

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗМІЄВСЬКИЙ ЮРІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК 66.081.6: 637.142.2

**ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОДІАЛІЗУ І МЕМБРАННОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ В
ПРОЦЕСІ ПЕРЕРОБКИ МОЛОЧНОЇ СИРОВАТКИ**

05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та
фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Київ – 2010

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мирончук Валерій Григорович,
Національний університет харчових технологій, м. Київ,
завідувач кафедри технологічного обладнання харчових
виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дейниченко Григорій Вікторович, Харківський
державний університет харчування та торгівлі, м. Харків,
завідувач кафедри устаткування підприємств
харчування

кандидат технічних наук,
Орлюк Юрій Тимофійович, Технологічний інститут
молока і м'яса Української академії аграрних наук,
м. Київ, завідувач відділу сироробства

Захист відбудеться "29" вересня 2010 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 "27" серпня 2010 року.

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



Л.О. Кривопляс-Володіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На підприємствах молочної промисловості при виробництві білково-жирових продуктів (сир кисломолочний, сир твердий, казеїн) близько 90 % від об'єму переробленого молока переходить у молочну сироватку. Можливості останньої як цінної сировини, використовуються не в повній мірі і значна її частина потрапляє в стоки. Це не відповідає існуючим екологічним вимогам та призводить до додаткових витрат на природоохоронні заходи.

З огляду на те, що молочна сироватка містить цілий ряд корисних для організму людини речовин, доцільно створювати умови для раціонального їх використання. Особливу цінність мають сироваткові білки та лактоза, які складають до 85 % сухих речовин молочної сироватки.

Останнім часом для їх виділення та очищення набувають поширення мембранні процеси, а саме електродіаліз та мембранна дистиляція. Аналіз існуючих даних в цьому напрямленні свідчить про те, що електродіаліз і, особливо, мембранна дистиляція в процесі переробки молочної сироватки вивчені недостатньо. Тому потребують спеціальних наукових досліджень.

Отже, виконання досліджень по вивченню та удосконаленню процесів електродіалізу і мембранної дистиляції у технологіях переробки молочної сироватки є актуальним і представляє науковий та практичний інтерес. Використання згаданих процесів в сукупності з іншими мембранними методами дозволяють створити технологію комплексної маловідходної переробки молочної сироватки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планами роботи кафедри технологічного обладнання харчових виробництв та проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій по держбюджетним тематикам «Розроблення технології очищення рідких харчових продуктів і промислових стічних вод мембранними методами» (номер державної реєстрації № 0106U000400, 2006-2008 рр.) та «Розроблення наукових основ очищення сироватки мембранними методами з метою використання отриманих розчинів у харчовій промисловості» (номер державної реєстрації № 0108U011256, 2009-2011 рр.)

Автор особисто прийняв участь у проведенні експериментальних досліджень, розробці лабораторних установок та методик проведення досліджень, обробці, аналізі й узагальненні отриманих результатів.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи було створення науково обґрунтованих передумов для розширення промислового застосування електродіалізу і мембранної дистиляції в процесі переробки молочної сироватки. У відповідності з поставленою метою сформульовані такі задачі:

– дослідження процесу електродіалізу молочної сироватки на фізичних моделях електродіалізаторів, що найкращим чином відтворюють властивості поширених промислових конструкцій; визначення основних їх недоліків; розроблення нового технічного рішення, що дозволяє удосконалити процес електродіалізу;

– дослідження впливу вмісту сухих речовин молочної сироватки, початкової концентрації мінеральних речовин у розсольних камерах, концентрації хлориду натрію та лінійної швидкості розчинів на процес знесолення молочної сироватки електродіалізом при застосуванні запропонованої конструкції електродіалізатора;

– розроблення методу попередньої підготовки молочної сироватки до процесу мембранної дистиляції;

– встановлення залежності коефіцієнту масопередачі та питомої продуктивності від вмісту сухих речовин у молочній сироватці в процесі мембранної дистиляції;

– встановлення раціонального розміщення мембран у полі гравітаційних сил та впливу довжини камер в установках на процес мембранної дистиляції молочної сироватки;

– експериментальне встановлення критичного надлишкового тиску за умови відсутності різниці гідравлічних тисків по різні сторони мембрани, а також критичного перепаду гідравлічних тисків по різні сторони мембрани, при досягненні яких у камерах мембранно-дистиляційних установок пори гідрофобної мембрани заповнюються рідкою фазою і процес мембранної дистиляції припиняється;

– розроблення машино-апаратних схем комплексної переробки молочної сироватки з використанням електродіалізу та мембранної дистиляції.

Об'єктом досліджень є процес мембранного розділення молочної сироватки.

Предметом досліджень є режими, характеристики та обладнання процесу електродіалізу молочної сироватки з послідовно розташованими катіоно- та аніонообмінними мембранами і процесу контактної мембранної дистиляції молочної сироватки.

Наукова новизна одержаних результатів:

– удосконалено процес електродіалізу молочної сироватки шляхом розроблення електродіалізатора, який унеможливує формування важкорозчинного осаду на поверхні іонообмінних мембран;

– встановлено, що раціональним режимом роботи для запропонованого електродіалізатора є поєднання наступних параметрів: вміст сухих речовин молочної сироватки в межах 30 %, лінійна швидкість розчинів у камерах – 0,24 м/с; концентрація розчину хлориду натрію, який використовується як антисолеутворююча речовина, та загальний вміст мінеральних речовин сироватки повинні бути приблизно однаковими, густина струму повинна бути в межах 250А/м²;

– встановлено, що в процесі мембранної дистиляції молочної сироватки коефіцієнт масопередачі k_m та питома продуктивність J гідрофобних мембран МФФК-3 змінюються за лінійним законом: k_m в межах від $6 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-10}$ м/(с·Па) та від $2,3 \cdot 10^{-10}$ до $0,5 \cdot 10^{-10}$ м/(с·Па) при збільшенні вмісту сухих речовин від 5 до 50 % та від 28 до 58 % і різниці температур 35 та 50 °С відповідно; J в межах від 30 до 5 дм³/(м²·год) та від 25 до 5 дм³/(м²·год) при

збільшенні вмісту сухих речовин від 5 до 50 % та від 28 до 58 % і різниці температур 35 та 50 °С відповідно;

- встановлено, що при переробці молочної сироватки мембранно-дистиляційні установки з мембранами МФФК-3 мають максимальну продуктивність при горизонтальному розміщенні мембран у полі гравітаційних сил;

- для мембран МФФК-3 в процесі розділення молочної сироватки мембранною дистиляцією визначено критичний надлишковий тиск при відсутності перепаду гідравлічних тисків по різні сторони мембрани, який складає 0,5 МПа, а також критичну різницю гідравлічних тисків по різні сторони мембрани, яка знаходиться в межах 0,04-0,05 МПа. Перевищення цих параметрів призводить до заповнення пор рідкою фазою, що унеможливорює реалізацію процесу мембранної дистиляції;

Методи досліджень. Основні результати досліджень процесів електродіалізу та мембранної дистиляції отримані за допомогою фізичного моделювання на відповідних експериментальних установках. Контроль та реєстрацію параметрів здійснювали сучасними вимірювальними приладами, а обробку результатів з використанням комп'ютерної техніки. При плануванні експериментів користувались загальновідомими підходами (методом випадкового балансу та методом багатофакторного аналізу). Вплив довжини камери в установках на процес мембранної дистиляції встановлено за допомогою методів математичного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів. До результатів, які мають найбільше практичне значення, належать такі:

- запропоновано нову конструкцію електродіалізатора для демінералізації молочної сироватки (патент на винахід №86529 від 27.04.2009р.);

- запропоновано методику попередньої обробки молочної сироватки перед мембранною дистиляцією;

- зроблені рекомендації, щодо конструктивних особливостей мембранно-дистиляційних установок при застосуванні мембран МФФК-3;

- розробленні машино-апаратні схеми комплексної переробки молочної сироватки з використанням електродіалізу та мембранної дистиляції (патент на винахід № 84384 від 10.10.2008, Бюл. № 19; патенти на корисну модель № 30555 від 25.02.2008, № 43665 від 25.08.2009, Бюл. № 16, № 42578 від 10.07.2009, Бюл. № 13);

- результати досліджень, отримані в дисертаційній роботі, апробовано на ВАТ «Вімм-Білл-Данн Україна», очікуваний економічний ефект від впровадження складає 88 грн. на 1 м³ переробленої молочної сироватки.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні плану проведення досліджень, виконанні обробки та аналізу отриманих результатів, формулюванні загальних висновків та рекомендацій; одержанні експериментальних даних при дослідженні процесів електродіалізу та мембранної дистиляції, участь у дослідженні процесів ультрафільтрації та нанофільтрації; розробленні лабораторної установки та методики досліджень для визначення максимально можливого тиску у камерах мембранно-дистиляційних установок за умови відсутності перепаду гідравлічного тиску;

розробленні методу попередньої обробки ультрафільтраційного пермеату перед мембранною дистиляцією; розробленні наведених у роботі машино-апаратних схем комплексної переробки молочної сироватки.

