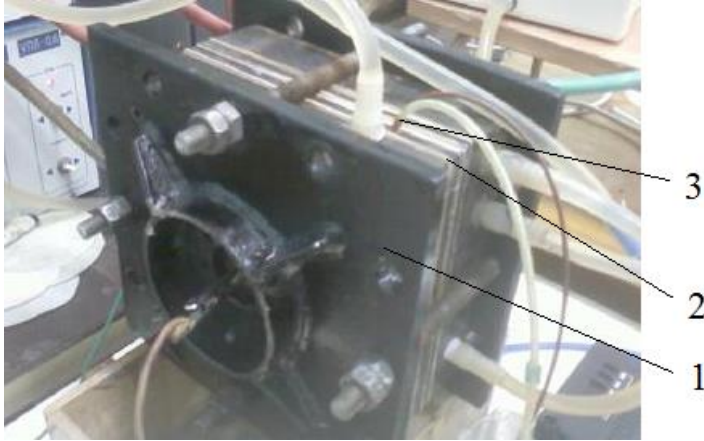


Рис. 1. Експериментальний електродіалізатор з непроточними камерами концентрування:
1 – притискні пластини; 2 – мембрани; 3 – патрубки для відведення концентрату з непроточних камер концентрування

Електромембранні процеси, для отримання висококонцентрованих розчинів мінеральних речовин, досліджували на лабораторній установці з непроточними камерами концентрування (рис. 1). Ефективна площа мембран становила $1,6 \cdot 10^{-3}$ м², використовували графітові електроди. Запропоновано фізичну модель та прийнято гіпотезу, що процес формування осаду при

розділенні нанофільтрацією водомістких багатокомпонентних суспензій таких як: молочна сироватка, післяспиртова зернова барда тощо, відбувається у два етапи (рис. 2). Спочатку адсорбуються високомолекулярні сполуки, які утворюють динамічну мембрану з власною пористою структурою. При збільшенні концентрації розчинених речовин у примембранному шарі важливу роль починають відігравати взаємодія між органічними та неорганічними сполуками у динамічній мембрані, що призводить до поступового закупорювання її пор.

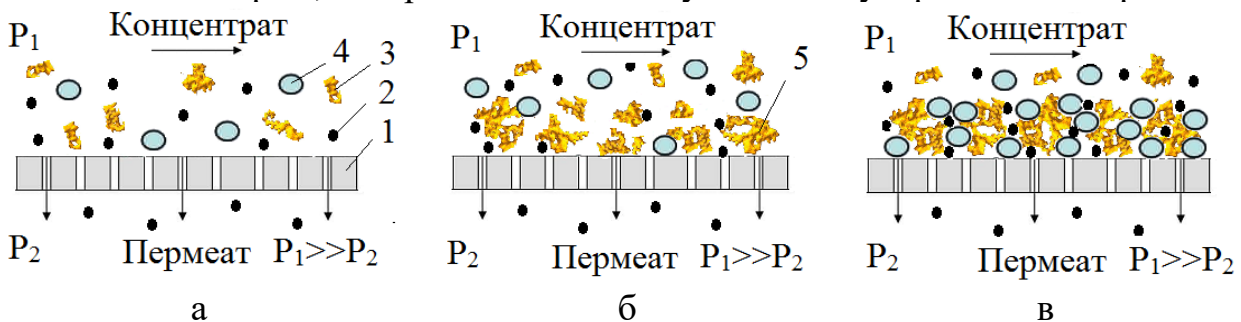


Рис. 2. Графічне представлення процесу формування осаду на поверхні нанофільтраційних мембран при розділенні водомістких багатокомпонентних суспензій на прикладі молочної сироватки.

а) початок розділення; б) адсорбція високомолекулярних (білкових) сполук на мембрані; в) поступове закупорювання пор адсорбційного шару.

1 – мембрана; 2 – мінеральні речовини; 3 – білкові сполуки; 4 – лактоза; 5 – білкові комплекси, що утворюють динамічну мембрану; P_1 , P_2 – тиск в напірному каналі та каналі для відведення пермеату відповідно

У **третьому розділі** наведені результати постадійних експериментальних досліджень процесу нанофільтрації молочної сироватки, як багатокомпонентного продукту.

Результати експериментальних досліджень показали, що нанофільтрація в порівнянні із зворотним осмосом споживає менше енергії під час концентрування молочної сироватки та збільшує її демінералізацію на 20-30 %. Встановлено, що допустимий рівень вмісту жирової фази при нанофільтрації молочної сироватки становить $0,060 \pm 0,005$ %. Перевищення цього значення призводить до трикратного зниження питомої продуктивності та зростання питомих витрат енергії на 45 %. На основі аналізу експериментальних даних висунуто гіпотезу, згідно якої питома продуктивність та селективність нанофільтраційних мембран визначається переважно розміром частинок жирів. Частинки великого розміру виносяться потоком за межі дифузійного шару, тим самим збурюючи його. Одночасно, дрібні частинки накопичуються на поверхні мембрани, створюючи додатковий гідравлічний опір.

Дані експериментальних досліджень (рис. 3, 4) свідчать про те, що раціональний тиск процесу нанофільтрації молочної сироватки становить 1,5 МПа. Збільшення тиску не призводить до інтенсифікації процесу внаслідок ущільнення динамічної мембрани, що утворюється із білкових сполук сироватки, при цьому підвищуються питомі витрати енергії (рис. 3). Окрім того (рис. 5, 6), зміна рН середовища не впливає на селективні властивості мембран, але погіршує значення питомої продуктивності в процесі концентрування, що, очевидно, пов'язано із зміною властивостей білкових сполук. Процес розділення натуральної знежиреної молочної сироватки з рН $4,52 \pm 0,02$ характеризується найбільш стабільною продуктивністю мембрани (рис. 5).

Відомо, що відсутність білкових сполук в розчинах мінімізує забруднення нанофільтраційних мембран. Результати досліджень різних способів попереднього видалення білків з молочної сироватки перед нанофільтрацією, що наведені в табл. 1, свідчать, що за умов тиску 5 МПа процес протікає найбільш інтенсивно.

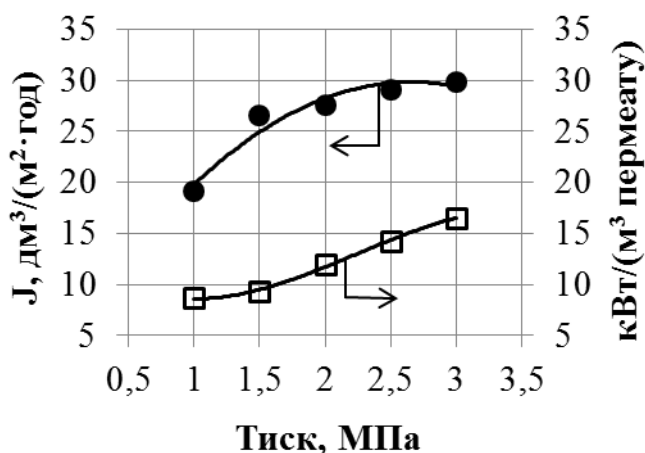


Рис. 3. Залежність питомої продуктивності J (чорні маркери) та питомих витрат енергії (прозорі маркери) від тиску в робочій камері

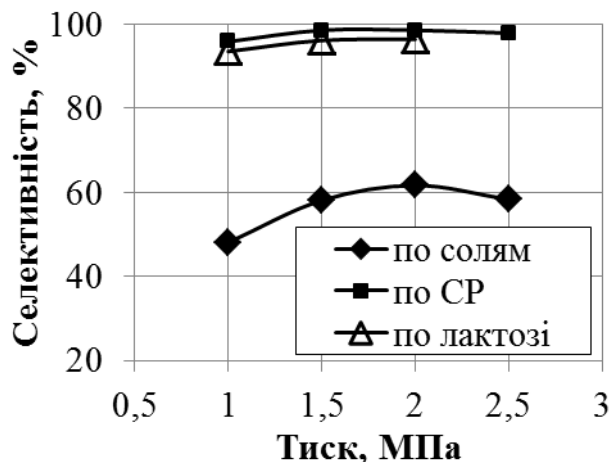


Рис. 4. Селективність мембрани ОПМН-П при розділенні молочної сироватки. Розчин сконцентровано у 3 рази по об'єму. СР —сухі речовини

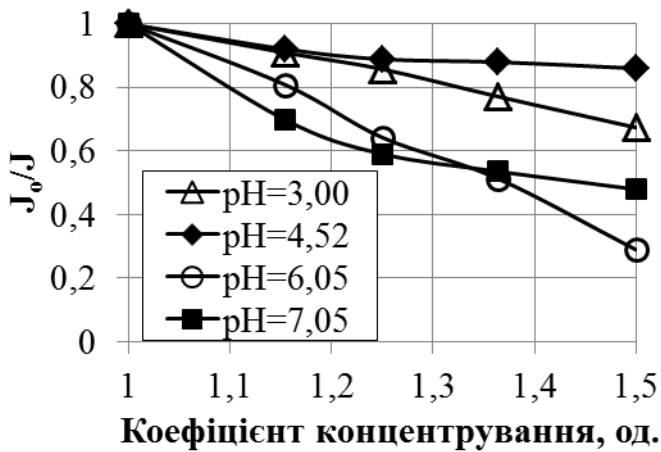


Рис. 5. Залежність відносної питомої продуктивності мембран від коефіцієнта концентрування при різних значеннях рН

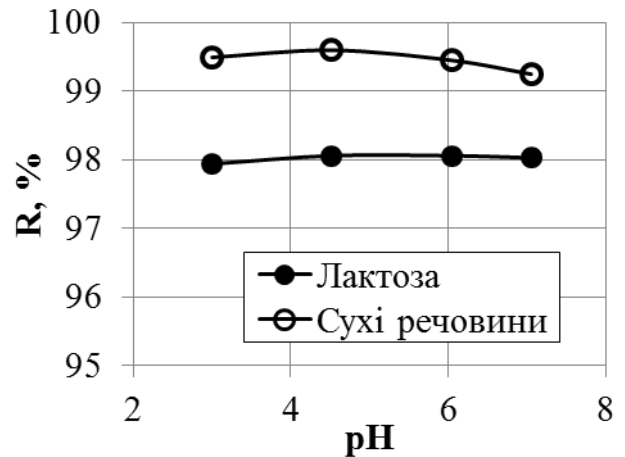


Рис. 6. Залежність селективності мембрани ОПМН-П по лактозі та сухим речовинам від рН молочної сироватки

Такий спосіб обробки раціонально застосовувати в технологіях виробництва лактози, коли ультрафільтрацією відділяються високомолекулярні сполуки, а пермеат концентрується та очищається від нецукрів.

На основі теорії розділення суспензій фільтруванням та експериментальних даних визначено механізм забруднення нанофільтраційних мембран, який полягає у осадженні білкових компонентів молочної сироватки на поверхні мембрани, а не в середині пор, що має місце при мікро- та ультрафільтрації. Такий осад являє собою так звану динамічну мембрану, яка формується на початку процесу внаслідок адсорбції органічних сполук. В подальшому відбувається поступове закупорювання пор адсорбційного шару динамічної мембрани.

Таблиця 1

Порівняння питомих витрат енергії та площі мембран при нанофільтрації молочної сироватки після її попередньої обробки мікро- та ультрафільтрацією

Тип сироватки	Параметр	Тиск, МПа			
		1,6	4	5	6
Після мікрофільтрації	$J_{\text{ср.}}$, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	18,3	26,3	37,2	36,2
	W , кВт/м^3	7,64	13,3	11,73	14,39
	F , м^2	27,3	19,0	13,4	13,7
Після мікро- та ультрафільтрації	$J_{\text{ср.}}$, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	-	61,0	78,7	70,0
	W , кВт/м^3	-	5,74	5,51	7,46
	F , м^2	-	8,2	6,3	7,1

Утворений шар осаду створює гідравлічний опір, величина якого майже у 5 разів вища за опір самої мембрани. Враховуючи, що цей шар має комбінований органо-неорганічний склад, хімічна регенерація нанофільтраційних мембран повинна складатись з поетапного застосування лужних та кислотних розчинів. Експериментально показано ефективність

використання водного розчину гідроксиду натрію з концентрацією в межах 0,5 %, а також водних розчинів лимонної, азотної і соляної кислот концентрацією не більше 2 %. Запропонований спосіб хімічної регенерації полімерних мембран після розділення молочної сироватки забезпечує їх повне очищення від осаду та зберігає їх початкові функціональні властивості.

У **четвертому розділі** наведені результати експериментальних досліджень процесу зворотного осмосу за умов концентрування нанофільтраційного пермеату молочної сироватки та очищеного соку бурякоцукрового виробництва, а також процесу електродіалізного концентрування мінеральних речовин.

Експериментально встановлено, що мінеральний склад зворотноосмотичного концентрату нанофільтраційного перемету молочної сироватки (рис. 7) містить іонів хлору (Cl^-) - 44,4 %, калію (K^+) - 37,8 %, натрію (Na^+) - 8,1 %, кальцію (Ca^{2+}) - 0,5 % та магнію (Mg^{2+}) - 0,3 % до загальної кількості неорганічних речовин. При цьому співвідношення $\text{K}^+/\text{Na}^+=4.6$, що відповідає медичним рекомендаціям здорового харчування і дозволяє використовувати зазначений розчин для ремінералізації питної води після її очищення зворотним осмосом.

Дослідження проводились з використанням мембран НаноРо, TFC-75F та ESPA-1. Показано, що питома продуктивність та селективність по мінеральним речовинам мембрани НаноРо внаслідок більшої гідрофільності, є вищою в 1,7-2,4 рази та 5-26 % відповідно, в порівнянні з досліджуваними аналогами.

