

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПАЩЕНКО БОГДАН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 66.081.63; 666.64:66.067.124

**ЗАКОНОМІРНОСТІ МЕМБРАННОГО РОЗДІЛЕННЯ ДИСПЕРСНИХ
СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ОСАДУ**

05.18.12 – Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та
фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Національному університеті харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Штефан Євгеній Васильович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, професор кафедри репрографії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Дубовкіна Ірина Олександрівна,
Інститут технічної теплофізики НАН України, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах

кандидат технічних наук
Гузенко Василь Володимирович,
Харківський державний університет харчування та торгівлі МОН України, старший викладач кафедри процесів та устаткування харчової і готельно-ресторанної індустрії ім. М.І. Беляєва

Захист відбудеться «21» жовтня 2020 р. о 14.00 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.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розіслано «__» вересня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02,
к.т.н., доц.

С.І. Літвинчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з основних проблем соціально-економічного розвитку суспільства на сучасному етапі є вдосконалення структури харчової промисловості як однієї із провідних ланок світового господарства. Для досягнення цієї мети потрібно забезпечити вирішення низки важливих наукових, технічних, економічних та екологічних питань, що потребує комплексного поєднання різноманітних сучасних технологій. Особливе місце з-поміж них посідають мембранні технології, зокрема ультрафільтрація, яка використовується для розділення дисперсних систем на багатьох харчових підприємствах і дозволяє створення енергетично- та екологічно раціональних варіантів розділення і концентрування розчинів із застосуванням широкого спектру фільтрувальних елементів на основі неорганічних матеріалів (зокрема керамічних мембран). Вони відкривають принципово нові можливості використання мембранних технологій.

Ефективність впровадження мембранних процесів розділення часто обмежується складністю врахування структурно-механічних параметрів як сировини, так і фільтрувальних елементів та осаду, що утворюється на їх поверхні при реалізації заданих технологічних умов. Для забезпечення ефективного використання мембранних методів в харчових технологіях доцільно на етапі проектування промислових установок враховувати апаратно-технологічні режими їхньої роботи, що призводить до ущільнення шару осаду, закупорювання пор мембрани та деформації фільтрувальних елементів, зниження продуктивності при обробленні розчинів, що мають різну дисперсність.

Слід зазначити, що описані вище властивості важко піддаються безпосередньому експериментальному вивченню та аналізу. Тому важливу роль в дослідженні мембранних процесів відіграє математичне моделювання. Сучасний технічний рівень математичного програмного забезпечення дає змогу вирішити цю проблему, однак лише за наявності комплексної методики дослідження на базі інформаційних технологій проектування. Це забезпечить найбільш повне врахування усіх аспектів технологічного процесу: від виготовлення фільтрувальних елементів до визначення зміни коефіцієнта проникності шару осаду на їхній поверхні. Розроблення такої методики є актуальним для розвитку наукових досліджень у даному напрямку харчових технологій.

Розвиткові теоретичних основ та удосконаленню технологічного та апаратного впровадження мембранних процесів сприяли роботи провідних науковців цього напрямку: Ю.Л. Дитнерського, В.М. Гуцалюка, М.Т. Брика, А.Ф. Бурбана, Г.Г. Каграманова, В.А. Ліпатова, Г.В. Дейниченка, Ю.Г. Змієвського, Б.А. Лобасенка, А.А. Світцова, М.А. Мулдера, Y. Tanaka, A. Slczak, M. Porter, Z. Zhang, Y. Chen, D. Chen, I. Jedidi та багатьох інших.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальних проблем дослідження закономірностей процесу мембранного розділення рідких дисперсних систем з урахуванням структурно-механічних параметрів фільтрувальних елементів та ущільнення шару осаду, що виникає на їхній поверхні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна праця виконана відповідно до пріоритетних напрямків наукових робіт

Національного університету харчових технологій «Розроблення високотехнологічних процесів та обладнання харчових виробництв» (2016-2020 рр.), зокрема в межах теми кафедри машинобудування, стандартизації та сертифікації обладнання «Підвищення якості, надійності і довговічності обладнання для переробної і харчової промисловості» (№0112U006977) та теми кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв «Розробка методів підвищення якості, надійності і довговічності обладнання для переробної і харчової промисловості» (№ 0119U102428).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження закономірностей процесу мембранного розділення дисперсних систем із урахуванням структурно-механічних параметрів фільтрувальних елементів та ущільнення шару осаду, що утворюється на їх поверхні.