Аналіз та узагальнення результатів досліджень проведено спільно з науковим керівником 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 2007-2010 рр. (м.Київ); XVIII-XXI наукових конференціях «Мембранні та сорбційні процеси та технології» у Києво-Могилянській академії в 2007-2010 рр. (м.Київ); науково-технічній конференції «Інноваційні технології, проблеми якості і безпеки сировини та готової продукції у м'ясній та молочної промисловості», 2007, (м.Київ); міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка», 2007 (м. Святогірськ); міжнародній конференції «Ионный перенос в органических и неорганических мембранах», 2008 (м.Краснодар); IV міжнародній науково-технічній конференції «Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства их реализации: эффективное использование ресурсов отрасли», 2008, (м.Москва); International conference «Ion transport in organic and inorganic membranes», 2009, (м.Краснодар); XII міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные вопросы совершенствования производства и переработки продукции сельского хозяйства», 2010, (м.Йошкар-Ола).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 22 роботи: 6 статей у фахових виданнях, які входять до переліку ВАК України; 12 тез доповідей; 2 деклараційних патенти України на винахід; 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та 4 додатків. Основний зміст роботи викладено на 151 сторінці, в тому числі містить 47 рисунків і 26 таблиць. Список використаних літературних джерел містить 196 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** на основі порівняльного аналізу процесів знесолення молочної сироватки іонним обміном та електродіалізом зроблено висновок, що застосування останнього більш доцільне. Розглянуто основні закономірності процесу електродіалізу, а також причини і механізм формування важкорозчинного осаду на поверхні іонообмінних мембран. На основі аналізу відомих конструкцій електродіалізаторів, визначені їх основні недоліки.

Зроблений висновок про необхідність додаткових досліджень з метою розроблення нової конструкції, яка б унеможливлювала утворення осаду на поверхні іонообмінних мембран та відрізнялась простотою.

Обґрунтовано доцільність проведення експериментальних досліджень процесу мембранної дистиляції при переробці молочної сироватки. Визначено можливості та області застосування процесу мембранної дистиляції при розділенні рідких харчових середовищ. Зроблено висновок, що вартість такої обробки значно зменшується в разі використання вторинного тепла, яке в достатній кількості наявне на підприємствах (вторинна пара, топкові газы тощо).

У **другому розділі** викладено методи досліджень, описано лабораторні установки та методика математичної обробки експериментальних даних.

В процесі досліджень використовували модельні розчини лактози,

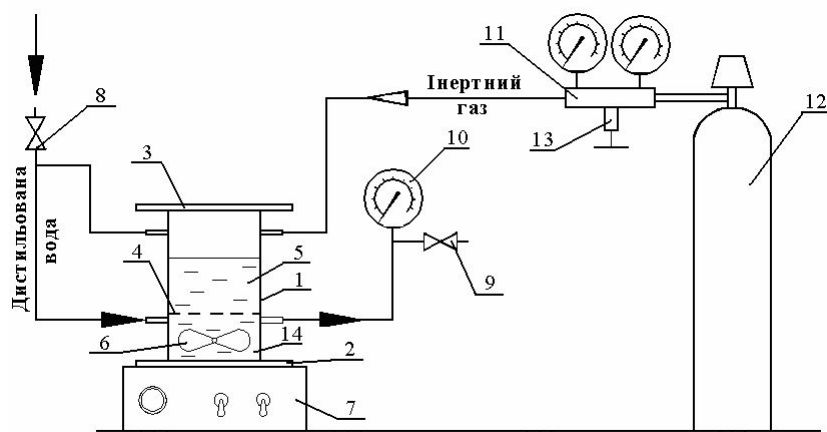


Рис. 1. Принципова схема лабораторної установки для визначення максимального тиску в робочих камерах мембранно-дистиляційних установок:

1 – корпус; 2, 3 – кришки; 4 – мембрана; 5 – робоча рідина (ультрафільтраційний пермеат молочної сироватки); 6 – мішалка; 7 – магнітна мішалка; 8, 9 – шарнірні крани; 10 – манометр; 11 – редуктор; 12 – балон з газом; 13 – вентиль для регулювання тиску; 14 – дистильована вода.

точними камерами концентрування. Ефективна площа кожної мембрани складала $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Процес мембранної дистиляції досліджували на лабораторній установці з мембранною коміркою круглої та прямокутної форми. Ефективна площа мембран складала відповідно $6,64 \cdot 10^{-3}$ та $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Нами розроблена лабораторна установка (рис. 1) та відповідна методика, що дозволяє визначити критичний абсолютний тиск у робочих камерах мембранно-дистиляційних установок за умови відсутності перепаду гідравлічних тисків по обидві сторони мембрани.

молочну сироватку відновлену з сухої, а також отриману при виробництві сиру кисломолочного, ультрафільтраційні пермеати молочної сироватки. Наведені паспортні характеристики іонообмінних МА-40 і МК-40 та гідрофобних мікрофільтраційних МФК-3 мембран, які використовувались у роботі.

Д о с л і д ж е н н я процесу демінералізації молочної сироватки проводили на лабораторній установці з трьома різними схемами електродіалізаторів: проточними та непроточними.

Критичну різницю тисків по різні сторони мембрани визначали за допомогою баромембранної установки непроточного типу, яка відрізняється від зображеної на рис. 1 тим, що має одну камеру і мембрана розміщується на пористій підкладці, встановленій на кришці 2. Остання має канал для відведення пермеату.

При проведенні роботи користувались стандартними та загальноприйнятими методиками визначення складу та властивостей оброблюваних розчинів.

У **третьому розділі** наведено основні результати досліджень процесу електродіалізу молочної сироватки.

Оскільки молочна сироватка є провідником другого роду, електричний струм крізь неї переноситься за допомогою іонів. Збільшення різниці електричних потенціалів між електродами приводить до інтенсифікації масоперенесення крізь мембрану. Різниця між швидкістю міграції іонів у розчині і безпосередньо в мембрані викликає так зване явище концентраційної поляризації. У цьому випадку, концентрація іонів мінеральних речовин у граничних шарах прямує до нуля, що спричиняє інтенсивне перенесення електричного струму іонами H^+ та OH^- , які утворюються внаслідок дисоціації молекул води. Це призводить до зниження ефективності використання

електричного струму і роботи електродіалізатора в цілому. Тому накладаються певні обмеження на максимально можливу густину струму під час електродіалізу молочної сироватки. З рис. 2 видно, що найбільша швидкість демінералізації молочної сироватки спостерігається при 250 A/m^2 . За цих умов коефіцієнт масопередачі теж досягає максимальних значень, а саме $21 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$. Далі інтенсифікувати процес, шляхом збільшення рушійної сили недоцільно внаслідок зазначених негативних явищ і зменшення швидкості знесолення. Встановлено, що внаслідок застосування традиційних конструкцій електродіалізаторів досить