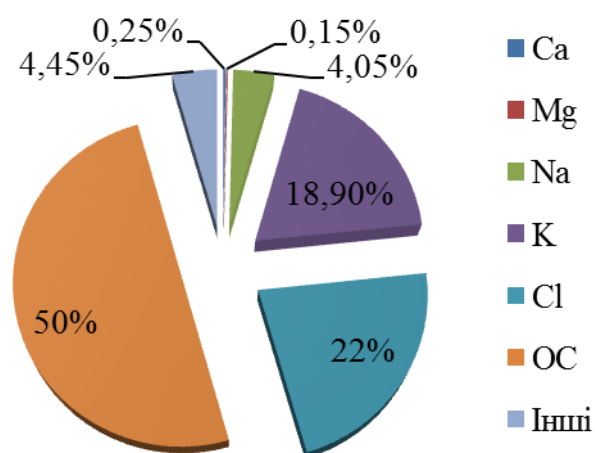


Рис. 7. Розподіл сухих речовин у нанофільтраційному пермеаті молочної сироватки. OS – органічні сполуки

Встановлено, що вміст лактози у нанофільтраційному пермеаті в значній мірі впливає на селективність зворотноосмотичних мембран. При концентрації лактози від 1 % до 20 % для зазначених мембран спостерігалась висока селективність щодо цієї речовини (96-99 %). Зменшення вмісту лактози нижче 1 % викликає зниження селективності до 64-92 %

(рис.8б), величина якої залежить від типу мембрани і робочого тиску. На цій підставі прийнято та експериментально підтверджено гіпотезу, що при концентраціях вище 1 % в розчині утворюються нукліди лактози, які затримуються мембраною завдяки збільшенню власного розміру до декількох нанометрів.

Аналогічні результати були отримані при розділенні нанофільтраційного пермеату молочної сироватки (рис. 9). Характер зміни селективності зворотноосмотичних мембран по лактозі та мінеральним речовинам різний:

проникність мінеральних речовин крізь мембрану зростає при збільшенні концентрації розчину, а лактози, навпаки – зменшується. Це підтверджено результатами досліджень масообмінних процесів в напірних каналах та величиною дифузійної проникності розчинених компонентів крізь мембрани. На основі отриманих результатів встановлено, що на проникність мембран впливає рівень концентраційної поляризації, який доцільно підтримувати в межах 1,0-1,6.

Зважаючи на те, що механізм перенесення розчинених речовин крізь мембрану – дифузійний, за однакові проміжки часу переноситься практично однакова кількість іонів за рахунок молекулярної дифузії. При збільшенні трансмембранного тиску зростає потік розчинника крізь мембрану, а дифузійне масоперенесення залежить від різниці концентрацій у примембранному шарі концентрату та пермеату, що обумовлює підвищення селективності мембран при вищих тисках. Це узгоджується з капілярно-фільтраційною моделлю селективності напівпроникних мембран.

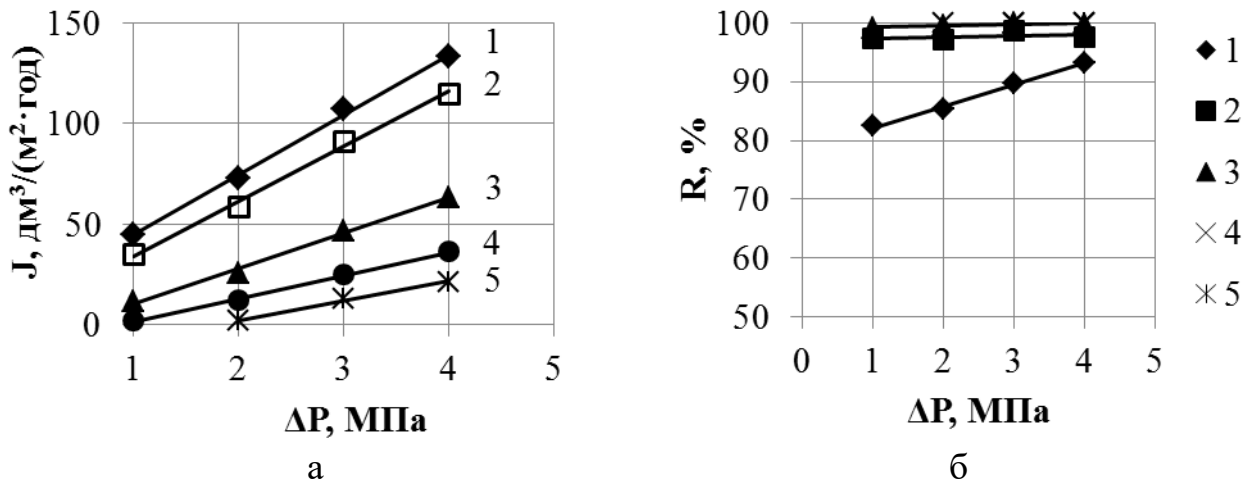


Рис. 8. Зміна питомої продуктивності (а) та селективності (б) мембрани НаноРо при розділенні модельних розчинів лактози залежно від тиску: 1 – концентрація лактози 0,2 %; 2 – 1,0 %; 3 – 5,0 %; 4 – 10 %; 5 – 15 %

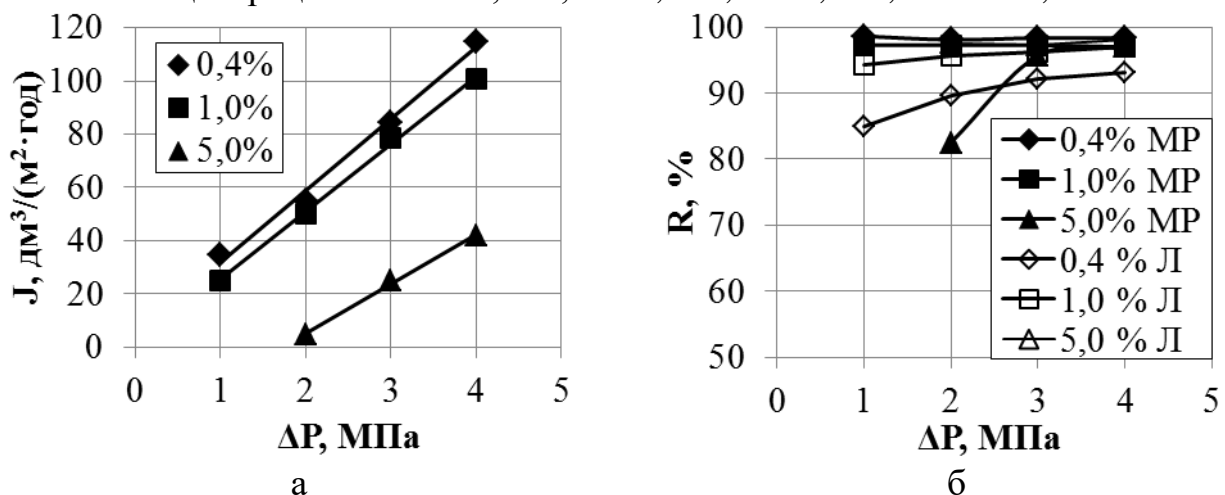


Рис. 9. Залежність питомої продуктивності (а) та селективності по мінеральним речовинам (MP) (непрозорі маркери) та лактозі (Л) (прозорі маркери) (б) мембрани НаноРо при різному вмісті сухих речовин від тиску при розділенні нанофільтраційного пермеату молочної сироватки

Лінійне зростання селективності спостерігається також при збільшенні рушійної сили до значення тиску 3 МПа (рис. 9б). Більш високий тиск практично не змінює цей показник. Очевидно, що за рахунок концентраційної поляризації, вміст лактози в примембранному шарі досягає значень, при яких утворюються нукліди (асоціати). Це зменшує проникність лактози крізь мембрану, тобто підвищує її селективність. За таких умов при 3 МПа формується дифузійний шар, структура якого мало змінюється при підвищенні тиску. З точки зору максимальної селективності, достатньої продуктивності та допустимого рівня концентраційної поляризації, процес розділення доцільно проводити при тиску 3 МПа.

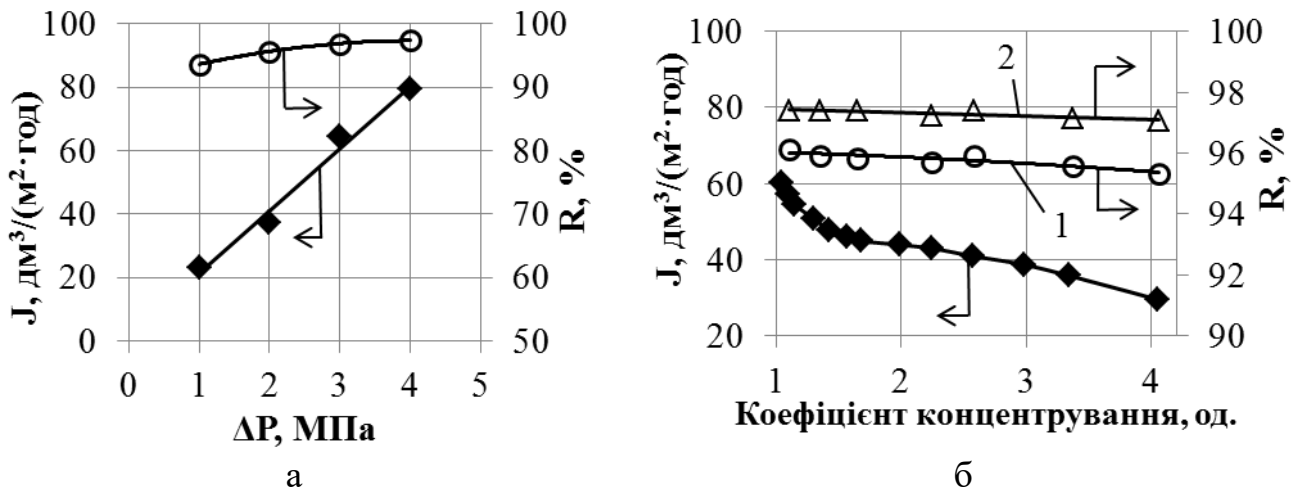


Рис. 10. Залежність питомої продуктивності (J) та селективності (R) мембрани НаноРо від тиску (а) та коефіцієнту концентрування (V_o/V_k) (б) при розділенні нанофільтраційного пермеату молочної сироватки, отриманого за промислових умов; V_o , V_k - відповідно об'єм розчину на початку концентрування та вкінці; 1 – по мінеральним речовинам; 2 – по лактозі

Для встановлення адекватності результатів разом з дослідженнями розчинів, отриманих в межах лабораторії, використовували зразки, одержані за промислових умов. При їх розділенні, зміну питомої продуктивності мембран (рис. 10б) можна поділити на два етапи. Перший етап обумовлений встановленням динамічної рівноваги між конвективним потоком розчинених речовин до мембрани та дифузійним, спрямованим в зворотній бік. Накопичення розчинених компонентів в дифузійному шарі, їх адсорбція на поверхні мембрани, зміна поверхневих електростатичних сил, формування динамічного шару – все це відбувається на першому етапі. На другому – зміна питомої продуктивності мембран пояснюється поступовим збільшенням осмотичного тиску внаслідок підвищення концентрації розчину, що супроводжується досить швидкою стабілізацією структури дифузійного шару та встановленням динамічної рівноваги. Селективність мембрани НаноРо по лактозі та мінеральним солям для всіх досліджуваних зразків практично не відрізняється.

Встановлено, що при отриманні концентратів мінеральних речовин із нанофільтраційного пермеату молочної сироватки електродіалізом,

енерговитрати зменшуються у 5-8 разів за умови його попереднього концентрування зворотним осмосом від 4 г/дм³ до 50 г/дм³ і складають в середньому 0,188 кВт·год/(кг солі). Це майже у 5 разів менше, ніж при електродіалізній обробці природної води, що пов'язано з наявністю рухливих іонів у розчині (K⁺, Na⁺, Cl⁻) та відсутністю органічних комплексів, які зв'язують іони неорганічних сполук.

Дослідження зворотноосмотичного концентрування цукрових розчинів на прикладі фільтрованого соку другої сатурації показали (рис. 11а), що при тиску 6 МПа селективність мембрани по сухій речовині становить майже 99 %, що дозволило досягти коефіцієнта концентрування 2,5 (рис. 11б) та отримати концентрат з вмістом сухих речовин в межах 33±5 %. Відсутність фазових переходів розчинника під час концентрування цукрового розчину зворотним осмосом дає суттєві переваги порівняно із концентруванням традиційним методом випарювання.

Для визначення коефіцієнта масовіддачі за умов експерименту користувались отриманими даними та моделлю Шпіглера-Кедема-плівковою

$$\ln\left(J \cdot \frac{1-R_o}{R_o}\right) = \ln P_s + \frac{J}{k}, \quad (1)$$

де R_o – уявна селективність мембрани; P_s – проникність розчинених речовин крізь мембрану; k – коефіцієнт масовіддачі.

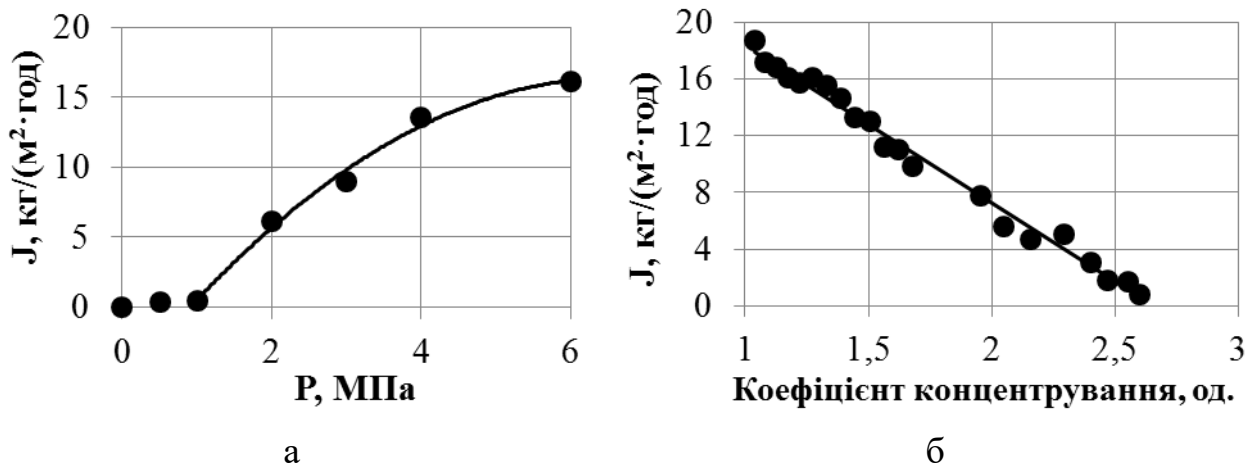


Рис. 11. Залежність питомої продуктивності мембран НаноРо від тиску (а) та коефіцієнту концентрування (б) при розділенні фільтрованого соку другої сатурації. Початковий вміст сухих речовин 14,5 %

Зміна коефіцієнта масовіддачі та втрат напору в напірних каналах при збільшенні лінійної швидкості фільтрованого соку другої сатурації має нелінійний характер (рис. 12).