Виходячи з цього, сформульовано та поставлено такі напрямки та **завдання досліджень**:

- розробити метод теоретичного дослідження мембранного розділення дисперсних систем з урахуванням структурно-механічних параметрів фільтрувальних елементів та осаду;
- розробити математичну модель процесу мембранного фільтрування з урахуванням зміни пористості та коефіцієнту проникності фільтрувальних мембранних елементів внаслідок їхньої деформації та структурно-механічних параметрів шару осаду, що виникає на поверхні фільтрувального елемента;
- виконати комплекс обчислювальних експериментів та оцінити адекватність їхніх результатів шляхом співставлення з даними фізичних експериментів;
- провести дослідження зносостійкості керамічного мембранного елемента з урахуванням структурних характеристик його матеріалу та технологічного процесу виготовлення.

Об'єкт дослідження – процес розділення рідких дисперсних систем за допомогою керамічних мембран із урахуванням структурно-механічних параметрів фільтрувальних елементів та ущільнення шару осаду.

Предмет дослідження – зміна структурно-механічних параметрів керамічних фільтрувальних елементів та шару осаду внаслідок дії експлуатаційного навантаження та їх вплив на технологічні показники процесу ультрафільтрації рідких дисперсних систем.

Методи досліджень. У роботі використано теоретичні та експериментальні методи дослідження: фізичне моделювання процесу ультрафільтрації; математичне та імітаційне (цифрове) моделювання деформації керамічних фільтрувальних елементів та ущільнення шару осаду; аналітична оцінка параметрів процесу ультрафільтрації.

Для дослідження поведінки структурно-механічних змін у каркасі керамічного фільтрувального елемента під дією експлуатаційного навантаження, ущільнення шару осаду та визначення його властивостей використовувались методи вимірювання міцності осаду, електронна мікроскопія, віскозиметр ВЗ-246, пристрій Валента ВЦ-1, аналізатор текстури ТА-ХТ Plus для дослідження структурно-механічних властивостей гелю, методи визначення реологічних властивостей речовин, методи механічних випробувань міцнісних характеристик

керамічного матеріалу.

Для дослідження зносостійкості керамічних фільтрувальних елементів використовувались установка УЗДН-2Т з магнітострикційним вібратором, аналітичні ваги Radwag AS 220/С, методи електронної мікроскопії.

Наукова новизна одержаних результатів:

- розроблено метод теоретичного дослідження мембранного розділення рідких дисперсних систем за допомогою фільтрувальних елементів з урахуванням структурно-механічних параметрів керамічних мембран та шару осаду;
- розроблено математичну модель процесу ультрафільтрації з використанням керамічних фільтрувальних елементів, що ґрунтується на представленні фільтрувального елемента у вигляді пористого вологонасиченого каркасу разом із шаром осаду, який описується із застосуванням моделі континуально-дискретного дисперсного матеріалу;
- запропоновано метод визначення коефіцієнта проникності мембранного елемента та закономірності його зміни внаслідок деформування пористого каркасу елемента та часточок шару осаду;
- теоретично обґрунтовані та експериментально визначені закономірності зміни продуктивності мембранного розділення залежно від дисперсності шару осаду.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- розроблено інструментальну програмну систему PLAST-POR-M+GiD, призначену для проведення імітаційного моделювання процесу ультрафільтрації з урахуванням напружено-деформованого стану керамічних мембранних елементів та ущільнення шару осаду;
- встановлено термін експлуатації мембранного елемента до критичного зменшення продуктивності процесу ультрафільтрації внаслідок ущільнення та відповідного зменшення проникності шару осаду;
- запропоновано спосіб керування експлуатаційними властивостями керамічних фільтрувальних елементів шляхом регулювання розподілення величини пластичної деформації за об'ємом матеріалу заготовки в технологіях їхнього виготовлення під час пресування формувальної маси з порошку Al_2O_3 ;
- визначено параметри для проектних розрахунків апаратурно-технологічних схем доочищення стоків харчових виробництв;
- результати виконаних наукових досліджень упроваджено на підприємстві ТОВ «Солом'янський МПЗ» (акт від 29.10.2019 р.), а також у навчальний процес Національного університету харчових технологій (акт від 07.10.2019 р.).