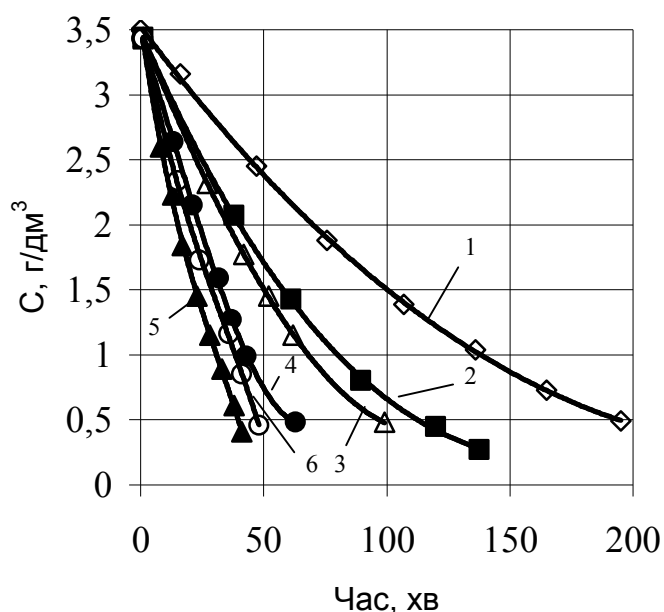


Рис. 2. Залежність зміни вмісту мінеральних речовин від тривалості процесу електродіалізу молочної сироватки при різних густинах струму:
 1 – 50 A/m^2 ; 2 – 100 ; 3 – 150 ; 4 – 200 ;
 5 – 250 ; 6 – 300 .

швидко утворюється важкорозчинний осад на поверхні іонообмінних мембран з боку камер концентрування. Отримані результати показують (рис. 3), що це явище призводить до підвищення питомих витрат енергії у 1,5-3 рази при одночасному зменшенні коефіцієнту масопередачі та продуктивності мембран на 20-30 %.

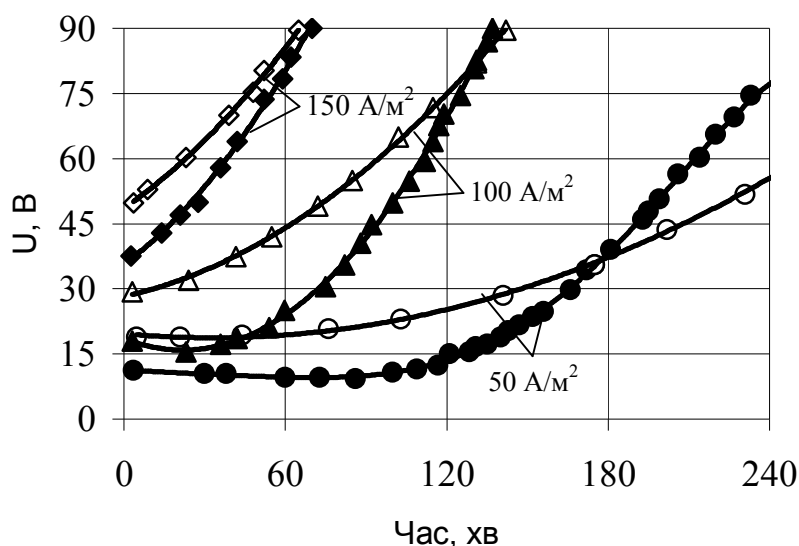


Рис. 3. Залежність напруги від тривалості процесу електродіалізу молочної сироватки при різній густині струму:

◆, ▲, ● – нові мембрани; ◇, △, ○ – забруднені мембрани.

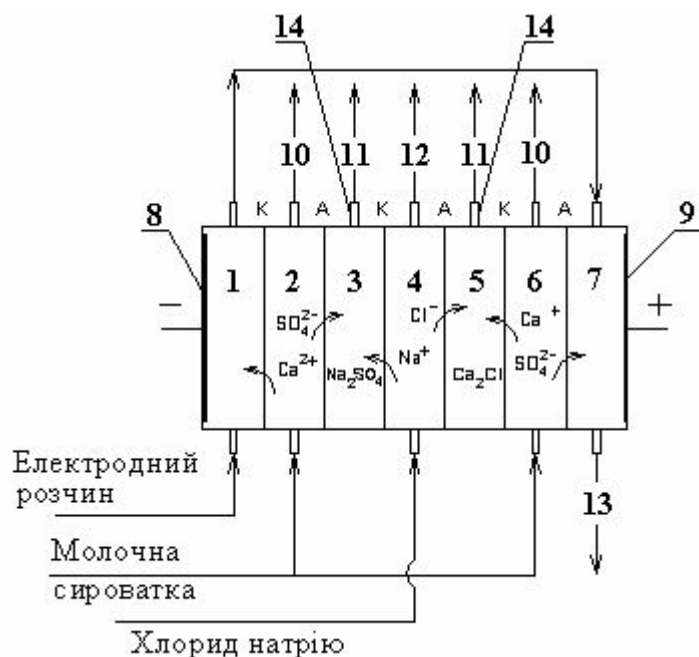


Рис. 4. Принципова схема запропонованої конструкції електродіалізатора:

1, 7 – електродні камери; 2, 4, 6 – ділюатні камери; 3, 5 – розсольні камери; 8 – катод; 9 – анод; 10 – демінералізована сироватка; 11 – концентрат (розсол); 12 – розчин хлориду натрію (NaCl); 13 – електродний розчин; 14 – штуцери, через які витікає концентрат (розсол); К – катіонітова мембрана; А – аніонітова мембрана.

Мінеральні речовини молочної сироватки можна використовувати для балансування іонного складу природних мінеральних вод. Тому доцільно на стадії електродіалізу отримувати їх у вигляді концентрованого розчину. Для цього застосовують електродіалізатори з непроточними камерами, так звані електродіалізатори-концентратори. В результаті утворюється розчин з вмістом мінеральних речовин молочної сироватки 80-120 г/дм³. Однак, в цьому випадку необхідно видаляти солі жорсткості іонним обміном, адже така конструкція ще більше сприяє формуванню осаду.

Узагальнюючи отримані результати, а також раніше накопичений досвід, запропоновано нову конструкцію електродіалізатора (рис. 4) (патент на винахід № 86529 від 27.04.2009р.).

Вона відрізняється від типової тим, що між двома ділюатними камерами, через які циркулює молочна сироватка, розміщені дві непроточні

точні розсолні камери і одна проточна диліатна камера, через яку циркулює розчин хлориду натрію. Це дозволяє розділити сполуки, які схильні утворювати важкорозчинний осад, у різних камерах, унеможливаючи утворення осаду на поверхні мембран. За допомогою такої конструкції можна отримувати розчин мінеральних речовин молочної сироватки з концентрацією $80-120 \text{ г/дм}^3$, який може бути використаний в процесі комплексної переробки молочної сироватки мембранними методами, а також для балансування іонного складу природних мінеральних вод.

Експериментальні дані демінералізації молочної сироватки на запропонованій конструкції електродіалізатора представлені на рис. 5 та 6. Попередні дослідження показали, що після 1-1,5 години роботи установки відомих конструкцій, осад заповнює всю поверхню аніонообмінних мембран, що вимагає підвищувати напругу між електродами. Проте, щоб підтримувати густину струму на одному рівні, різницю потенціалів також необхідно збільшувати внаслідок видалення мінеральних речовин. Тому для того, щоб не враховувати різку зміну електропровідності молочної сироватки (через 3-4 год роботи), останню було сконцентровано до вмісту сухих речовин 30 % (вміст мінеральних речовин в еквівалентному перерахунку на NaCl $13,9 \text{ г/дм}^3$), а об'єм розчину хлориду натрію з концентрацією 6 г/дм^3 взяли у 10 разів більше. Згущену сироватку протягом 7 годин демінералізували за допомогою запропонованого електродіалізатора. Густину струму під час експерименту підтримували на рівні 100 А/м^2 , шляхом зміни напруги між електродами.