Слід зазначити, що зважаючи на значні температурні режими у технологіях бурякоцукрової промисловості, у технологіях виробництва цукру необхідно застосовувати керамічні або термостійкі полімерні зворотноосмотичні мембрани.

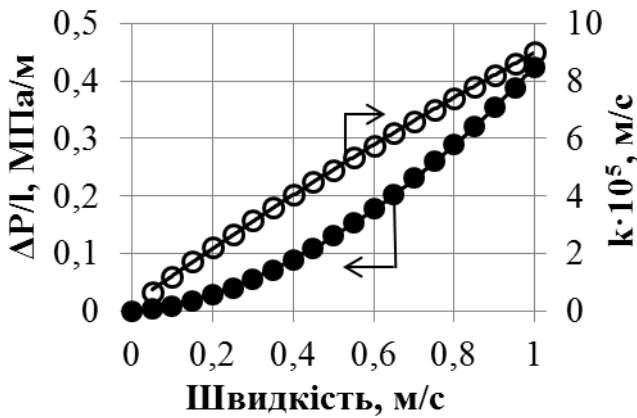


Рис. 12. Залежність втрат напору вздовж напірного каналу та зміна коефіцієнту масовіддачі залежно від швидкості фільтрованого соку другої сатурації при його концентруванні зворотним осмосом

У п'ятому розділі наведені результати досліджень процесу діалізації молочної сироватки.

Відомо, що застосування діалізації збільшує питому продуктивність мембран та ступінь очищення розчину від баластних сполук. В цьому випадку важливо визначити доцільну величину витратного коефіцієнта діалізації α , тобто співвідношення об'ємних потоків води на діалізацію та пермеату.

У випадку діананофільтрації молочної сироватки показник α визначали за рівнянням (2), враховуючи, що селективність

мембран по лактозі $R=0,97$, селективність по мінеральним речовинам $r=0,5$,

$$\alpha = \frac{r \cdot \ln\left(\frac{C_o}{C}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{c}{c_o}\right)}{\ln\left(\frac{C_o}{C}\right) + \ln\left(\frac{c}{c_o}\right)}, \quad (2)$$

де C_o, C - відповідно початкова та поточна (кінцева) концентрації лактози; c_o, c - відповідно початкова та поточна (кінцева) концентрації мінеральних речовин, R, r - відповідно селективність по лактозі та мінеральним речовинам.

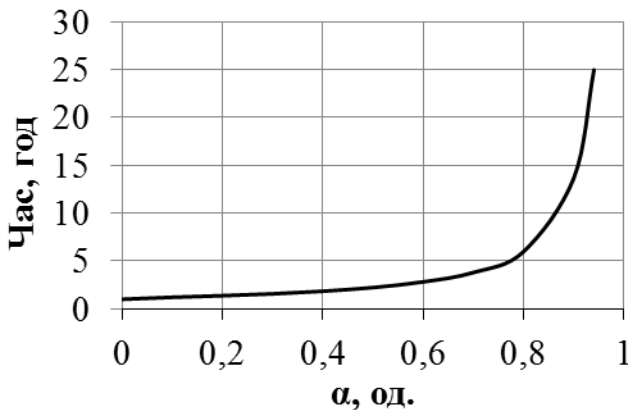


Рис. 13. Залежність тривалості обробки молочної сироватки від витратного коефіцієнта діалізації α при селективності мембрани по лактозі $R=0,97$

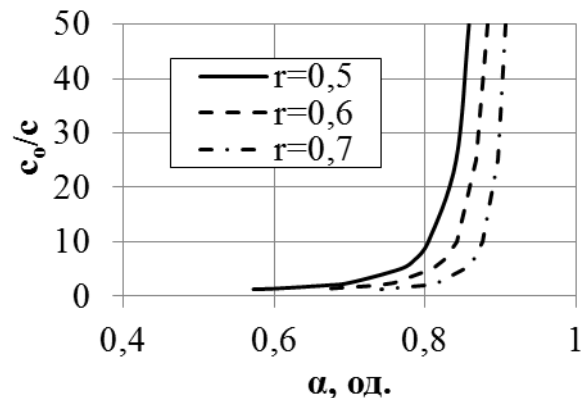


Рис. 14. Залежність ступеня очищення (c_o/c) розчину від баластних низькомолекулярних сполук при селективності мембрани по лактозі $R=0,97$ від витратного коефіцієнта діалізації α ; r - селективність по мінеральним речовинам

Результати досліджень (рис. 13) свідчать, що за умови $\alpha < 0,8$ зберігається пропорційність між збільшенням тривалості процесу та кількістю води, що безперервно додається. При $\alpha \geq 0,8$ тривалість концентрування підвищується, що негативно впливає на якість кінцевої продукції і пояснюється практично повним вимиванням з молочної сироватки одновалентних іонів мінеральних речовин.

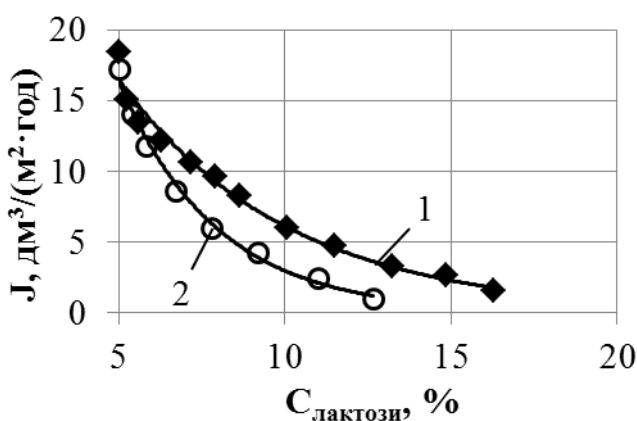
Аналіз досліджень ступеня очищення розчину (c_0/c) залежно від α (рис. 14) показав, що за умови зменшення величини селективності (r) мембран по мінеральним речовинам, показник c_0/c суттєво збільшується за однакових умов.

Таблиця 2

Основні показники молочної сироватки до і після мембранного розділення молочної сироватки

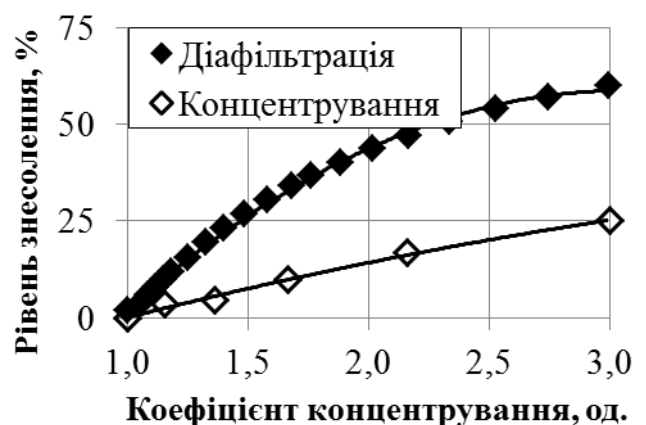
Показник	Нанofільтрація			Діананofільтрація		
	до	після		до	після	
		К	П		К	П
Вміст сухих речовин, %	5,7±0,2	14,2±1,0	0,46±0,05	5,7±0,2	13,8±1,0	0,31±0,05
Титрована кислотність, T°	67±5	133±7	23±3	67±5	93±5	20±3
Загальний вміст мінеральних речовин, г/дм ³	5,31	3,98	1,32	5,31	2,01	3,30
Демінералізація, %	-	26	-	-	62	-

Примітки: К – концентрат; П – пермеат; T° – градуси Тернера



а

Рис. 15. Залежність питомої продуктивності J нанofільтраційних мембран від концентрації лактози в режимі часткового розбавлення при $\alpha=0,8$ (1) та концентрування (2)



б

Рис. 16. Зміна рівня знесолення залежно від коефіцієнту концентрування в процесі нанofільтрації та діананofільтрації молочної сироватки

При динамічній діананофільтрації для визначення функції витратної характеристики $\alpha(C, c)$ за (6), використовували функцію $g(C, c)$, знайдену шляхом підстановки емпіричної залежності $J(C, c)$ (3) у (4),

$$J(C, c) = 32 \cdot C^{-0,55} - (17,2 - 0,7 \cdot C) \cdot c, \quad (3)$$

$$g(c_i) = \left[1 + \sum_i \frac{\partial \ln J}{\partial \ln c_i} + \sum_i \frac{\partial \ln R_{BMC}}{\partial \ln c_i} \right] = 0, \quad (4)$$

$$g(c, C) = 1 + \frac{1,4 \cdot C \cdot c - 17,6 \cdot C^{-0,55} - 17,2 \cdot c}{32 \cdot C^{-0,55} + 17,2 \cdot c + 0,7 \cdot C \cdot c} = 0, \quad (5)$$

$$\alpha(c_i) = 1 - \left\{ \frac{\sum_i R_i \cdot \frac{\partial g(c_i)}{\partial \ln c_i}}{\sum_i \frac{\partial g(c_i)}{\partial \ln c_i}} \right\}, \quad (6)$$

$$\alpha(C, c) = 1,6 - \frac{A(C, c)}{B(C, c)}, \quad (7)$$

$$A = R_1 \cdot C \cdot \frac{(9,68 \cdot C^{-1,55} + 1,4 \cdot c) \cdot D - E \cdot (-17,6 \cdot C^{-1,55} + 0,7 \cdot c)}{D^2} + \\ + R_2 \cdot c \cdot \frac{(1,4 \cdot C - 17,2) \cdot D - E \cdot (17,2 + 0,7 \cdot C)}{D^2}, \quad (8)$$

$$B = C \cdot \frac{(9,68 \cdot C^{-1,55} + 1,4 \cdot c) \cdot D - E \cdot (-17,6 \cdot C^{-1,55} + 0,7 \cdot c)}{D^2} + \\ + c \cdot \frac{(1,4 \cdot C - 17,2) \cdot D - E \cdot (17,2 + 0,7 \cdot C)}{D^2}, \quad (9)$$

$$D = 32 \cdot C^{-0,55} + 17,2 \cdot c + 0,7 \cdot C \cdot c, \quad (10)$$

$$E = -17,6 \cdot C^{-0,55} - 17,2 \cdot c + 1,4 \cdot C \cdot c, \quad (11)$$

де C та c - відповідно вміст лактози та мінеральних речовин, %; $g(C, c)$ - емпірична функція.

Отримані результати наведені на рис. 17-18.

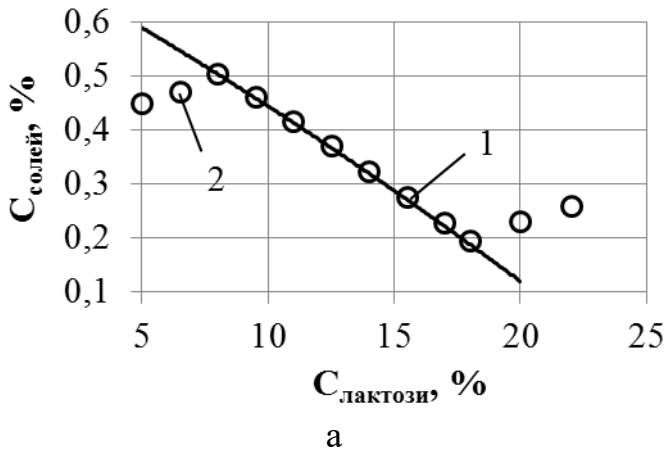


Рис. 17. Зміна концентрації компонентів молочної сироватки в процесі динамічної діяфільтрації відповідно до функції $g(C,c)$ (1) та реального процесу (2)

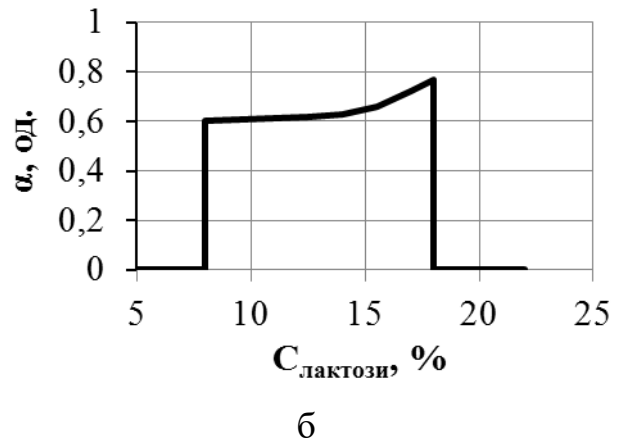


Рис. 18. Зміна витратного коефіцієнта α при динамічній діянофільтрації молочної сироватки

Таким чином, використання діяфільтрації дозволяє підвищити ступінь очищення розчинів від баластних сполук та покращити якість кінцевого продукту.

У **шостому розділі** наведені результати досліджень мембранних процесів із застосуванням гетерогенних іонообмінних та полімерних мембран, модифікованих наночастинками цирконію.

За допомогою скануючої і трансмісійної електронної мікроскопії визначено, що розміри наночастинок цирконію, розташованих в тілі гетерогенних іонообмінних мембран, не перевищують 100 нм. На основі експериментальних досліджень встановлено, що зазначені наночастинки проникають практично у всі наявні пори катіоно- та аніонообмінних мембран. Позитивний ефект досягається внаслідок заповнення великих низькоселективних пор, що створює додатковий бар'єр небажаному проникненню коіонів крізь мембрани та підвищує їх селективність.

Проведені експериментальні дослідження демінералізації молочної сироватки електродіалізом, результати яких наведені на рис. 19, підтвердили ефективність застосування модифікованих іонообмінних мембран. За таких умов збільшується вихід за струмом іонів кальцію та магнію, а також, на відміну від немодифікованої мембрани, із зростанням тривалості розділення підвищується вихід за струмом фосфорвмісних іонів, що пов'язано із стійкістю мембрани до адсорбції органічних речовин. Для іонів лужних металів швидкість перенесення іонів калію (K^+) зростає, а натрію (Na^+) - навпаки, зменшується. Це обумовлено меншою рухливістю іонів натрію в неорганічній фазі мембрани. Таким чином, перед досягненням високої швидкості транспортування іонів відбувається їх акумулювання у мембрані протягом певного кумулятивного періоду.