Особистий внесок здобувача полягає у постановці завдань досліджень (разом з науковим керівником), проведенні аналітичного дослідження науково-технічних джерел за тематикою дисертаційної роботи, плануванні експериментів. Розроблено експериментальну установку, мембранний модуль та запропоновано схему ультрафільтраційного обладнання. Автором проведено: експериментальні дослідження процесу мембранного розділення; опрацьовано одержані результати та проведено їх аналіз; порівняно отримані результати фізичного та імітаційного моделювання; підтверджено адекватність математичної моделі процесу

ультрафільтрації. Здобувачем сформульовані основні положення, висновки та рекомендації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати та положення дисертаційної роботи доповідалися, розглядалися, було обговорено та схвалено на таких Міжнародних та всеукраїнських конференціях, конгресах і семінарах: 82 - 85 Міжнародних наукових конференціях молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (2016–2019 рр. Київ, НУХТ); Міжнародних науково-практичних конференціях «Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки» (2015 та 2018 рр., Київ, НУХТ); III та IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії» (2015 та 2018 рр., Київ, НУХТ); VI, VII та IX Міжнародних науково-практичних конференціях «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (2016, 2018 та 2019 рр., Чернігів, ЧНТУ); II Україно-Польській Міжнародній науковій конференції «Membrane and Sorption Processes and Technologies» (2015, Київ, НаУКМА); V Міжнародній спеціалізованій науково-практичній конференції «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності» (2016 р., Київ, НУХТ); XVI Міжнародній конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (2016 р., Одеса, ОНАХТ); Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (2016 р., Київ, НУХТ); XII Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості та освіті» (2016 р., ТУ, Варна, Болгарія); II Міжнародній науково-практичній конференції «Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях» (2017р., Суми, СумДУ); VIII Міжнародній науково-практичній конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (2019р., Київ, НУБіП); 8th Central European Congress on Food 2016 (CEFood 2016) – Food Science for Well-being (2016, Kyiv, NUFT); International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018 (2018, Sumy, SumDU).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 26 наукових праць, із них: стаття, що індексується в міжнародній наукометричній базі даних SCOPUS; 6 статей у фахових журналах України, окремі з яких індексуються в міжнародних наукометричних базах, стаття в матеріалах конференцій, 18 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку бібліографічних джерел та 6 додатків. Основний зміст дисертації викладено на 174 сторінках. Робота містить 67 рисунків і 22 таблиці. Бібліографічний список використаних джерел містить 132 найменування, в тому числі 84 закордонних.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** наведено результати аналізу основних видів розділення рідких дисперсних систем за допомогою мембранних елементів. Подано їхню загальну характеристику та способи застосування мембранних процесів у різних галузях харчової промисловості.

Розглянуто наявні математичні моделі процесу ультрафільтрації з використанням мембранних фільтрувальних елементів. Встановлено, що переважна більшість досліджень присвячена фільтрації з використанням плоских полімерних мембран, тоді коли трубчасті керамічні мембрани вивчені недостатньо. Проаналізовано основні види та характеристики керамічних матеріалів та способи їхнього виготовлення. Обґрунтовано актуальність проведення досліджень зносостійкості керамічних ультрафільтраційних мембран, що пов'язано з погіршенням їхніх властивостей у процесі експлуатації. Це обумовлює доцільність проведення дослідження закономірностей формування структури матеріалу мембранних елементів у процесах їхнього виготовлення.

Аналіз вітчизняних та закордонних наукових джерел свідчить про те, що жодна з теоретичних моделей не враховує деформації керамічних фільтрувальних елементів та ущільнення шару осаду на їх поверхні під час проведення ультрафільтрації, що впливає на проникність мембранного елемента. Отже, визначення закономірностей процесів мембранного розділення з урахуванням зміни конструктивно-технологічних параметрів фільтрувальних елементів зумовлено насамперед недостатньою вивченістю впливу їх структурно-механічних параметрів і відсутністю даних про кінетику зміни показників проникності та продуктивності мембран внаслідок їхнього деформування.

Науково обґрунтовано об'єкт і предмет досліджень, сформульовані основні завдання дисертаційної роботи.

У **другому розділі** наведено методи проведення досліджень на розробленій експериментальній установці, принципова схема якої наведена на рис. 1.

Установка спроектована з використанням мембранної комірки, що містить керамічну ультрафільтраційну мембрану компанії Inopor Rauschert Distribution «Inopor ultra» (виготовлену із $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) з ефективною площею $0,58 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Вона застосовувалася для визначення питомої продуктивності під час розділення модельного розчину. Температура процесу становила 52°C , робочий тиск мембранного розділення $0,8 \text{ МПа}$. Було отримано числові значення питомої продуктивності мембранного модуля та терміну експлуатації до повного блокування проходження рідкої дисперсної системи крізь пори мембрани.