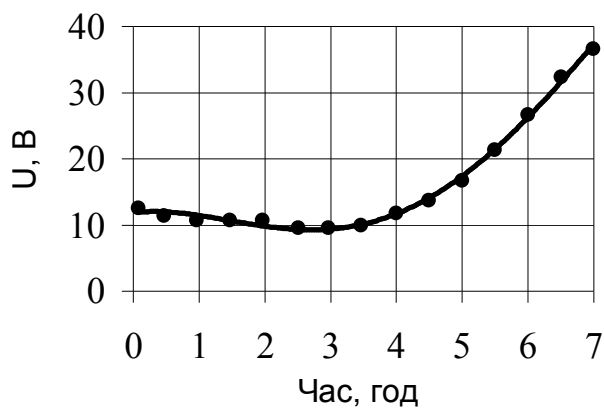


Рис. 5. Зміна напруги в залежності від тривалості процесу електродіалізу молочної сироватки з початковим вмістом сухих речовин 30 % (при застосуванні запропонованої конструкції).

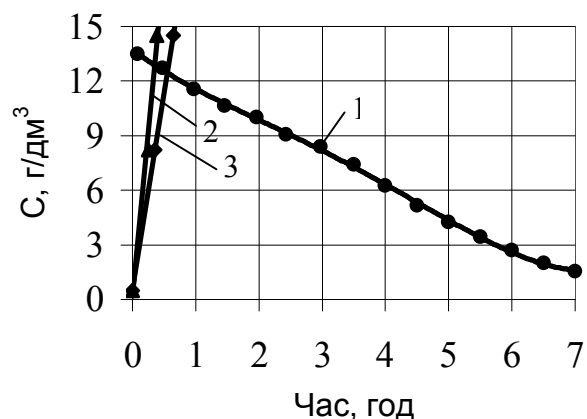


Рис. 6. Зміна вмісту мінеральних речовин в залежності від тривалості процесу:
1 – молочна сироватка з початковим вмістом сухих речовин 30 %; 2, 3 – концентрація електроліту у непроточних камерах концентрування.

З рис. 5 та 6 видно, що напругу почали збільшувати в момент, коли електропровідності молочної сироватки та розчину хлориду натрію вирівнялись. За рахунок меншого об'єму, знесолення молочної сироватки більш інтенсивне і зміна напруги пояснюється лише пропорційним видаленням з неї мінеральних речовин.

Отримані результати вказують на відсутність важкорозчинного осаду на поверхні іонообмінних мембран, що спостерігали після розбирання електродіалізатора. Концентрація електроліту в розсольних камерах 3 і 5 (див. рис. 4) досягла відповідно 86,9 і 111,4 г/дм³. Різниця концентрацій пояснюється різним числом гідратації іонів, що концентруються у відповідних камерах.

За допомогою методу випадкового балансу були сплановані та реалізовані експерименти, які дозволили встановити, що за значимістю по впливу на питомі витрати енергії фактори розташовуються у наступній послідовності: вміст сухих речовин, початковий вміст мінеральних речовин у розсольних камерах, концентрація розчину хлориду натрію, лінійна швидкість молочної сироватки та хлориду натрію над поверхнею мембрани, лінійна швидкість розчину в електродних камерах. Встановлено, що на коефіцієнт масопередачі в даному випадку переважно впливає концентрація мінеральних речовин та густина струму.

Реалізація трьохфакторного експерименту дозволила визначити раціональні режими роботи установки: лінійна швидкість молочної сироватки та розчину хлориду натрію повинна бути в межах 0,24 м/с, концентрація розчину хлориду натрію, який використовується як антисолеутворююча речовина, та загальний вміст мінеральних речовин сироватки повинні бути приблизно однаковими.

Порівняння (табл. 1) нової та відомих конструкцій електродіалізаторів показує, що запропонований варіант має нижчі питомі витрати енергії W у 1,03-2,8 рази, а швидкість перенесення j солей через іонообмінні мембрани, коефіцієнт ефективного використання струму («вихід струму») η , коефіцієнт масопередачі k у 1,15-1,52; 1,15-1,53 та 2,77-2,86 рази відповідно вищі.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика розглянутих конструкцій електродіалізаторів

Показники	Традиційний електродіалізатор		Електродіалізатор з непроточними камерами концентрування	Запропонований електродіалізатор
W , кВт·год/кг	3,71*	6,3**	10,1	3,61
j , г/(м ² ·год)	270*	250**	204	311
η , %	72*	67**	54	83
$k \cdot 10^6$, м/с	7,6*	5,6**	7,36	21,1

Примітка. * нові мембрани; ** мембрани, після 5 год роботи і регенерації у соляній кислоті 1% протягом 48 годин.

Дослідна установка з ефективною площею кожної із мембран 0,1 м², була апробована на виробничих продуктах заводу ВАТ «Вімм-Білл-Данн Україна». Отримані результати підтвердили відсутність важкорозчинних сполук в камерах концентрування, а молочна сироватка оброблена в такій установці має характеристики, що розширюють сферу її застосування.

У **четвертому розділі** наведено основні результати досліджень процесу мембранної дистиляції молочної сироватки.

На основі апріорної інформації для дослідження процесу мембранної дистиляції обрано мікрофільтраційні гідрофобні мембрани марки МФФК-3. Встановлено, що в процесі мембранної дистиляції їх селективність $\phi > 0,99$, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,034$ Вт/(м·К). Порівняння отриманих результатів добре корелюються з даними інших дослідників.

Експериментально встановлено, що зміна об'ємної швидкості потоку в «гарячій» камері впливає на питому продуктивність мембран МФФК-3 у 3,3 рази більше, ніж зміна відповідного показника у «холодній» камері (рис. 7).

При концентруванні модельних розчинів лактози, питома продуктивність залишається практично постійною до вмісту сухих речовин 35-40 % і знижується від 21 до 15 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ при різниці температур 32 ± 2 °С. Подальше проведення процесу мембранної дистиляції супроводжується різким зниженням питомої продуктивності до значення 3,5-4 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$. Це пояснюється підвищенням в'язкості розчину, а також частковою кристалізацією лактози на поверхні мембрани внаслідок теплової поляризації.

Концентрування ультрафільтраційних пермеатів молочної сироватки мембранною дистиляцією проводили при температурі 60 та 75 °С. За таких умов відбувається коагуляція залишків білкових сполук та їх об'єднання у великі комплекси, які забруднюють мембрани і знижують продуктивність. Результати досліджень зі зміною рН у діапазоні 3,0-6,8, витримкою протягом 20 хв при температурі 60 °С та наступним фільтруванням показали, що

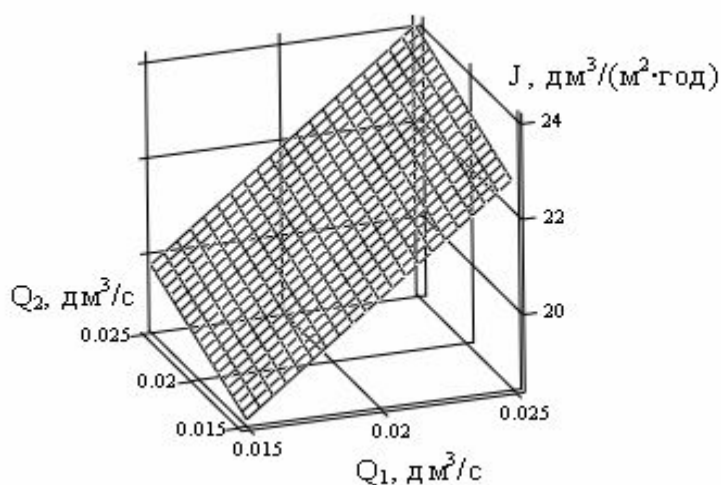


Рис. 7. Вплив об'ємної швидкості робочих потоків (дистильованої води) на питому продуктивність мембрани МФФК-3 при мембранній дистиляції,
 $T_1 = T_h = 60$ °С, $T_2 = T_c = 25$ °С.

найкраще очищення проходить при рН 5,0, але штучне регулювання активної кислотності підвищує вміст хімічних сполук у розчині та зростає вартість кінцевого продукту. Отримані результати при нагріванні, вистояванні та фільтруванні ультрафільтраційних пермеатів (без зміни рН) дозволяють рекомендувати такий спосіб підготовки перед мембранною дистиляцією.