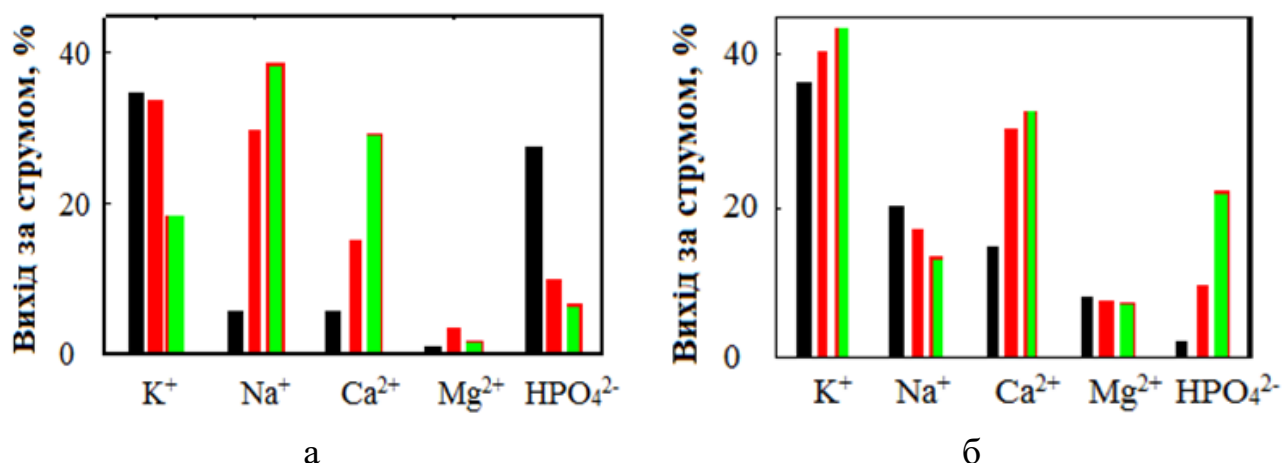


Рис. 19. Зміна кількості ефективно перенесеного електричного заряду (вихід за струмом) відповідними іонами крізь немодифіковані (а) та модифіковані (б) іонообмінні мембрани при різній тривалості процесу електродіалізу молочної сироватки. Тривалість - 1 (■), 3 (■) та 5 (■) годин

Сумарний вихід за струмом катіонів збільшується до 96 % у випадку модифікованих мембран, що обумовлено екрануванням нетранспортних пор агрегатами наночастинок з одного боку та зменшенням осадоутворення у порах мембран з іншого.

Встановлено, що найнижча вартість електродіалісної обробки молочної сироватки із застосуванням модифікованих та немодифікованих іонообмінних мембран знаходиться в межах густини струму 150-200 А/м². Однак, модифікування мембран забезпечує зниження витрат на знесолювання зазначеного розчину майже на 35 % за рахунок вищого значення ефективного використання струму (вихід за струмом, коефіцієнт корисної дії) та стійкості до адсорбції органічних сполук в процесі експлуатації.

В цьому розділі також наведені результати досліджень по вивченню структури (рис. 20, 21) та застосуванню модифікованих полімерних мембран при розділенні післяспиртової зернової барди. Введення наночастинок в структуру мембрани забезпечує їх стійкість до адсорбції органічних сполук саме в порах, що спрощує процеси їх подальшої регенерації. Експериментально встановлено, що пористість модифікованих мембран зменшується на 10-20 %, однак, слід зазначити, що адсорбовані на їх поверхні компоненти розчину мають в декілька разів більший вплив на продуктивність, ніж зміна пористості в зазначених межах. Доведено, що при модифікуванні полімерних мембран гідрофосфатом цирконію ефективним є лише перший цикл хімічного вбудовування наночастинок в їх структуру, наступні цикли призводять до утворення небажаних агрегатів, що блокують транспортні пори.

Експериментальними дослідженнями розділення післяспиртової зернової барди доведено, що гідрофосфат цирконію впливає на проникність мембран, особливо це помітно при підвищених температурах (понад 60 °С) і пов'язано не лише з деформацією базової структури основи, але й з фрагментацією агрегатів модифікатору.

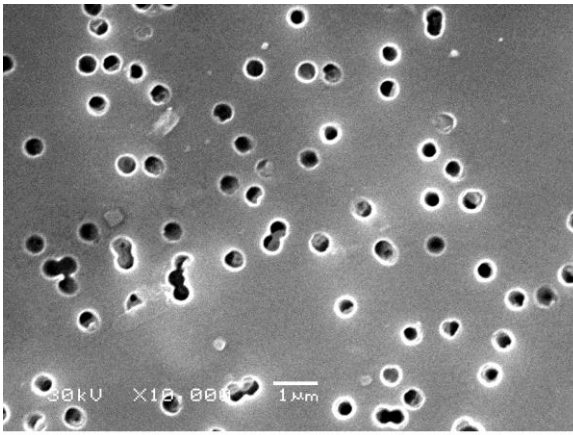


Рис. 20. Мікрображення зовнішньої поверхні трекової полімерної мембрани

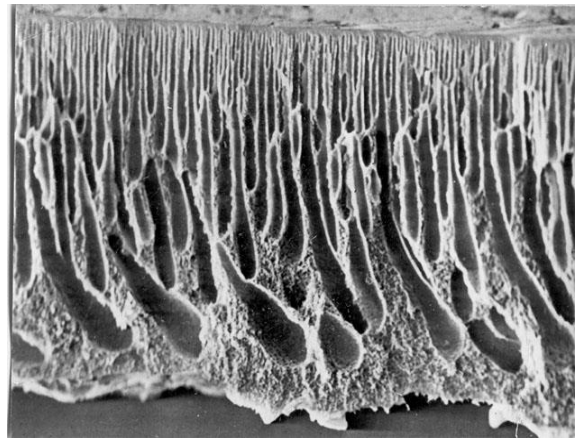


Рис. 21. Мікрображення поперечного перерізу композиційної полімерної мембрани

Неорганічний компонент покращує стабільність мембрани проти адсорбційного забруднення органічними сполуками. Це дозволяє легко змивати шар осаду з поверхні розділення, який утворюється в процесі розділення рідин харчової промисловості, таких як післяспиртова барда чи молочна сироватка. Це значно покращує привабливість застосування мембранних процесів у технологіях розділення рідких багатокомпонентних середовищ.

У цьому розділі наведені результати експериментальних досліджень, математичного моделювання та визначення раціональних конструктивних параметрів апаратів для процесу нанофільтрації молочної сироватки.

З рис. 22а видно, що гідравлічний опір осаду знижується при збільшенні лінійної швидкості над поверхнею мембрани, що пов'язано зі збільшенням числа Рейнольдса. Можна виділити три основні зони. Перша (Re 120-400) характеризується зменшенням R_f/R_m при зростанні швидкості та відповідно чисел Рейнольдса, друга (Re 400-600) - рівноважним (стаціонарним) станом, коли швидкість не впливає на зміну R_f/R_m , третя (Re 600-800) - аналог першої зони, проте при більших швидкостях (числах Рейнольдса), що можна пояснити різною силою зсуву, що виникає біля поверхні мембрани при зміні швидкості молочної сироватки.

На рис. 22б представлені результати техніко-економічного аналізу розділення молочної сироватки нанофільтрацією за різних значень чисел Рейнольдса. Очевидно, що раціонально застосовувати, так званий «рівноважний режим», коли Re 400-600 (швидкість 0,22-0,32 м/с). Менші значення Re призводять до подорожчання процесу розділення за рахунок інтенсивного осадоутворення та низької питомої продуктивності мембран. Більші значення потребують підвищених витрат енергії на перекачування, хоча й характеризуються високим потоком пермеату. Розрахунки показали, що найбільш ефективними є нанофільтраційні апарати з сумарною довжиною напірних каналів 4 м.

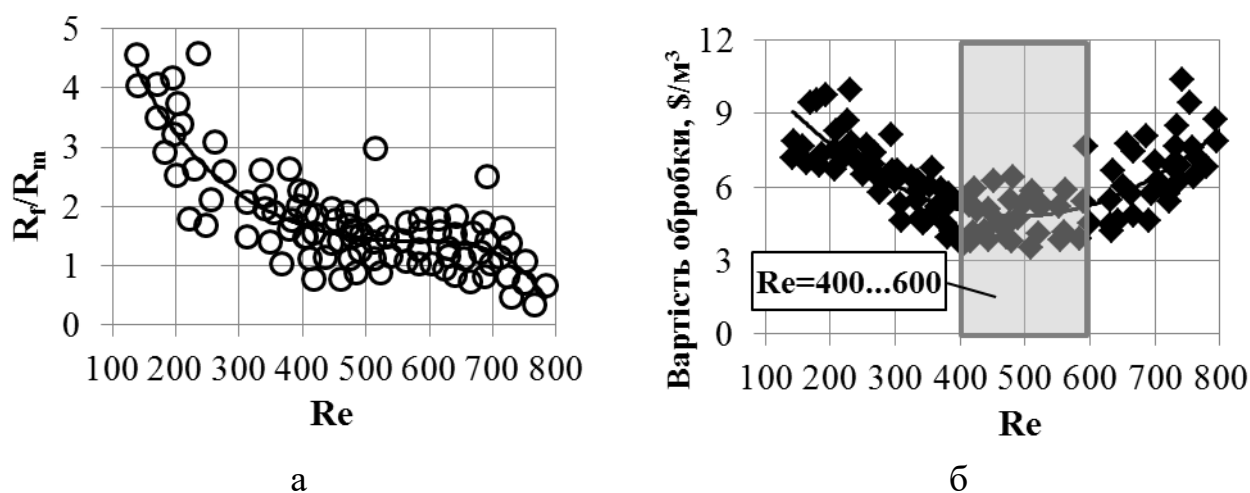


Рис. 22. Залежність R_f/R_m (а) та вартості обробки молочної сироватки (б) від числа Рейнольдса в напірних каналах: R_f - гідравлічний опір, що здійснюють компоненти розчину, адсорбовані на поверхні мембрани; R_m - гідравлічний опір мембрани

Найбільшою проблемою мембранних процесів залишається забруднення фільтрувальних елементів, що призводить до зниження якості розділення та підвищення питомих витрат енергії. Тому задачі прогнозування цих явищ є актуальними.

Відомо, що математичні моделі, що можуть реально відображати мембранні процеси і вважаються відтворюваними з достатньою для інженерних розрахунків точністю є напівемпіричними. Тобто, без проведення експериментів та визначення відповідних коефіцієнтів описати явища, що відбуваються на мікрорівні неможливо. Тому на основі врахування фізичних явищ, що відбуваються в процесі адсорбції білків та оброблення експериментальних даних, було отримане рівняння кінетики накопичення адсорбованої речовини на мембрані (12),

$$m_{ad}(t) = \frac{1,78}{5,7 + e^{-3,47t}}, \quad (12)$$

де $m_{ad}(t)$ - кількість адсорбованої речовини на мембрані, мг/см²; t - час, год.

Це дозволило встановити, що нестационарний адсорбційний процес високомолекулярних сполук молочної сироватки на полімерній мембрані триває близько 12 годин.

Експериментально встановлена нелінійна залежність зміни гідравлічного опору шару забруднень (R_f) мембрани від тиску (рис. 23а) та лінійність зміни гідравлічного опору концентраційної поляризації ($R_{КП}$) при зростанні вмісту сухих речовин у розчині від 6 % до 18 % (рис. 23б). Отримані дані необхідно враховувати при проектуванні баромембранних апаратів та інтерпретації дослідних даних.

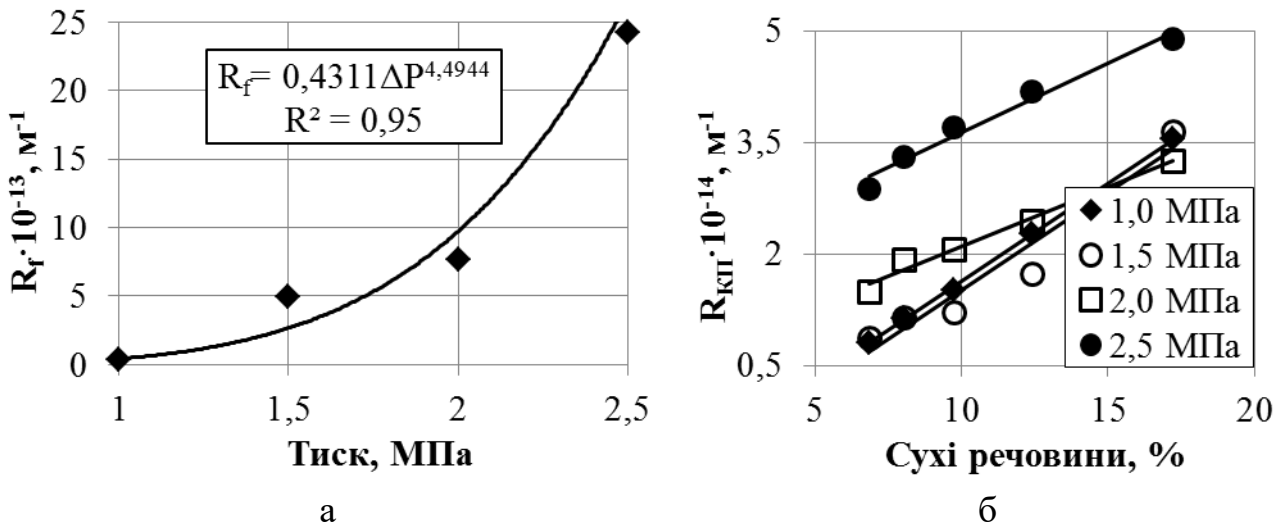


Рис. 23. Зміна величини гідравлічного опору адсорбційного забруднення R_f залежно від робочого тиску (а); залежність гідравлічного опору концентраційної поляризації від вмісту сухих речовин молочної сироватки при різних робочих тисках (б)