Експериментально встановлено, що за умов експерименту продуктивність плоско-паралельних мембран-

но-дистиляційних установок буде більшою при горизонтальному розміщенні мембран у полі гравітаційних сил.

Як видно з рис.8, при кількості сухих речовин 5 % питома продуктивність мембрани МФФК-3 при розміщенні гарячої камери знизу на 7,5 % вища, ніж за її розміщення зверху (лінія 1 та 2). При згущенні така розбіжність зменшується і при досягненні 35-38 % сухих речовин нею можна нехтувати.

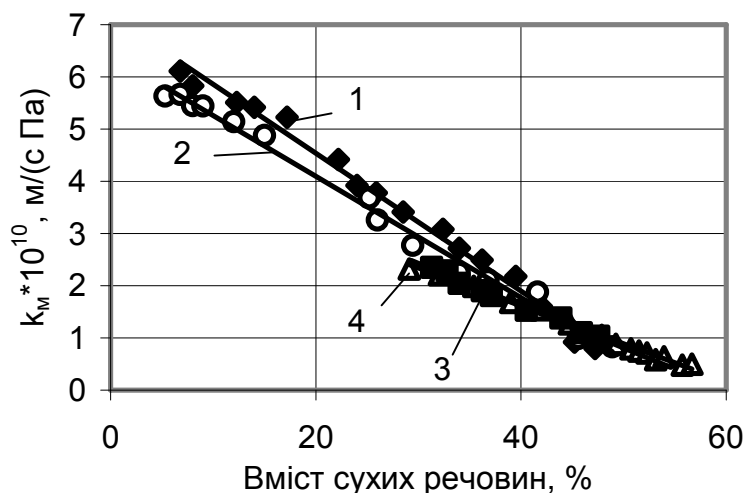


Рис. 8. Зміна коефіцієнту масопередачі при мембранній дистиляції молочної сироватки в залежності від вмісту сухих речовин за горизонтального розміщення мембранної комірки:

1 – гаряча камера знизу; 2 – гаряча камера зверху, $T_h=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – гаряча камера знизу, $T_h=75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – гаряча камера знизу, $T_h=75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

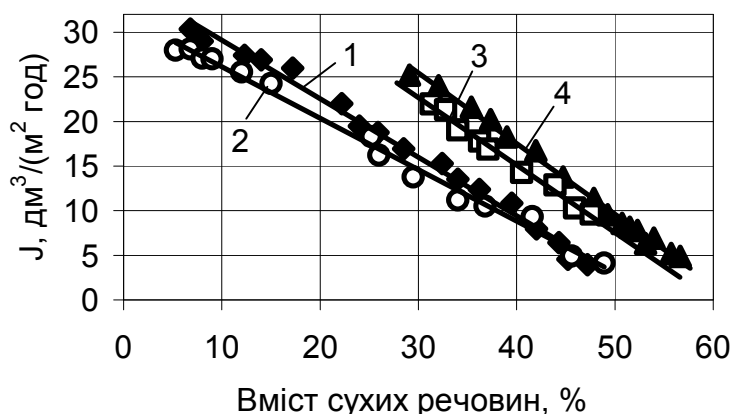


Рис. 9. Зміна питомої продуктивності мембран МФФК-3 при мембранній дистиляції молочної сироватки в залежності від вмісту сухих речовин за горизонтального розміщення мембранної комірки:

1 – гаряча камера знизу; 2 – гаряча камера зверху, $T_h=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – гаряча камера знизу, $T_h=75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – гаряча камера знизу, $T_h=75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

температур $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_h=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) та $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_h=75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) відповідно.

Експериментально встановлено, що критична різниця гідравлічних тисків, при якій пори гідрофобної мембрани МФФК-3 починають

За традиційних технологій молочну сироватку, після згущення у вакуум-випарних установках до вмісту сухих речовин 50-55 % при температурі $55\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$, підігрівають до $75\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для повного розчинення лактози перед її кристалізацією.

Зважаючи на вище зазначене нами проведено концентрування молочної сироватки в діапазоні вмісту сухих речовин 30-58 % при температурі в «гарячій» камері $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ та різниці температур $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (лінія 3) та $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (лінія 4) (рис. 8-9). Встановлено, що в процесі мембранної дистиляції молочної сироватки коефіцієнт масопередачі k_m та питома продуктивність J гідрофобних мембран МФФК-3 змінюється за лінійним законом: k_m в межах від $6\cdot 10^{-10}$ до $1\cdot 10^{-10}$ м/(с·Па), а також від $2,3\cdot 10^{-10}$ до $0,5\cdot 10^{-10}$ м/(с·Па) при збільшенні вмісту сухих речовин від 5 до 50 % та від 28 до 58 % і різниці температур $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_h=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) та $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_h=75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) відповідно; J в межах від 30 до 5 $\text{dm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{год})$ та від 25 до 5 $\text{dm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{год})$ при збільшенні вмісту сухих речовин від 5 до 50 % та від 28 до 58 % і різниці

заповнюватись рідиною знаходиться в межах 0,04-0,05 МПа, а за умови однакового тиску з обох сторін мембрани його абсолютне значення у камері може досягати 0,5 МПа. Отримані дані та розрахунок втрат напору по довжині робочої камери, дозволили зробити висновок, про доцільність створення установок з прямотечею розчинів.

Для визначення раціональної довжини робочих камер в установках для мембранної дистиляції була складена і розв'язана система лінійних рівнянь, що базувалась на принципах коміркової моделі. Тобто камера була розділена на зони, так звані комірки, в межах кожної приймалась модель ідеального перемішування. Кінцеві параметри i -ї були початковими даними для наступної $i+1$ комірки. Таким чином, встановлено, що продуктивність установки з однаковою площею мембран, але різною довжиною камер відрізняється. Якщо порівняти продуктивність установки з однаковою площею мембран і довжиною камер 0,4 м та 1 м, то у першому випадку вона буде більше приблизно на 20 %.

У п'ятому розділі показані недоліки відомої схеми обробки молочної сироватки з використанням мембранних методів і необхідність її удосконалення.

Запропоновано три машино-апаратні схеми для комплексної переробки молочної сироватки з використанням електродіалізу та мембранної дистиляції. Одна з яких представлена на рис. 10.

Молочну сироватку з резервуара 1 насосом 2 подають на мікрофільтр 3, де видаляють залишки молочного жиру та казеїнового пилу. Освітлену сироватку після нагрівання у теплообміннику 5 до температури 52 ± 2 °C подають на ультрафільтраційну установку 6, де відділяють сироваткові білки. Отриманий концентрат з вмістом сухих речовин 18-24 % йде на подальшу переробку, а пермеат згущують за допомогою нанофільтраційної установки 7. Частково знесолений розчин (демінералізація до 35 %) з вмістом сухих речовин 18-20 % подають на електродіалізну обробку 8. Рівень демінералізації найчастіше знаходиться в межах 50-90 %. Отриманий розчин згущують до вмісту сухих речовин 50-55 % на мембранно-дистиляційній установці 9.

Інша схема відрізняється від описаної тим, що отриманий на стадії електродіалізу концентрований розчин електроліту надходить в «холодну» (приймаючу) камеру мембранно-дистиляційної установки, що дозволяє збільшити її продуктивність приблизно на 5 % та утилізувати до 50 % утворених стічних вод.

Також запропоновано машино-апаратну схему, яка передбачає обробку знежиреної молочної сироватки ультрафільтрацією. Пермеат підігрівають до температури 60 °C вторинною парою з вакуум-випарних установок і концентрують на мембранно-дистиляційній установці до вмісту сухих речовин 25-30 %. Далі розчин після охолодження знесолюють електродіалізом, а потім згущують у вакуум-випарній установці до масової частки сухих речовин 50-60 %.

Отримані концентровані розчини можна подавати на кристалізацію лактози, сушіння, використовувати у технологіях отримання лактулози та інших похідних лактози тощо.