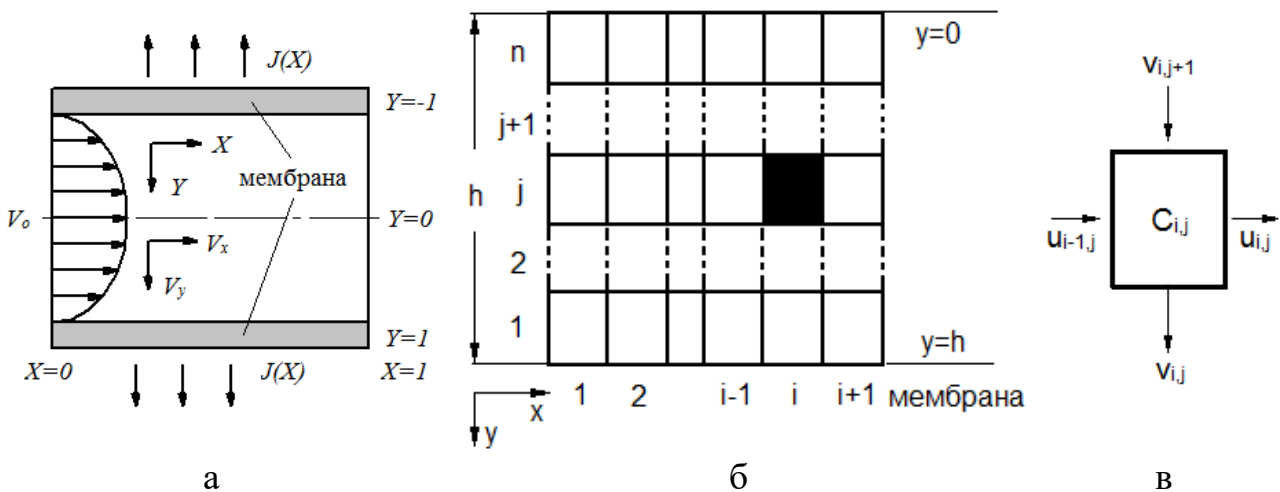


Рис. 24. Розрахункова схема плоских напірних каналів (а), розрахункова сітка (б) та її елементарна комірка (в) для баромембранних процесів:

X, Y - безрозмірні координати довжини та висоти каналу відповідно; $J(X)$ - питома продуктивність мембрани; V_0 - середня швидкість розчину на вході в напірний канал; h - половина висоти каналу; i, j - номер поточної комірки по осі x та y відповідно

Математичне моделювання процесу нанофільтрації молочної сироватки здійснене на основі системи диференціальних рівнянь (14), розв'язаних чисельними методами кінцевих елементів.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial \tau} + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) = \mu \cdot \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} \\ \rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial \tau} + \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = \mu \cdot \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} , \\ \frac{\partial C}{\partial \tau} + V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \end{array} \right. , \quad (14)$$

де $C(x, y, \tau)$ – поле концентрацій, $V_x(x, y, \tau)$ та $V_y(x, y, \tau)$ – поля швидкостей, повздовжня і поперечна компоненти швидкості, відповідно, ρ – густина розділювального розчину, μ – динамічна в'язкість, D – коефіцієнт дифузії розчиненої речовини.

Граничні умови нанofільтраційного процесу розділення описуються рівняннями (15-17).

Перша гранична умова:

$$\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{v_w(x) \cdot R_w}{D} \cdot C_w(x) \quad \text{при } y=h, \quad (15)$$

де h – половина висоти каналу; R_w – істинна селективність мембрани; D – коефіцієнт дифузії; C_w – концентрація розчинених речовин біля поверхні мембрани; $v_w(x)$ – лінійна швидкість пермеату крізь мембрану на відстані x від входу в напірний канал.

Друга гранична умова:

$$\frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y=0. \quad (16)$$

Третя гранична умова:

$$C = C_o \quad \text{при } x=0, \quad (17)$$

де C_o – початкова концентрація розчинених речовин.

Розв'язком системи диференціальних рівнянь (14) з врахуванням граничних умов отримали рівняння (18-20) для визначення концентрацій розчинених компонентів по висоті та довжині напірних каналів баромембранного апарату:

$$C_{i,j} = \frac{u_{i-1,j} \cdot C_{i-1,j} \cdot \delta y + v_{i,j+1} \cdot C_{i,j+1} \cdot \delta x + (D_{i,j+1}^{i,j} \cdot C_{i,j+1} + D_{i,j}^{i,j-1} \cdot C_{i,j-1}) \cdot \frac{\delta x}{\delta y}}{u_{i,j} \cdot \delta y + v_{i,j} \cdot \delta x + (D_{i,j+1}^{i,j} + D_{i,j}^{i,j-1}) \cdot \frac{\delta x}{\delta y}}, \quad (18)$$

$$C_{i,1} = \frac{u_{i-1,1} \cdot C_{i-1,1} \cdot \delta y + v_{i,2} \cdot C_{i,2} \cdot \delta x + D_{i,2}^{i,1} \cdot C_{i,2} \cdot \frac{\delta x}{\delta y}}{u_{i,1} \cdot \delta y + v_w \cdot R \cdot \delta x + D_{i,2}^{i,1} \cdot \frac{\delta x}{\delta y}}, \quad (19)$$

$$C_{i,n} = \frac{u_{i-1,n} \cdot C_{i-1,n} \cdot \delta y + D_{i,n}^{i,n-1} \cdot C_{i,n-1} \cdot \frac{\delta x}{\delta y}}{u_{i,n} \cdot \delta y + v_{i,n} \cdot \delta x + D_{i,n}^{i,n-1} \cdot \frac{\delta x}{\delta y}}, \quad (20)$$

де u , v – відповідно вертикальна та горизонтальна швидкості розчину в напірних каналах (розраховуються за відомими аналітичними рівняннями Бермана (Berman)).

Рівняння (20) дозволяє розраховувати концентрацію в комірках, що знаходяться у верхній межі змодельованої системи (рис. 24), тобто в центральній лінії напірного каналу, а (19) - для комірок в примембранному шарі. Концентрації в елементах, що заповнюють простір між мембраною та центральною лінією каналу визначали за (18). Для розв'язку системи рівнянь застосовували метод послідовних ітерацій, де в першому наближенні прийнято $C_{i,j+1} = C_{i-1,j+1}$. Це дозволяє визначити розподіл концентрації розчинених речовин по висоті каналу, що впливає на питому продуктивність мембрани. Результати обчислень наведені на рис. 25 та рис. 26.

Розрахунки проводили для трьох різних початкових концентрацій (C_0): 6 %, 12 % та 18 % (в авторефераті представлені лише дані для 6 %). Вхідна швидкість молочної сироватки була в межах 0,32 м/с, а довжина 4 м, що обумовлено попередніми експериментальними результатами.

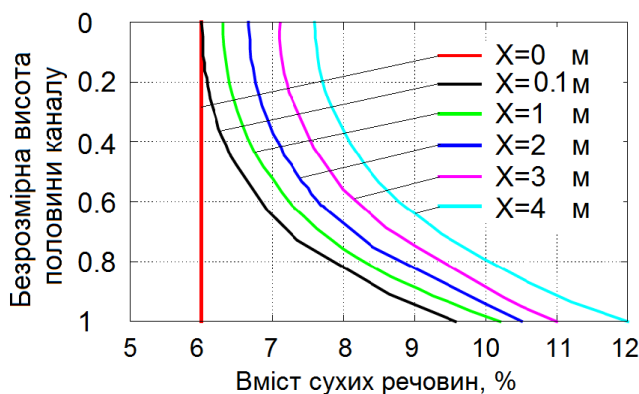


Рис. 25. Розподіл концентрації сухих речовин по висоті напірного каналу нанофільтраційного модуля при розділенні молочної сироватки. Вміст сухих речовин на вході $C_0 = 6\%$. По осі O_y координата 0 - середина напірного каналу, 1 - поверхня мембрани; X - відстань від входу в напірний канал мембранного модуля

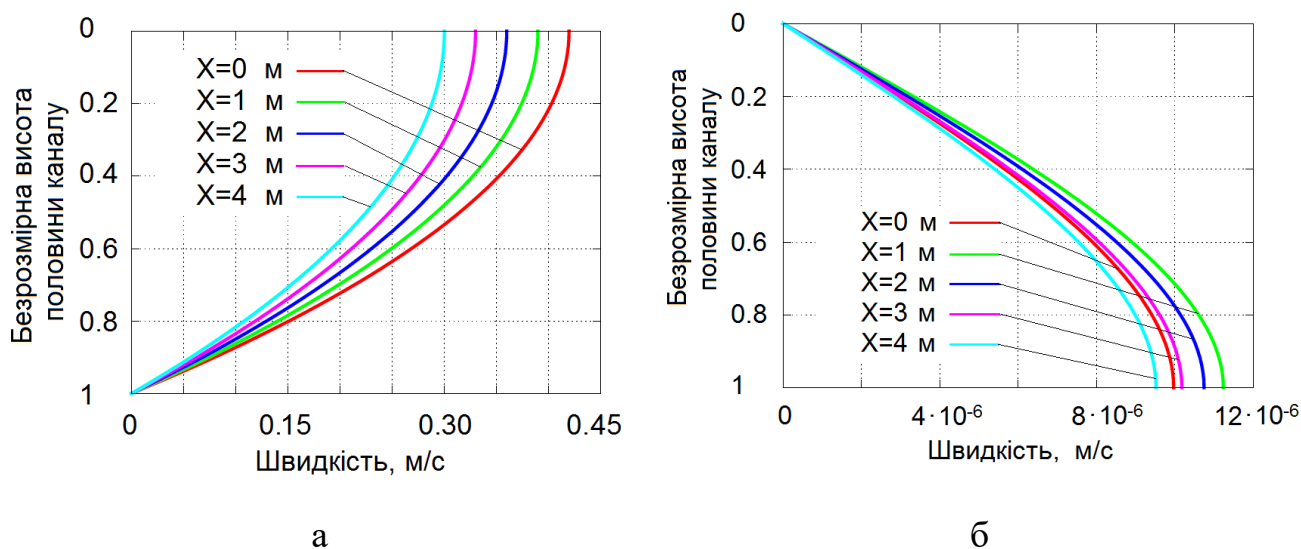


Рис. 26. Розподіл горизонтальних (а) та вертикальних (б) швидкостей молочної сироватки по висоті напірного нанofільтраційного каналу (по осі O_y координата 0 - середина каналу, 1 - мембрана). Вміст сухих речовин молочної сироватки на вході 6 %, середня швидкість на вході 0,32 м/с

У всіх випадках рівень концентраційної поляризації (визначався, як відношення значень концентрації в координаті 1 до значень в координаті 0 по осі O_y) знаходився на прийнятному рівні, а саме в межах від 1,3 до 1,6. Цей показник дещо збільшується по довжині каналу, що обумовлене зниженням горизонтальної швидкості за рахунок відведення із потоку відповідної кількості пермеату. Таким чином, погіршення гідродинамічних умов призводить до інтенсивнішого накопичення розчинених речовин біля поверхні розділення. Це сприяє зростанню осмотичного тиску в примембранному шарі та зниженню ефективної рушійної сили. До того ж, розчинені компоненти, що адсорбуються на мембрані, перекривають транспортні пори, створюючи додатковий гідравлічний опір, що підтверджено експериментальними даними. Зазначені ефекти знижують величину питомої продуктивності мембран.

В примембранному шарі горизонтальна швидкість прямує до нуля, що обумовлено відповідними граничними умовами та фізичною сутністю течії рідини. Наявність стінки (пористої чи непористої) спричиняє появу тертя між шаром рідини та поверхнею. Це сповільнює течію, проте основна частина кінетичної енергії переноситься шарами рідини, що рухаються в середині каналу та обумовлює асимптотичний характер розподілу горизонтальної швидкості по висоті напірного каналу. Подібний, але протилежний за значенням характер розподілу вертикальної складової швидкості розчину, спрямованої в бік мембрани.

Як правило, мембранні апарати великої продуктивності та безперервної дії мають від 2 до 7 контурів. До основних переваг багатоконтурних апаратів можна віднести більший міжрегенераційний період (як правило від 8 до 20 годин), вони потребують менші за об'ємом та розміром ємності для тимчасового зберігання продукту, а також меншої площі мембран тощо. Тому була удосконалена методика розрахунку баромембранних апаратів зазначеного

принципу дії. Відомий алгоритм передбачав необхідність попередньо задаватись кількістю контурів, що призводило до потреби постійного уточнення вихідних даних та повторення обчислень. Запропонований варіант ґрунтується на встановленні взаємозв'язку між коефіцієнтом концентрування за об'ємом та сухими речовинами, адже у нормативній документації харчових виробництв завжди вказується кінцевий вміст сухих речовин розчину, в той час, як при розрахунках мембранного обладнання вказується кінцевий об'єм розчину. Це дозволило задаватись необхідним значенням коефіцієнту концентрування та послідовно обчислювати параметри контурів баромембранних апаратів. Це спрощує процедуру та кількість необхідних розрахунків.

Запропонована математична модель дозволяє передбачати результати розділення рідин харчової промисловості. Для цього необхідно встановити залежності фізико-хімічних показників розчину від вмісту сухих речовин, температури тощо. Можна також використати експериментальні значення питомої продуктивності, одержані за подібних умов, що значно спрощує, і в той же час, уточнює алгоритм обчислень, оскільки мінімізує кількість прийнятих припущень та узагальнень.

У **восьмому розділі** представлені рекомендації щодо практичного застосування результатів наукових досліджень.

Розроблено апаратурно-технологічну схему (блок 1, рис. 27) концентрування молочної сироватки мембранними методами (патент України № 98270), яка передбачає послідовне застосування мікрофільтрації, діананофільтрації та зворотного осмосу. Це дозволяє відділити залишки жиру та казеїну на етапі мікрофільтрації, що в подальшому зменшує ступінь забруднення нанофільтраційних мембран.

Процес діананофільтрації (розбавлення очищеною водою концентрату в процесі нанофільтрації) забезпечує демінералізацію молочної сироватки в межах 50-60 %, що в порівнянні із звичайною нанофільтрацією вище на 25-35 %. При цьому отримується концентрат із вмістом сухих речовин в межах 18-22 %, який має більш широку сферу застосування саме за рахунок високого рівня демінералізації. Запропонована схема переробки передбачає, що пермеат, отриманий на стадії діананофільтрації, який містить переважно одновалентні солі та органічні сполуки у вигляді лактози та молочної кислоти, очищається зворотним осмосом. Отримана в такий спосіб вода, використовується в процесі діананофільтрації, тобто для розбавлення концентрату молочної сироватки.

Концентрат мінеральних та органічних речовин, одержаний на етапі зворотного осмосу може бути використаний в технології мінеральних концентратів для ремінералізації питної води. Запропонована схема концентрування молочної сироватки, в порівнянні з аналогами, забезпечує більш надійну роботу діананофільтраційного апарату за рахунок відділення крупних домішок мікрофільтрацією, дозволяє отримати продукт більш високої якості та в повній мірі використати мінеральні сполуки, що, як правило, скидаються в стоки.

Запропоновано гнучку апаратно-технологічну схему (блок 2, рис. 27) переробки нанофільтраційного пермеату молочної сироватки (патенти України № 94238, 107287, 107161), яка включає застосування процесів зворотного осмосу та електродіалізу. При цьому, якщо селективність зворотноосмотичних мембран нижче 90 % по мінеральним речовинам, то на першому етапі доцільно застосовувати електродіаліз, в іншому випадку – зворотний осмос. Запропонована схема дозволяє отримати концентрати мінеральних речовин (концентрація в межах 120-180 г/дм³), які можуть бути використані для ремінералізації питної води (розроблено проект технічних умов та технологічної інструкції на ТУ У 15.5-02070938-255:2018 «Концентрат мінеральних речовин для ремінералізації питної води»), очищеної зворотним осмосом, а також очищену воду, придатну для застосування у технологічних процесах виробництва. Отриманий концентрат лактози може бути повернутий на початкову стадію концентрування молочної сироватки та мінімізувати її втрати або використаний у біотехнологічних процесах, як поживні речовини для мікроорганізмів.

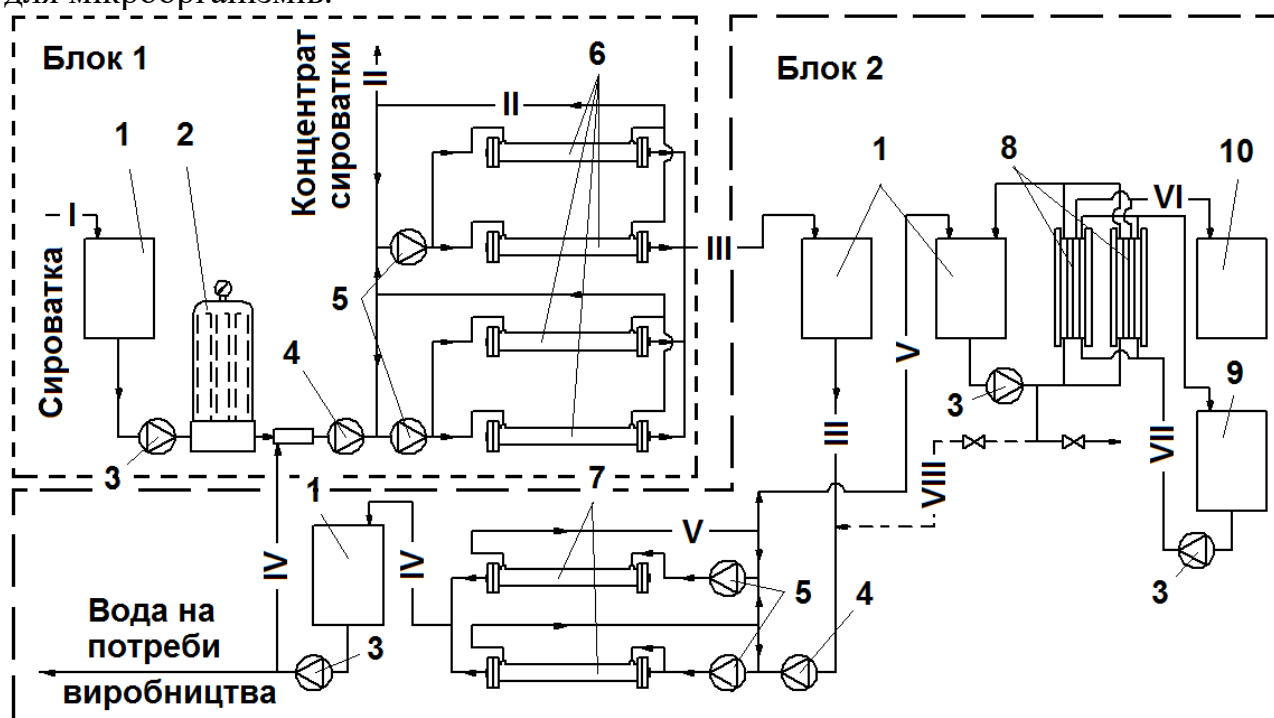


Рис. 27. Апаратно-технологічна схема концентрування молочної сироватки діананофільтрацією із наступною переробкою отриманого пермеату з метою отримання концентратів мінеральних речовин.

1 - буферні ємності; 2 - мікрофільтраційний модуль; 3 - живильні насоси; 4 - насоси високого тиску; 5 - циркуляційні насоси; 6 - нанофільтраційні модулі; 7 - зворотноосмотичні модулі; 8 - електродіалізатор; 9 - ємність для електродного розчину; 10 - ємність для концентрату мінеральних речовин;
 -I- молочна сироватка; -II- концентрат молочної сироватки; -III- (ді)нанофільтраційний пермеат; -IV- зворотноосмотичний пермеат (вода); -V- концентрат (ді)нанофільтраційного пермеату; -VI- концентрат мінеральних речовин; -VII- електродний розчин; -VIII- знесолений розчин із залишками органічних сполук

Розроблено перспективну апаратурно-технологічну схему концентрування очищеного соку бурякоцукрового виробництва (патент України № 118450). Вона передбачає поєднання мембранних процесів з випаровуванням. Отриманий на етапі зворотного осмосу концентрований розчин з вмістом сухих речовин $33\pm 5\%$ подається у випарну установку, де згущується до необхідного вмісту сухих речовин.

ВИСНОВКИ

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми розроблення наукових засад баро- та електромембранних процесів при створенні ресурсоенергоощадних та екологічно безпечних технологій харчових виробництв.

1. На основі виявленого ефекту зменшення проникності лактози крізь зворотноосмотичні мембрани за умов її концентрації в розчині вище 1 %, запропонована гіпотеза, що при більших концентраціях в розчині утворюються нукліди лактози, що обумовлює підвищення селективності мембран по цій речовині в середньому на 20%. Величина концентраційної поляризації в напірних зворотноосмотичних каналах при розділенні нанофільтраційних пермеатів молочної сироватки не повинна перевищувати значення 1,6.

2. Встановлено, що в напірних каналах нанофільтраційних установок відбувається адсорбція білків молочної сироватки на поверхні мембрани. Шар адсорбованих білків створює гідравлічний опір, який майже в 5 разів перевищує опір самої мембрани. Експериментально встановлена нелінійна залежність зміни гідравлічного опору шару осаду (R_f) від тиску. Величина R_f змінюється від $3,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-1}$ до $24,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-1}$ при зміні тисків від 1,0 до 2,5 МПа. Встановлено, що гідравлічний опір концентраційної поляризації ($R_{КП}$) збільшується за лінійним законом при зростанні вмісту сухих речовин у розчині від 6 % до 18 %, що пов'язано зі збільшенням його в'язкості. Враховуючи, що цей шар має комбінований органо-неорганічний склад, хімічна регенерація нанофільтраційних мембран повинна складатись з поетапного застосування лужних та кислотних розчинів. Доцільно використовувати водний розчин гідроксиду натрію з концентрацією в межах 0,5 %, а також водні розчини лимонної, азотної і соляної кислот концентрацією не більше 2 %.

3. Встановлено, що застосування нанофільтрації у технологіях переробки молочної сироватки забезпечує зменшення питомих енерговитрат на концентрування та демінералізацію розчину в межах 20-30 % в порівнянні зі зворотним осмосом. При цьому вміст жирової фази в молочній сироватці перед нанофільтрацією не повинен перевищувати $0,060 \pm 0,005$ % за умов тиску 1,5 МПа.

4. Отримані нові наукові результати стосовно ефективності концентрування цукрових розчинів зворотним осмосом, які полягають в тому що концентрування фільтрованого соку другої сатурації зворотним осмосом при тиску 6 МПа дозволяє досягти вмісту сухих речовин цукрового розчину в межах 33 ± 5 % при селективності мембран по сухим речовинам 99 %.

Встановлено, що залежність між зміною коефіцієнта масовіддачі та втрат напору в напірних каналах при збільшенні лінійної швидкості фільтрованого соку другої сатурації має нелінійний характер. При зміні швидкості в 9 разів, а саме від 0,11 м/с до 1 м/с коефіцієнт масовіддачі збільшується в 20,5 разів (від $4,36 \cdot 10^{-6}$ м/с до $90,10 \cdot 10^{-6}$ м/с), при цьому втрати напору на 1 м довжини каналу зростають майже в 53 рази (від 0,008 МПа/м до 0,423 МПа/м).

5. Аналітичними та експериментальними дослідженнями процесу діананофільтрації молочної сироватки доведено, що динамічний режим додавання води забезпечує мінімальні витрати води на процес. Порівняно з режимом часткового розбавлення в цьому випадку споживається в 1,3 рази менше води при однаковому рівні демінералізації молочної сироватки.

6. Науково обґрунтовано, що процес діананофільтрації молочної сироватки може бути альтернативою електродіалізу. При цьому раціональним є додавання 80 % ($\alpha=0,8$) очищеної води від об'ємного потоку пермеату. Рівень демінералізації молочної сироватки за цих умов знаходиться в межах 60 ± 2 %, а для традиційної нанофільтрації - лише 25 ± 5 %.

7. Підтверджено ефективність модифікування іонообмінних гетерогенних мембран неорганічними наночастинками цирконію для електромембранних процесів. Встановлено, що протиіони функціональних груп, розташованих на поверхні введених наночастинок у транспортних порах, приймають участь у перенесенні іонів, в той час, як агрегати наночастинок, локалізовані у міжгелевих проміжках, слугують бар'єром для проникнення коіонів та органічних сполук до мембрани. У випадку знесолення молочної сироватки зарядова селективність іонообмінних гетерогенних мембран збільшується на третину.

Встановлено особливості механізму модифікування полімерних композиційних та трекових мембран для баромембранних процесів. В цьому випадку наночастинки цирконію зосереджуються на поверхні пор, що призводить до підвищення селективних властивостей мембрани за рахунок утворення вторинної пористості з розмірами пор до 100 нм.

Експериментально встановлено, що зазначені мембрани при розділенні післяспиртової зернової барди та молочної сироватки забруднюються лише на зовнішній поверхні. Селективність мембран по білковим сполукам зазначених розчинів складає 70-90 %.

8. Науково обґрунтовано, що в межах лінійної швидкості потоку молочної сироватки 0,22-0,32 м/с (Re 400-600) в прямокутному каналі висотою 1 мм, досягається максимальна ефективність обробки молочної сироватки нанофільтрацією. При збільшенні числа Рейнольдса ступінь знесолювання розчину знижується, що пов'язано зі зменшенням рівня концентраційної поляризації.

9. Розроблено математичну модель, алгоритм та програмне забезпечення для отримання розподілу концентрації розчинених речовин, горизонтальної та вертикальної швидкості по висоті та довжині напірного каналу баромембранних установок. Отримано профілі концентрацій та швидкостей вздовж прямокутного каналу, обмеженого з двох боків мембраною.

10. Удосконалено методику розрахунку багатоконтурних баромембранних установок безперервної дії та доведено, що для нанофільтраційної установки, призначеної для переробки молочної сироватки, раціонально проектувати два циркуляційних контури, що забезпечує мінімальні експлуатаційні витрати на процес розділення.

11. На основі отриманих результатів наукових досліджень баро- та електромембранних процесів запропоновано:

- апаратурно-технологічну схему комплексної переробки молочної сироватки, яка передбачає отримання концентрату сироватки демінералізованої в межах 25-60 % (патент України № 98270) та переробку утвореного нанофільтраційного пермеату (патенти України № 94238, 107287, 107161), що дозволяє одержувати очищену воду та концентрати мінеральних речовин.

- апаратурно-технологічну схему концентрування очищеного соку бурякоцукрового виробництва зворотним осмосом до вмісту сухих речовин 33 ± 5 % (патент України № 118450).

12. Результати виконаних наукових досліджень впроваджені у виробництво на молокопереробних підприємствах - ПАТ «Дубномолоко» (акт від 11.10.2013 р.), ПАТ «Літинський молокозавод» (акт від 20.11.2013 р.), ПОСП ім. Шевченка (акт від 10.02.2015 р.), ПАТ «Городенківський сирзавод» (акт від 07.02.2018 р.); спиртовому заводу - Червонослобідський МПД ДП «Укрспирт» (акт від 27.04.2015 р.); підприємстві «Logrus» (акт від 15.02.2018 р.), яке спеціалізується на впровадженні сучасних технологій та обладнання на підприємствах харчової промисловості.

Розрахунковий економічний ефект від впровадження результатів наукових досліджень становить 2 млн. 68 тис. грн на рік для молочних підприємств продуктивністю 300 т молока на добу та 1 млн. 94 тис. грн. на рік для спиртового підприємства продуктивністю 3000 дал спирту на добу. Соціальний ефект полягає у зменшенні кількості стічних вод молокопереробних та спиртових підприємств, що зменшує ризики забруднення навколишнього середовища.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Мирончук В. Г. Мембранні процеси в технології комплексної переробки молочної сироватки: монографія / В. Г. Мирончук, Ю. Г. Змієвський. – К.: НУХТ, 2013. – 153 с.

2. Мембранні процеси в технології переробки післяспиртової барди: монографія / В. Г. Мирончук, Г. В. Дейниченко, Л. В. Корнієнко, Ю. Г. Змієвський. – К.: НУХТ, 2016. – 152 с.

Особистий внесок пп. 1-2: аналіз наукових публікацій за темою, проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів та підготовка їх до публікації

Статті, що індексуються міжнародною наукометричною базою даних SCOPUS

3. Experimental study of the effect of high pressure on the efficiency of whey nanofiltration process using an OPMN-P membrane / [V. G. Myronchuk, I. O. Grushevskaya, D. D. Kucheruk, Yu. G. Zmievskii] // Petroleum Chemistry. – 2013. – V. 53. – Is. 7. – P. 439-443.