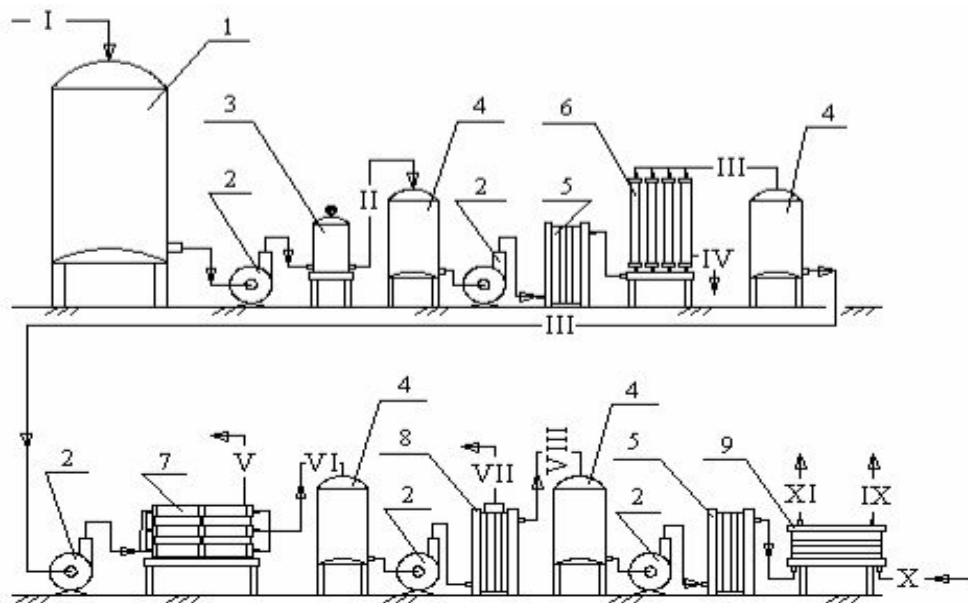


Рис. 10. Принципова машино-апаратурна схема комплексної переробки молочної сироватки мембранними методами:

1 – резервуар для молочної сироватки; 2 – насоси; 3 – мікрофільтр; 4 – буферні ємності; 5 – теплообмінні апарати; 6 – ультрафільтр; 7 – нанофільтр; 8 – електродіалізатор; 9 – мембранний дистилятор.

–I– молочна сироватка; –II– знежирена молочна сироватка; –III– пермеат, після ультрафільтрації; –IV– концентрат сироваткових білків; –V– пермеат, після нанофільтрації; –VI– концентрат, після нанофільтрації; –VII– концентрат, мінеральних речовин; –VIII– демінералізований розчин лактози; –IX– концентрований розчин лактози; –X– холодна вода; –XI– відпрацьована вода, що йде на охолодження.

Застосування запропонованих машино-апаратурних схем дозволяє повністю використовувати компоненти молока після виробництва різних білково-жирових продуктів шляхом переробки молочної сироватки. Отримані концентрати сироваткових білків та лактози можуть широко застосовуватись у харчовій та фармацевтичній промисловості.

ВИСНОВКИ

1. Результати аналізу наукових публікацій та проведених досліджень свідчать, що застосування процесів електродіалізу та мембранної дистиляції при комплексній переробці молочної сироватки мають вагомі переваги в порівнянні з існуючими методами. Так, на видалення мінеральних речовин електродіалізом витрачається майже у 2,8 рази менше енергії та утворюється у 3 рази менше стічних вод, ніж на іонний обмін; на етапі мембранної дистиляції можна використовувати тепло, яке на підприємствах до сьогодні утилізується не повністю.

2. Встановлено, що утворені важкорозчинні сполуки кальцію на поверхні іонообмінних мембран при демінералізації молочної сироватки в існуючих конструкціях електродіалізаторів знижують коефіцієнт масопередачі та

продуктивність установки в середньому на 20-30 % та збільшують питомі енерговитрати у 1,5-3 рази в залежності від густини струму. Запропоновано нову конструкцію електродіалізатора (патент на винахід № 86529, від 27.04.2009р.), яка унеможливує утворення важкорозчинного осаду на поверхні іонообмінних мембран шляхом використання розчину хлориду натрію в якості антисолеутворюючої речовини. Рациональним режимом роботи для запропонованого електродіалізатора є поєднання наступних параметрів: вміст сухих речовин молочної сироватки в межах 30 %, лінійна швидкість розчинів у камерах – 0,24 м/с; концентрація розчину хлориду натрію, який використовується як антисолеутворююча речовина, та загальний вміст мінеральних речовин сироватки повинні бути приблизно однаковими, густина струму в межах 250 А/м².

3. Експериментально доведено доцільність використання мембранної дистиляції для концентрування лактози як кінцевого процесу в комплексній переробці молочної сироватки. Визначено основні характеристики мембран МФФК-3: селективність $\phi > 0,99$, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,034$ Вт/(м·К).

4. Встановлено, що в процесі мембранної дистиляції молочної сироватки коефіцієнт масопередачі k_m та питома продуктивність J гідрофобних мембран МФФК-3 змінюються за лінійним законом: k_m в межах від $6 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-10}$ м/(с·Па) та від $2,3 \cdot 10^{-10}$ до $0,5 \cdot 10^{-10}$ м/(с·Па) при збільшенні вмісту сухих речовин від 5 до 50 % та від 28 до 58 % і різниці температур 35 та 50 °С відповідно; J в межах від 30 до 5 дм³/(м²·год) та від 25 до 5 дм³/(м²·год) при збільшенні вмісту сухих речовин від 5 до 50 % та від 28 до 58 % і різниці температур 35 та 50 °С відповідно;

5. З метою зменшення забруднення мембран залишками білкових речовин в процесі мембранної дистиляції запропоновано попередньо нагрівати ультрафільтраційний пермеат молочної сироватки до 60 °С з наступним вистоюванням протягом 20 хв та фільтруванням на механічному фільтрі. На заключному етапі концентрування мембранною дистиляцією молочної сироватки температуру останньої доцільно підвищувати з 60 °С до 75 °С, що забезпечує отримання розчину з вмістом сухих речовин 50-55 %, зменшує час обробки.

6. Експериментально встановлено, що при переробці молочної сироватки мембранно-дистиляційні установки з мембранами МФФК-3 мають максимальну продуктивність при горизонтальному розміщенні мембран у полі гравітаційних сил; критична різниця гідравлічних тисків по різні сторони мембрани МФФК-3 знаходиться в межах 0,04-0,05 МПа, а за умови однакового тиску з обох сторін мембрани його надлишкове значення у камерах може дорівнювати 0,5 МПа; при досягненні зазначених тисків пори мембрани МФФК-3 заповнюються рідкою фазою і процес мембранної дистиляції припиняється.

7. Збільшення довжини робочих камер у мембранно-дистиляційних установках зменшує ефективність використання всієї площі мембран, що пов'язано з температурною поляризацією. Наприклад, установка з довжиною камер 1 м, у порівнянні з установкою, довжина камер якої 0,4 м, потребує

збільшення площі мембран приблизно на 20 % для забезпечення однакової продуктивності. На основі отриманих результатів запропоновано алгоритм розрахунку необхідної площі мембран з врахуванням довжини камери та температурної поляризації.

8. Запропоновано машино-апаратні схеми, які захищені патентами України (патент на винахід № 84384 від 10.10.2008, Бюл. №19; патенти на корисну модель № 30555 від 25.02.2008, № 43665 від 25.08.2009, Бюл. № 16, № 42578 від 10.07.2009, Бюл. № 13), для комплексної переробки молочної сироватки з використанням електродіалізу та мембранної дистиляції.

9. Результати досліджень пройшли промислову апробацію на ВАТ «Вімм-Білль-Данн Україна», очікуваний економічний ефект від впровадження складає 88 грн. на 1 м³ переробленої молочної сироватки.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових журналах:

1. Українець А.І. Дослідження процесу нанофільтрації при комплексній переробці молочної сироватки / А.І. Українець, В.Г. Мирончук, Ю.Г. Змієвський // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – 2007. – №1 (107). – С. 466-471.

2. Українець А.І. Процес нанофільтрації молочної сироватки / А.І. Українець, В.Г. Мирончук, Ю.Г. Змієвський // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць. – Донецьк, – 2007. – Вип. 17. – Т.1. – С. 138-142.