Особистий внесок: узагальнення результатів, формулювання висновків, підготовка до публікації

4. Zmievskii Yu. G. Membrane treatment of wastewater obtained after the whey processing / Yu. G. Zmievskii, I. I. Kirichuk, V. G. Mironchuk // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2014. – V. 36. – Is. 6. – P. 309-316.

5. Organic-inorganic materials containing nanoparticles of zirconium hydrophosphate for baromembrane separation / [Yu.S. Dzyazko, L.M. Rozhdestvenskaya, Yu.G. Zmievskii et al.] // Nanoscale Research Letters. – 2015. – V. 10. – P. 64-75.

Особистий внесок по пп.4-5: проведення експериментальних досліджень та узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків, підготовка до публікації.

6. Heterogeneous Membranes Modified with Nanoparticles of Inorganic Ion-Exchangers for Whey Demineralization / [Yu. Dzyazko, L. Rozhdestveskaya, Yu. Zmievskii et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2015. – V. 2. – P. 3864–3873.

Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, формулювання висновків.

7. Zmievskii Yu. G. Determination of critical pressure in membrane distillation process / Yu. G. Zmievskii // Petroleum Chemistry. – 2015. – V. 55. – Is. 4. – P. 308-314.

8. Zmievskii Yu.G. Using of direct contact membrane distillation for wastewater treatment obtained after whey processing / Yu.G. Zmievskii, I.I. Kyrychuk, V.G. Mironchuk // Carpathian Journal of Food Science and Technology. – 2016. – V. 8. – Is. 2. – P. 5-10.

Особистий внесок по пп. 7-8: розроблення методики досліджень, проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

9. Organic-inorganic membranes for filtration of corn distillery / [V. G. Myronchuk, Y. S. Dzyazko, Y. G. Zmievskii et al.] // Acta Periodica Technologica. – 2016. – V. 47. – P. 153–165.

Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків.

10. Ozonation of nanofiltration permeate of whey before processing by reverse osmosis / [Y. G. Zmievskii, V. V. Zaharov, V. G. Myronchuk et al.] // Acta Periodica Technologica. – 2017. – V. 48. – P. 315–323.

Особистий внесок: узагальнення отриманих результатів, підготовка до публікації.

11. Organic-Inorganic Materials for Baromembrane Separation / [Y. Zmievskii, L. Rozhdestvenska, Y. Dzyazko et al.] // Nanophysics, Nanomaterials, Interface

Studies, and Applications, 2017. – (NANO 2016. Springer Proceedings in Physics; V. 195). – P. 675–686.

Особистий внесок: узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків.

Статті у виданнях, внесених до переліку фахових

12. Zmievskiy Yu. Determination of nanofiltrated membrane mass transfer resistance after separation of whey / Yu. Zmievskiy, V. Myronchuk, D. Kucheruk // Journal of Food Science and Packaging Technology. – 2012. – V.1. – P. 33-38.

13. Змієвський Ю.Г. Порівняльний аналіз процесів нанофільтрації та зворотного осмосу при розділенні молочної сироватки / Ю.Г. Змієвський, І.І. Киричук, В.Г. Мирончук // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій – 2013. – Вип. 43. – Том. 2. – С. 137-141.

Особистий внесок по пп.12-13: проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків, підготовка до публікації.

14. Киричук І. І. Визначення механізму забруднення нанофільтраційних мембран при розділенні молочної сироватки / І. І. Киричук, В. Г. Мирончук, Ю.Г. Змієвський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв». – 2013. – Вип. 140. – С. 147-152.

Особистий внесок: обговорення отриманих результатів.

15. Змієвський Ю.Г. Аналіз конструктивних особливостей електродіалізаторів / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук // Харчова промисловість. – 2013. – № 14. – С. 107-110.

Особистий внесок: аналіз наукових публікацій, узагальнення даних, підготовка до публікації.

16. Химическая очистка нанофильтрационных мембран после разделения молочной сыворотки / Ю. Г. Змиевский, И. И. Киричук, В. Г. Мирончук, Д. Д. Кучерук // Мембраны и мембранные технологии. – 2014. – Т. 4. – № 2. – С. 149–155.

Особистий внесок: аналіз наукових публікацій, розроблення методики досліджень, проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, підготовка до публікації.

17. Киричук І. І. Визначення коефіцієнту масоперенесення та транспортних параметрів мембран / І. І. Киричук, В. Г. Мирончук, Ю. Г. Змієвський // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2014. – Вип. 45. – Том. 2. – С. 65-71.

18. Kyrychuk I. Treatment of dairy effluent model solutions by nanofiltration and reverse osmosis / I. Kyrychuk, Yu. Zmievskii, V. Myronchuk // Ukrainian Food Journal. – 2014. – V. 3. – № 2. – P. 281-288.

19. Структура та функціональні властивості композиційних мембран для знесолення рідин біогенного походження / [Ю.С. Дзязько, Ю.Г. Змієвський, О.В. Пальчик, та ін.] // Український хімічний журнал. – 2015. – Т.81. – №7. – С. 31-37.

20. Myronchuk V. G. Investigation of ultrafiltration of grain stillage / V. G. Myronchuk, L.V. Kornienko, Yu G. Zmievskii // Ukrainian Food Journal. – 2015. – V. 4. – № 1. – P. 127-133.

Особистий внесок по пп. 17-20: обговорення отриманих результатів та їх узагальнення.

21. Дослідження процесу ультрафільтраційного очищення інвертованого бурякового соку / [О. І. Сизоненко, Ю. Г. Змієвський, І.О. Крапивницька, В. Г. Мирончук] // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. – 2015. – V. 3. – № 6. – С. 67–69.

Особистий внесок: розроблення методики досліджень, проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, підготовка до публікації.

22. Fouling of polymer and organic-inorganic membranes during filtration of corn distillery / [Y. Zmievskii, Y. Dzyazko, V. Myronchuk et al.] // Ukrainian Food Journal. – 2016. – V. 5. – № 4. – P. 739–747.

23. Органо-неорганічні мембранні матеріали для ультрафільтрації біологічних об'єктів / [Л. М. Рождественська, Ю. С. Дзязько, Ю. Г. Змієвський та ін.] // Український хімічний журнал. – 2016. – Т. 82. – № 5. – С. 29–37.

Особистий внесок по пп.22-23: проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів.

24. Змієвський Ю.Г. Дослідження процесу нанофільтрації молочної сироватки / Ю. Г. Змієвський// Наукові праці НУХТ. – 2017. – №2. – С. 123-130.

25. Змієвський Ю. Г. Моделювання процесу діананофільтрації молочної сироватки / Ю. Г. Змієвський // Харчова промисловість.–2017.–Т. 22. – С. 71-78.

Особистий внесок по пп.24-25: аналіз наукових публікацій, проведення експериментальних та аналітичних досліджень, узагальнення отриманих результатів, підготовка до публікації.

Статті у матеріалах конференцій та інших виданнях

26. Zmiyevskiy Yu.G. Determination of limiting current density during desalination of nanofiltration whey permeate by electrodialysis / Yu.G. Zmiyevskiy, I.I. Kyrychuk, L. V. Kornienko // Scientific works University of food technologies, – Plovdiv, Bulgaria, 2013. –V. 60. – P. 226-228.

Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів, підготовка до публікації.

27. Киричук І. І. Мембранні процеси в технології очищення стічної води молочних підприємств / І. І. Киричук, В. Г. Мирончук, Ю. Г. Змієвський // Новітні науково-технічні рішення в харчовій промисловості. – Львів, 2015. – С. 191-194.

Особистий внесок: обговорення отриманих результатів.

28. Zmievskii Y. G. Reverse osmosis for concentration of sugar beet juice after the second carbonation / Y. G. Zmievskii, V. G. Myronchuk // Environmental Protection: from Sorbents to Membranes. – Kiev: ART OK, 2016. – P. 90–93.

29. Whey electrodialysis using organic-inorganic membrans / Yu.G. Zmievskiy, L.M. Rozhdestvenska, V.V. Zakharov at all // Promising materials and processes in technical electrochemistry – Kyiv, KNUTD, 2016. – P. 214-218.

30. Treatment of Permeate Obtained during Whey Nanofiltration / [Y. G. Zmievskii, V. G. Myronchuk, Y. S. Dzyazko та ін.] // Application of Membrane Technologies for Water Reclamation and Whey Desalination in Food Industry. – Izmir, Turkey: Ege University, 2017. – P. 9 -11.

Особистий внесок по пп. 28-30: проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, підготовка до публікації.

31. Киричук І.І. Застосування мембранної фільтрації для очищенні змивних вод молокопереробних підприємств / І.І. Киричук, В. Г. Мирончук, Ю.Г. Змієвський // Молочная индустрия. – 2015. – №1. – С. 10-12.

Особистий внесок: обговорення отриманих результатів.

Тези доповідей

32. Нагорний О.В. Розроблення електродіалізної установки періодичної дії для знесолення молочної сироватки / О.В. Нагорний, А.О. Король, В.О. Літвінець, Ю.Г. Змієвський // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: тези допов. 77-ї наук. конф. молодих учених, асп. і студ., К.: НУХТ, 2011. – С. 41.

33. Ковбень Р.І. Прогресивні процеси переробки молочної сироватки / Р.І. Ковбень, В.Г. Мирончук, Ю.Г. Змієвський // Актуальні проблеми розвитку харч. виробництв, готельного, ресторанного господарств і торгівлі: тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студ., Харків, 2011. – С. 319.

34. Zmievskiy Yu. Whey separation by means of electro dialyser with non circulating concentration cells / Yu. Zmievskiy, V. Myronchuk, D. Kucheruk // Ion transport in organic and inorganic membrane: book of abstracts, Krasnodar, 2012. – P. 271-272.

35. Визначення степені забруднення нанофільтраційних мембран в процесі розділення молочної сироватки / [Ю.Г. Змієвський, І.О. Грушевська, Р.В. Усач та ін.] // Мембранні процеси та обладнання в інноваційних технологіях харчових виробництв: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчен. і студ., К.: НУХТ, 2012. – С. 26-27.

36. Гетьман Є.В. Демінералізація молочної сироватки / Є.В. Гетьман, Ю.Г. Змієвський // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: тези допов. 78-ї наук. конф. молодих учених, асп. і студ., К.: НУХТ, 2012. – Ч.2. С. 59-60.

37. Змієвський Ю. Г. Визначення параметрів електродіалізної обробки стічної води у виробництві молокопродуктів / Ю. Г. Змієвський, І. І. Киричук, В. Г. Мирончук // Актуальні проблеми харчової промисловості: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф., Тернопіль, 2013. – С. 183.

38. Zmiyevskiy Yu. Determination of nanofiltrated membrane mass transfer resistance after separation of whey / Yu. Zmiyevskiy, I. Kyrychuk, V. Myronchuk // Ion transport in organic and inorganic membranes: book of abstracts, Krasnodar, 2013. – P. 308-309.

39. Вивчення процесу регенерації нанофільтраційних мембран після розділення молочної сироватки / І.І. Киричук, Ю.Г. Змієвський, І.В. Шевченко, М.В. Мурашко // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування

людства у ХХІ столітті: тези допов. 79-ї наук. конф. молодих учених, асп. і студ., К.: НУХТ, 2013. – Ч. 2. – С. 104-105.

40. Змієвський Ю.Г. Виділення та концентрування лактози з молочної сироватки мембранними методами / Ю.Г. Змієвський, І.І. Киричук, В.Г. Мирончук // Технічні науки: стан, досягнення і перспективи розвитку м'ясної, олієжирової та молочної галузей: тези доп. II міжнар. наук.-техн. конф., К.: НУХТ, 2013. – С. 80.

41. Змієвський Ю.Г. Зворотний осмос в технології очищення стічної води молочних підприємств / Ю.Г. Змієвський, І.І. Киричук, В.Г. Мирончук // Актуальні проблеми харчової промисловості: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф., Тернопіль, 2013. – С. 181-182.

Особистий внесок по пп. 32-41: проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, підготовка до публікації.

42. Киричук И. И. Очистка сточных вод обратным осмосом после переработки молочной сыворотки / И. И. Киричук, Ю. Г. Змиевский, В. Г. Мирончук // Инновационное развитие малых городов России: научный, технологический и образовательный потенциал: матер. межд. науч.- практ. конф., Мелеуз, 2013. – С. 124-125.

Особистий внесок: обговорення отриманих результатів.

43. Химическая очистка нанофильтрационных мембран после разделения молочной сыворотки / Ю. Г. Змиевский, И. И. Киричук, В. Г. Мирончук, Д. Д. Кучерук // Мембраны-2013: тезисы докл. XII всерос. науч. конф. (с междунар. участием). – Владимир, 2013. – С. 46-47.

Особистий внесок: розроблення методики досліджень, проведення експериментів, узагальнення результатів, підготовка до публікації.

44. Organic-inorganic nanomaterials from ion-exchangers to membranes / [Y. S. Dzyazko, L. N. Ponomaryova, Y. G. Zmievskii et al.] // Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2014): book of abstracts intern. conf., Lviv, 2014 – P. 148.

Особистий внесок: обговорення отриманих результатів.

45. Змієвський Ю.Г. Комплексний підхід до переробки нанофільтраційного пермеату молочної сироватки / Ю.Г. Змієвський, І.І. Киричук, В.Г. Мирончук // Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., К.: НУХТ, 2014. – С. 7.

46. Застосування реверсивного електродіалізу при знесоленні молочної сироватки / [О. Оліферчук, В. Данилевич, М. Мурашко, Ю. Змієвський] // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: тези допов. 80-ї наук. конф. молодих учених, асп. і студ., К.: НУХТ, 2014. – Ч. 2. – С. 128-129.

Особистий внесок по пп. 45-46: проведення експериментів, узагальнення результатів, підготовка до публікації.

47. Киричук І.І. Мембранні процеси в очищенні стічних вод молочних підприємств / І.І. Киричук, В.Г. Мирончук, Ю.Г. Змієвський // Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчової промисловості: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., К.: НУХТ, 2014 р. – С. 221.

48. Киричук І. Вилучення компонентів зі змивних вод молокопереробних підприємств нанофільтрацією / І. Киричук, В. Мирончук, Ю. Змієвський // Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., К.: НУХТ, 2014. – С. 9.

Особистий внесок по пп.47-48: обговорення отриманих результатів.