Особистий внесок дисертанта по пп. 1-2: участь у проведенні експериментів, обробка результатів, підготовка матеріалів до публікації.

3. Змієвський Ю.Г. Вплив осадоутворення на ефективність процесу демінералізації молочної сироватки електродіалізом / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, Д.Д. Кучерук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – 2008. – №2 (120). – С. 140-146.

Особистий внесок дисертанта по п. 3: постановка мети роботи, проведення експериментів та обробка отриманих результатів, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

4. Змієвський Ю.Г. Удосконалення процесу електродіалізу молочної сироватки / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, Д.Д. Кучерук // Наукові праці Одеської нац. акад. харчових технологій. – 2008. – Вип. 32. – С.238-241.

Особистий внесок дисертанта по п.4: експериментальне підтвердження працездатності нової конструкції електродіалізатора, обробка отриманих результатів, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

5. Змієвський Ю.Г. Концентрування лактози при комплексній переробці молочної сироватки мембранними методами / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, Д.Д. Кучерук // Харчова і переробна промисловість. – 2009. – № 9-10 (356-357). – С.21-24.

Особистий внесок дисертанта по п. 5: проведення експериментальних досліджень процесів електродіалізу та мембранної дистиляції, участь у дослідженнях процесу ультрафільтрації, узагальнення результатів та

розробка машинно-апаратної схеми комплексної переробки молочної сироватки, підготовка матеріалів до публікації.

6.Змієвський Ю.Г. Визначення основних характеристик гідрофобної мікрофільтраційної мембрани марки МФФК-3 при мембранній дистиляції / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, Д.Д. Кучерук // Харчова промисловість. – 2010. – № 9. – С. 90-94.

Особистий внесок дисертанта по п. 6: постановка мети роботи, проведення експериментальних досліджень, обробка отриманих даних, узагальнення результатів та формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

Тези і матеріали наукових конференцій:

7.Украинец А.И. Баромембранные процессы при переработке молочной сыворотки / А.И. Украинец, В.Г. Мирончук, Ю.Г. Змиевский // Мембранные и сорбционные процессы и технологии: междунар. науч. конф., 5-7 марта 2007 г.: тезисы докл. – К., 2007. – С. 41.

Особистий внесок дисертанта по п. 7: участь у проведенні експериментів, обробка результатів, аналіз результатів, підготовка матеріалів до друку.

8.Змієвський Ю.Г. Електродіалізна установка для демінералізації молочної сироватки // Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, А.І. Українець // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: 73-я наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 23-24 квіт. 2007 р.: програма і матеріали. – К., 2007.– Ч.ІІ.– С 47.

Особистий внесок дисертанта по п.8: опис установки, отримання експериментальних даних, обробка результатів, аналіз результатів, підготовка матеріалів до друку.

9.Змієвський Ю.Г. Демінералізація молочної сироватки за допомогою електродіалізу / Ю.Г. Змієвський, А.І. Українець, В.Г. Мирончук // Інноваційні технології, проблеми якості і безпеки сировини та готової продукції у м'ясній та молочної промисловості: міжнар. наук.-технічна конф., 27-28 лист. 2007 р.: тези доп. – К., 2007. – С. 5-6.

10.Змієвський Ю.Г. Особливості планування експериментів при дослідженні електродіалізу молочної сироватки / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук // Мембранні та сорбційні процеси і технології: ХІХ укр. семінар, 20-21 бер. 2008 р.: тези доп. – К., 2008. – С. 32.

11.Змієвський Ю.Г. Вплив густини струму на швидкість демінералізації молочної сироватки методом електродіалізу / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, Д.Д. Кучерук // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: 74-а наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 21-22 квіт. 2008 р.: програма і матеріали. – К., 2008. – С. 245-246.

Особистий внесок дисертанта по пп. 9-11: планування та проведення експериментів, обробка та аналіз отриманих даних, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

12.Змиевский Ю.Г. Разработка эффективной технологической схемы получения концентрата лактозы мембранными методами / Ю.Г. Змиевский,

В.Г. Мирончук, И.О. Грушевская // Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства их реализации: эффективное использование ресурсов отрасли: VI науч.-техн. конф., 18-19 ноября 2008 г.: сб. докл. – М., 2008. – С. 140-143.

Особистий внесок дисертанта по п. 12: проведення експериментальних досліджень процесів електродіалізу та мембранної дистиляції, участь у дослідженнях процесу ультрафільтрації, узагальнення результатів та розробка машинно-апаратної схеми комплексної переробки молочної сироватки, підготовка матеріалів до публікації.

13.Змієвський Ю.Г. Застосування мембранної дистиляції при переробці молочної сироватки / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, Л.В. Цюпко // Мембранні та сорбційні процеси і технології: XX укр. семінар, 24-25 лют. 2009 р.: тези доп. – К., 2009. – С. 14.

14.Змієвський Ю.Г. Дослідження методів, що перешкоджають утворенню осаду на поверхні іонообмінних мембран / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук // 75-а наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 13-14 квіт. 2009 р.: програма і матеріали. – К., 2009. – С. 238.

Особистий внесок дисертанта по пп. 13-14: аналітичний огляд наукових публікацій, формулювання висновків, підготовка матеріалів до друку.

15.Zmievskiy Yr. Use of electrodialysis and membrane distillation in lactoserum processing / Yr. Zmievskiy, V. Mironchuk, D. Kucheruk // Ion transport in organic and inorganic membranes: international conference, 11-16 may 2009 y.: book of abstracts. – Krasnodar, 2009. – P. 244-245.

16.Змієвський Ю.Г. Особенности электродиализной обработки вторичного молочного сырья / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, Д.Д. Кучерук // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: междунар. науч.-практ. конф., 19-20 февр. 2010 г.: материалы конф. – Йошкар-Ола, 2010. – С. 312-314.

Особистий внесок дисертанта по пп. 15-16: аналітичний огляд наукових публікацій, отримання експериментальних даних та їх обробка, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

17.Змієвський Ю.Г. Визначення допустимого гідравлічного тиску у камерах мембранно-дистиляційних установок / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук // 76-а наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 13-14 квіт. 2010 р.: програма і матеріали. – К., 2010. – С. 123.

Особистий внесок дисертанта по п. 17: аналітичний огляд наукових публікацій, розробка лабораторної установки та методики проведення досліджень, отримання експериментальних даних та їх обробка, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

18.Zmievsky Yu. Assessment of rational length of working chamber in apparatus for membrane distillation / Yu. Zmievsky, V. Myronchuk, L. Kornienko // Membrane and sorption processes and technologies: internat. scient. confer., 20-22 apr. 2010 y.: abstracts – K., 2010. – P. 76.

Особистий внесок дисертанта по п. 18: проведення експериментальних досліджень, математичне моделювання, узагальнення результатів та формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

Патенти на корисні моделі та винаходи:

19.Пат. 42578 U Україна МПК⁸ С 13 К 5/00. Спосіб виробництва концентрату лактози / Змієвський Ю.Г., Мирончук В.Г., Кучерук Д.Д., Цюпко Л.В.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. № u2009 01583; заявл. 24.02.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл.№ 13.

20.Пат. 43665 U Україна МПК⁸ С 13 К 5/00. Спосіб виробництва концентрату лактози / Змієвський Ю.Г., Мирончук В.Г., Кучерук Д.Д.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. № u200903109; заявл. 02.04.2009; опубл. 25.08.2009, Бюл.№ 16.

21.Пат. 84384 U Україна МПК⁸ С 13 К 5/00. Спосіб виробництва концентрату лактози / Українець А.І., Мирончук В.Г., Кучерук Д.Д., Грушевська І.О., Змієвський Ю.Г.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. № u200713856; заявл. 10.12.2007; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.

Особистий внесок дисертанта по пп. 19-21: розробка машинно-апаратних схем комплексної переробки молочної сироватки, підготовка матеріалів до публікації.