49. Zmievskii Y. G. Research of process diafiltration of the extract sugar beet / Y. G. Zmievskii, V. G. Myronchuk, A. O. Yershov // Membrane and Sorption processes and technologies: book of abstracts II Ukrainian-Polish scient. conf., Kyiv: NaUKMA, 2015. – P. 251–252.

50. Electromembrane recycling of liquid wastes of dairy industry using organic-inorganic membrane / [Y.S. Dzyazko, L.M. Rozhdestvenskaya, Yu.G. Zmievskii, et al.] // Сучасні проблеми електрохімії: освіта, наука, виробництво: збірн. наук. праць за матер. міжнар. конф., Харків: НТУ «ХПІ», 2015, – С. 196-197.

51. Пащенко Б. С. Дослідження процесу розділення молочної сироватки з використанням мембран МИФІЛ ПС-50 / Б.С. Пащенко, В.В. Захаров, Ю.Г. Змієвський // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: тези допов. 81-ї наук. конф. молодих учених, асп. і студ., К.: НУХТ, 2015. – С. 85.

Особистий внесок по пп. 49-51: проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, підготовка до публікації.

52. Organic-inorganic membranes. Strategy of synthesis and application for treatment of biological liquids / [L.M. Rozhdestvenska, Y. S. Dzyazko, Yu. G. Zmievskii, et al.] // Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology: book of abstract, Kyiv, 2015. – P. 18.

Особистий внесок: обговорення отриманих результатів.

53. Застосування мембранних процесів для переробки післяспиртової барди / [Ю.Г. Змієвський, Л.В. Корнієнко, В.Г. Мирончук та ін.] // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., Харків-Мелітополь, 2015р. – С. 61-62.

54. Отримання очищеної води за умов мембранного розділення біологічних рідин / [Ю.Г. Змієвський, І.І. Киричук, Л.В. Корнієнко та ін.] // Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 2015р. – С.148.

55. Investigation of two-stage whey treatment by nanofiltration and reverse osmosis / [I. Kyrychuk, V. Myronchuk, Y. Zmievskii et al.] // Food Science for Well-being: book of abstracts 8 th Central European Congress on Food 2016, Kiev: NUFT, 2016. – P. 78.

56. Захаров В.В. Застосування модифікованих іоннообмінних мембран за умов електродіалізої обробки молочної сироватки / В. В. Захаров, Ю.Г. Змієвський // Інноваційні технології розвитку у сфері харчових виробництв, готельно-ресторанного бізнесу, економіки та підприємництва: наукові пошуки молоді: тези доп. наук. конф., Харків: ХДУХТ, 2016. – С. 283.

57. Змієвський Ю.Г. Визначення продуктивності в процесі зворотного осмосу соку 2 сатурації перед випарними апаратами / Ю.Г. Змієвський, В.Г.

Мирончук, А.О. Єршов // Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., К.: НУХТ, 2016. – С. 246–247.

58. Дослідження процесу регенерації нанофільтраційних мембран / [Ю. Змієвський, В. Мирончук, О. Муратов та ін.] // Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., К.: НУХТ, 2016. – С. 34.

59. Organic-inorganic ion-exchangers for purification of water after whey processing / [Yu.G. Zmievskii, V.V. Zakharov, Yu.S. Dzyazko, et al] // "Nanotechnology and Nanomaterials" NANO – 2017: book of abstracts V internat. conf., Chernivtsi, Yuriy Fedkovych Chernivtsi national university, 2017. – P. 366.

60. Електродіаліз як спосіб демінералізації молочної сироватки / О.В. Бусигін, В.В. Захаров, В.Г. Мирончук, Ю.Г. Змієвський // Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., Київ: НУХТ, 2017. – С. 25–26.

61. Baromembrane methods for separation of disillery stillage / [Y. G. Zmievskii, Y. S. Dzyazko, V. V. Zaharov et al.] // Scientific Conference of Young Scientists of V.I. Vernadsky IGIC of NAS of Ukraine: book of abstracts, Kyiv, 2017. – P. 23-24.

62. Мирончук В. Г. Концентрування фільтрованого соку другої сатурації зворотним осмосом / В. Г. Мирончук, Ю. Г. Змієвський // Перспективи розвитку цукрової промисловості України: тези доп. наук.-практ. конф., К.: РВЦ НУХТ, 2017. – С. 77–80.

63. Очищення стічних вод молочної промисловості з використанням озонування / В.В. Захаров, Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, І.М. Білецька // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доп. II міжн. наук.-практ. конф., Харків: ХДУХТ, 2017. – С. 51–52.

Особистий внесок по пп.53-63: проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, підготовка до публікації.

Патенти

64. Патент 98270UA на винахід, МПК А23С21/00 А23С9/142 (2012.01). Спосіб виробництва концентрату сироватки / Грушевська І.О., Мирончук В.Г., Кучерук Д.Д., Змієвський Ю.Г.; заявник Національний університет харчових технологій. – № а201105311; заявл. 26.04.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.

65. Патент 107287UA на винахід, МПК С02F 1/44 (2006.01) С02F 1/469 (2006.01) С13К 5/00 (2014.01) Спосіб переробки стічних вод молокопереробних підприємств / Ю. Г. Змієвський, І.І. Киричук, В. Г. Мирончук; заявник Національний університет харчових технологій. – № а 201311342; заявл. 24.09.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. №23.

66. Патент 107161UA на винахід, МПК С02F 1/44 (2006.01) С02F 1/467 (2006.01) С13К 5/00 (2014.01) Спосіб переробки стічних вод, утворених після нанофільтрації молочної сироватки / І. І. Киричук, Ю. Г. Змієвський, В. Г. Мирончук; заявник Національний університет харчових технологій. – № а 201312319; заявл. 21.10.2013; опубл. 25.11.2014, Бюл. №22.

67. Патент 94238UA на корисну модель, МПК С13К 5/00 (2014.01) Спосіб переробки стічних вод молокопереробних підприємств / І. І. Киричук, Ю. Г. Змієвський, В. Г. Мирончук; заявник Національний університет харчових технологій. – № u 2014 03744; заявл. 10.04.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. №21.

68. Патент 99204UA на корисну модель, МПК С12F 3/00 (2015.01). Спосіб переробки післяспиртової зернової барди / Корнієнко Л.В., Змієвський Ю.Г., Мирончук В.Г.; заявник Національний університет харчових технологій. – № u2014 12749; заявл. 27.11.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10.

69. Патент 99203UA на корисну модель, МПК В01D 17/038 (2006.01) В01D 17/09. Спосіб переробки післяспиртової зернової барди / Корнієнко Л.В., Змієвський Ю.Г., Мирончук В.Г.; заявник Національний університет харчових технологій. – № u2014 12748; заявл. 27.11.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10.

70. Патент 110406UA на винахід, МПК С02F 1/44 (2006.01) С13К 5/00. Спосіб переробки стічних вод молокопереробних підприємств / Киричук І.І., Змієвський Ю.Г., Мирончук В.Г.; заявник Національний університет харчових технологій. – № a2014 03741; заявл. 10.04.2014; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.

71. Патент 113724UA на корисну модель, МПК (2006) С02F 1/78 (2006.01). Спосіб очищення стічних вод молокопереробних підприємств / Ю.Г. Змієвський, В.В. Захаров, Л.В. Корнієнко, В.Г. Мирончук; заявник Національний університет харчових технологій. – № u 2016 08502; заявл. 02.08.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

72. Патент 118450UA на корисну модель, МПК С13В20/16 (2006/01). Спосіб концентрування дифузійного соку після 2 сатурації / А.О. Єршов, Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук; заявник Національний університет харчових технологій. заявл. 23.02.2017; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15.

Особистий внесок по пп. 64-72: обговорення ідей, формулювання основних положень нових технічних рішень та їх експериментальна апробація, підготовка матеріалів до публікації.

73. Патент 108886UA на корисну модель, МПК В01D 61/428(2006.01) В01D 71/02, В01D 71/06, С02F 1/469. Спосіб отримання композиційних органічно-неорганічних мембран для знесолення біологічних рідин / Рождественська Л.М., Дзязько Ю.С., Пальчик О.В., Змієвський Ю.Г., Беляков В.М; заявник Інститут загальної та неорганічної хімії НАН України. – № u2015 11134; заявл. 13.11.2015; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.

Особистий внесок по п.73: обговорення ідей та нових технічних рішень, їх експериментальна апробація.

АНОТАЦІЯ

Змієвський Ю.Г. Наукові засади баро- та електромембранних процесів харчових технологій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-практичної проблеми розроблення наукових засад баро- та електромембранних процесів у технологіях харчових виробництв.

Запропоновано гіпотезу селективного розділення лактози на зворотноосмотичних мембранах при її різній концентрації. Науково обґрунтовано раціональні режими та рівень концентраційної поляризації процесу нанофільтрації молочної сироватки. Отримали подальший розвиток теоретичні уявлення процесу формування осаду під час нанофільтрації. Обґрунтовано режими процесу діананофільтрації молочної сироватки. Розкрито механізми масоперенесення в модифікованих іонообмінних та полімерних мембранах, доведено їх ефективність. Показано ефективність зворотного осмосу в технології концентрування цукрових розчинів. Запропоновано апаратурно-технологічні схеми комплексної переробки молочної сироватки та концентрування розчинів цукрового виробництва.

Результати досліджень впроваджені у виробництво на підприємствах молочної та спиртової галузі, а також у навчальному процесі Національного університету харчових технологій.

Ключові слова: електродіаліз, ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос, діафільтрація, харчова промисловість, мембранні процеси.

SUMMARY

Zmievskii Yu. G. Scientific principles of baromembrane and electromembrane processes for food technologies. – Manuscript.

The thesis for obtaining of scientific degree of doctor of technical sciences by specialty 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions. National University of Food Technologies, Kiev, 2018.

This dissertation is devoted to the development of scientific principles of baromembrane and electromembrane processes in the treatment of milk whey, distillery stillage and for sugar production.

On the basis of experimental results an abnormally high lactose permeability was detected through the reverse osmosis membrane at low concentrations of lactose. A hypothesis about the formation of lactose in the solution of nuclides (associates) with increasing concentration was made. Due to the large geometric sizes of these nuclides, the selectivity of the studied membranes by lactose increased by at least 20 %. It has been established that the use of nanofiltration in the processing technologies of milk whey ensures reduction of specific energy consumption for concentration and demineralization of the solution in the range of 20-30 % in comparison with the reverse osmosis. In this case, the fat phase in milk whey before nanofiltration should not exceed $0.060 \pm 0,005$ % under the pressure of 1.5 MPa. It is proved that the adsorption of proteins on the surface of the membrane occurs in the middle of the flat channels of the nanofiltration installations. The layer of adsorbed proteins creates a hydraulic resistance, which is almost 5 times more than resistance of the membrane itself. In present work we've gotten scientifically substantiated rational hydrodynamic regime for separation of milk whey in a rectangular

nanofiltration channel 1 mm high. With an increase of value Reynolds number, the degree of dewatering of the solution decreases, which is associated with a decrease in the concentration polarization. By using the developed mathematical model, the distribution of the concentration of dissolved substances, the horizontal and vertical components of velocity by height and length of the channel for the nanofiltration unit of the milk whey. The combination of the proposed mathematical model with experimental data allowed us to determine the rational level of concentration polarization for this process.

The analysis of the composition of the nanofiltration permeate of milk whey has shown the prospect of its processing in order to obtain purified water and concentrates of minerals, suitable for use in remineralization of drinking water. The rational regimes of the reverse-osmosis for concentrating of the indicated solution are established. The concentrates obtained should be directed to electrodialysis with conforming concentration cameras. This ensures lower energy consumption due to the better electrical conductivity of the solution and smaller capacity of pumping. Low concentrations of calcium and magnesium ions in it make impossible the formation of hardly soluble precipitates on ion exchange membranes, which simplifies the implementation of this process. Electrodialysers with non-protic concentration cameras allowed to obtain solutions containing mineral substances of 140-180 kg/m³, which are suitable for use in the technologies of remineralization of potable water.

New experimental results for treatment (concentrating) of filtered juices from second saturation at sugar production by reverse osmosis were obtained, determined mass-transfer coefficients, depending on the flow rate of the solution. This technology is promising, but requires more detailed technical and economic analysis. The lack of heat-resistant back-axis membranes complicates the introduction of research results into production.

The process of diananofiltration of milk whey is investigated. Under the conditions of experiments, a concentrate with a demineralization level of 62 % was obtained, which is almost 35 % higher than with conventional nanofiltration. Thus, diananofiltration may be an alternative to electrodialysis if, from a technological point of view, the demineralization level within the 60 % range is acceptable.

The efficiency of the modification of ion-exchange heterogeneous membranes by inorganic nanoparticles of zirconium for electromembrane processes is confirmed. It was found that antimony of functional groups located on the surface of nanoparticles introduced in transport pores take part in the transport of ions, while nanoparticle units localized in intergranular spaces serve as a barrier for the penetration of quions and organic compounds to the membrane. In the case of desalting of the milk whey, the charge selectivity of the ion-exchange heterogeneous membranes increases by a third.

The properties of the mechanism of modification of polymer composite and track membranes for baromembrane processes are established. In this case, the zirconium nanoparticles are concentrated on the pore surface, which leads to an increase in the selective properties of the membrane due to the formation of a secondary porosity with pore size of 100 nm.

On the basis of the obtained results, the equipment-technological scheme of the complex processing of milk whey, which involves the production of milk whey concentrate that demineralized within the limits of 25-60 %, and the processing of the formed nanofiltration permeate, which allows to receive purified water and concentrates of mineral substances, is proposed. The equipment-technological scheme of concentration of sugar solutions is proposed, which involves concentration of filtered juice of second saturation with reverse osmosis to the content of dry substances of 33 ± 5 %.

The results of the performed scientific researches were introduced into the production at dairy processing enterprises - PJSC "Dubnomoloko", PJSC "Litinsky dairy factory", POBS them. Shevchenko, PJSC "Gorodenkivsky Cheese Plant"; Alcohol Factory - Chervonoslobodsky MPD of State Enterprise "Ukrspirt"; the company "Logrus", which specializes in the implementation of modern technologies and equipment at food industry enterprises, as well as in the educational process of the National University of Food Technologies.

Key words: electro dialysis, ultrafiltration, nanofiltration, diafiltration, reverse osmosis, food industry, membrane processes.