22.Пат. 86529 U Україна МПК⁸ А 23 С 9/144. Електродіалізатор / Змієвський Ю.Г., Мирончук В.Г., Українець А.І., Кучерук Д.Д., Грушевська І.О.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. № a200714012; заявл. 13.12.2007; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

Особистий внесок дисертанта по п. 22: експериментальна апробація розробки, обговорення результатів, підготовка матеріалів до публікації.

АНОТАЦІЯ

Змієвський Ю.Г. Застосування електродіалізу і мембранної дистиляції в процесі переробки молочної сироватки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2010.

В дисертаційній роботі на основі аналізу наукових публікацій та проведених досліджень зроблено висновок, що процеси електродіалізу та мембранної дистиляції при комплексній переробці молочної сироватки мають вагомі переваги в порівнянні з існуючими методами.

Запропоновано нову конструкцію електродіалізатора, яка унеможливує утворення важкорозчинного осаду на поверхні іонообмінних мембран, шляхом використання розчину хлориду натрію, як антисолеутворюючої речовини. Отримані експериментальні дані показують переваги цієї конструкції з точки зору енергетичних витрат.

Проведені дослідження процесу мембранної дистиляції молочної сироватки з використанням гідрофобних мембран МФФК-3. Визначено раціональне розміщення мембран відносно поля гравітаційних сил, встановлено залежність коефіцієнта масопередачі та питомої продуктивності від вмісту сухих речовин. Визначено критичні гідравлічні тиски в камерах мембранно-дистиляційних установок, при досягненні яких пори мембрани заповнюються рідкою фазою. Визначено вплив довжини робочої камери на процес мембранної дистиляції та запропоновано алгоритм розрахунку необхідної площі мембран з врахуванням температурної поляризації.

Розроблено три машино-апаратні схеми комплексної переробки молочної сироватки з використанням електродіалізу та мембранної дистиляції. Результати досліджень пройшли промислову апробацію на ВАТ «Вімм-Білл-Данн Україна».

Ключові слова: електродіаліз, електродіалізнi установки мембранна дистиляція, переробка молочної сироватки.

АНОТАЦІЯ

Змиевский Ю.Г. Применение электродиализа и мембранной дистиляции в процессе переработки молочной сыворотки. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2010.

В диссертационной работе проведено сравнение процессов электродиализа и ионного обмена, которые широко используются для деминерализации молочной сыворотки. Из анализа имеющихся литературных данных сделан вывод, что электродиализ более предпочтителен, несмотря на интенсивное осадкообразование на поверхности ионообменных мембран. Рассмотрен механизм и причины формирования загрязнений, а также известные конструкции электродиализаторов. Сделан вывод о необходимости проведения научных исследований и разработки принципиально новой конструкции электродиализатора.

На основании анализа особенностей и области применения процесса мембранной дистиляции обоснована необходимость его изучения при переработке молочной сыворотки.

Исследования процесса электродиализа проведены на лабораторной установке с использованием трех разных конструкций электродиализаторов: с проточными и непроточными камерами концентрирования. Установлено, что образование труднорастворимых соединений кальция уменьшает производительность установки в среднем на 20-30 % и повышает удельные энергозатраты в 1,5-3 раза.

Предложена новая конструкция электродиализатора, которая предотвращает формирование труднорастворимого осадка на поверхности ионообменных мембран, за счет использования раствора хлорида натрия, как

антисолеобразующего вещества. Установлено, что для такой установки рациональным режимом работы является набор следующих параметров: количество сухих веществ молочной сыворотки в пределах 30 %, линейная скорость растворов в камерах – 0,24 м/с, концентрация раствора хлорида натрия и общее количество минеральных веществ сыворотки должны быть приблизительно одинаковыми, плотность тока не должна превышать 250 А/м².

Сравнение экспериментальных данных показывают, что применение предложенной конструкции электродиализатора, в сравнении с традиционно используемыми, позволяет снизить удельные затраты энергии в 1,03-2,8 раза, а скорость перенесения солей, «выход тока», коэффициент масопередачи повысить в 1,15-1,52; 1,15-1,53 и 2,77-2,86 раза соответственно.

Исследования процесса мембранной дистилляции проведены на лабораторной установке с мембранной ячейкой круглой и прямоугольной формы при температуре молочной сыворотки 60 и 75 °С. Определены основные характеристики гидрофобных мембран МФФК-3 в процессе мембранной дистилляции: селективность $\phi > 0,99$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,034$ Вт/(м²·К).

Для концентрирования молочной сыворотки, с применением указанного процесса, из нее необходимо удалять белковые соединения. Для этого был использован процесс ультрафильтрации. Однако, сквозь ультрафильтрационную мембрану в пермеат проходит незначительная часть белков, которые при нагревании до 60 °С в следствии денатурации коагулируют и загрязняют гидрофобную поверхность, снижая при этом удельную производительность. Поэтому предложено ультрафильтрационный пермеат молочной сыворотки перед мембранной дистилляцией выдерживать при температуре 60 °С на протяжении 20 мин с последующей фильтрацией на механическом фильтре. На заключительном этапе концентрирования молочную сыворотку целесообразно нагревать от 60 до 75 °С, что позволяет ускорить процесс и получить более высокое количество сухих веществ в растворе, а именно 50-55 %. Изменение коэффициента масопередачи и удельной производительности в зависимости от количества сухих веществ имеет линейный характер.

Экспериментально установлено, что мембранно-дистилляционные установки с мембранами МФФК-3 при разделении молочной сыворотки имеют максимальную производительность при горизонтальном расположении мембран относительно поля гравитационных сил. Установлены критические значения гидравлического давления в камерах при условии перепада давлений по разные стороны мембраны и без их разности с обеих сторон.

Показано, что увеличение длины камеры в мембранно-дистилляционных установках уменьшает эффективность использования всей площади мембран, что связано с температурной поляризацией. Предложен алгоритм расчета необходимой площади мембран с учетом изменения температуры по длине камеры.

На основании полученных результатов разработаны три машино-аппаратурные схемы комплексной переработки молочной сыворотки с использованием процессов электродиализа и мембранной дистилляции.

Результаты исследований прошли промышленную апробацию на ВАТ «Вимм-Билль-Данн Украина», ожидаемый экономический эффект составляет 88 грн. на 1 м³ переработаной молочной сыворотки.

Ключевые слова: электродиализ, электродиализные установки, мембранная дистилляция, переработка молочной сыворотки.

SUMMARY

Zmievskiy Yr. G. Use of electrodialysis and membrane distillation in processing of dairy whey. – Manuscript.

The thesis for obtaining of scientific degree of candidate of technical sciences by specialty 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions. National University of Food Technologies, Kiev, 2010.

Basing on the analysis of scientific publications and the researches held, the conclusion of the thesis claims that the processes of electrodialysis and membrane distillation in complex processing of dairy whey have considerable advantages over existing methods.

A new construction of electrodialyzer is proposed enabling creation of a sparingly soluble setting on the surface of ion-exchange membranes by using sodium chlorides solution as an anti-saltforming matter. The experimental data state the advantages of such construction from the point of view of the expenditure of energy.

The researches were held on membrane distillation of dairy whey with the usage of MFFK-3 hydrophobic membranes. The rational placement of membranes was distinguished in relation to gravity force fields, the dependence of the mass transfer coefficient and specific productivity from the contents of dry matters was found. The critical hydraulic pressures were distinguished in the chambers of membrane distillation installations by approaching which membrane pores fill up with liquid phase. The research defined the influence of the length of the working chamber on the process of membrane distillation and offers an algorithm of calculating the needed membrane area taking into account temperature polarization.

Three machine and instrument schemes have been worked out for complex processing of dairy whey with the usage of electrodialysis and membrane distillation. The results of the researches have undergone testing at “Vimm-Bill-Dann Ukraine” Open Joint-Stock Company.

Key words: electrodialysis, electrodialysis installations, membrane distillation, processing of dairy whey.

Підп. до друку 04.08.10 р. Наклад 120 пр. Зам. № 670

РВЦ НУХТ, 01601 Київ – 33, вул. Володимирська, 68
www.book.nuft.edu.ua

Свідоцтво про реєстрацію серія ДК № 1786 від 18.05.04 р.