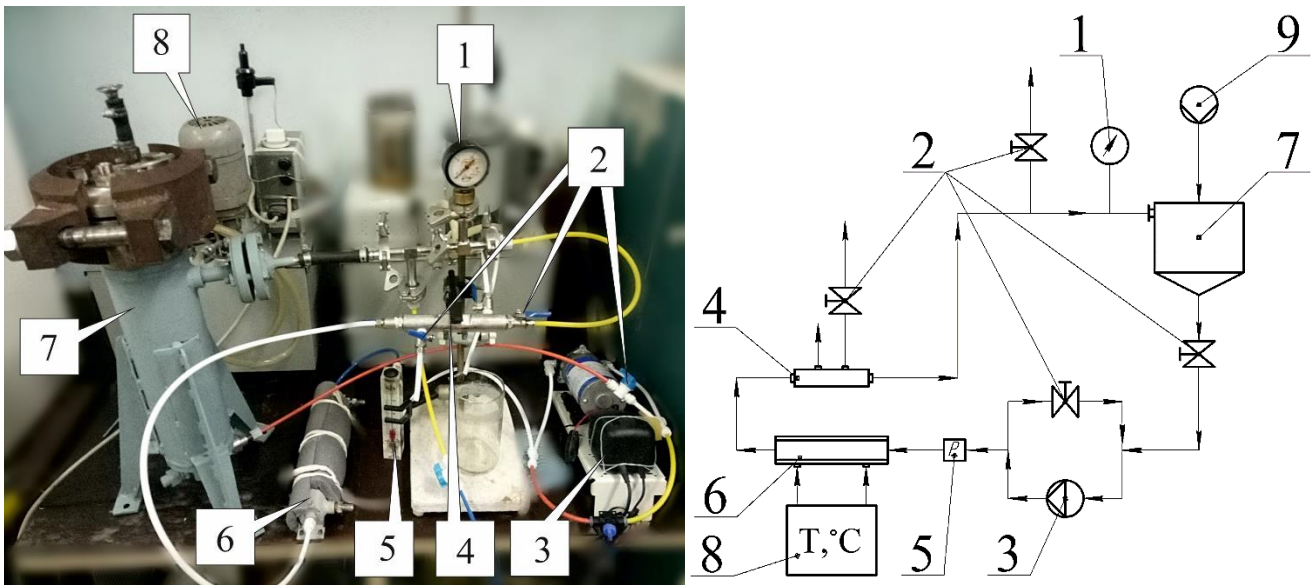


Рис. 1. Експериментальна установка дослідження ультрафільтрації:

1 – манометр; 2 – запірна арматура; 3 – відцентровий насос; 4 – мембранний модуль із керамічним елементом; 5 – ротаметр; 6 – теплообмінник із водяною сорочкою; 7 – збірна місткість для створення та підтримання тиску; 8 – термостат; 9 – компресор

Механічну зносостійкість досліджували під дією ультразвукової кавітації на установці з магнітострикційним вібратором УЗДН-2Т. Інтенсивність зношування визначалася втратою маси зразка ваговим методом за допомогою аналітичних ваг Radwag AS 220/С із точністю вимірювання 0,0001 г. Аналіз одержаних результатів (рис. 2) показав, що механізм зношування мембрани полягає в поступовому накопиченні енергії деформування з подальшим стрибкоподібним її вивільненням у поверхневому шарі мембранного елемента. Цей ефект призводить до руйнуванням матеріалу. Аналіз одержаних результатів показав, що загальна втрата маси мембрани суттєво менша, ніж для зразків з інших керамічних матеріалів, що пояснюється підвищенням вмістом оксиду алюмінію і показником ударної в'язкості матеріалу $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, з якого виготовлений досліджуваний мембранний елемент.

Механічні характеристики мембранного елемента Inopor ultra було одержано під час випробування керамічного матеріалу за допомогою установки для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів з використанням традиційних методів випробувань.

У якості модельного розчину використовувалась післяспиртова барда – висококонцентрована дисперсна система з параметрами: волога – 83,5%; сухі речовини – 8%; вміст колоїдних дисперсних частинок – 6,5% від загального об'єму. Структурно-механічні властивості шару осаду, необхідні для подальшого дослідження (модуль пружності, межу текучості, коефіцієнт Пуассона) визначали за допомогою методів електронної мікроскопії, віскозиметру ВЗ-246, пристрою Валента ВЦ-1 та аналізатора текстури ТА-ХТ Plus.

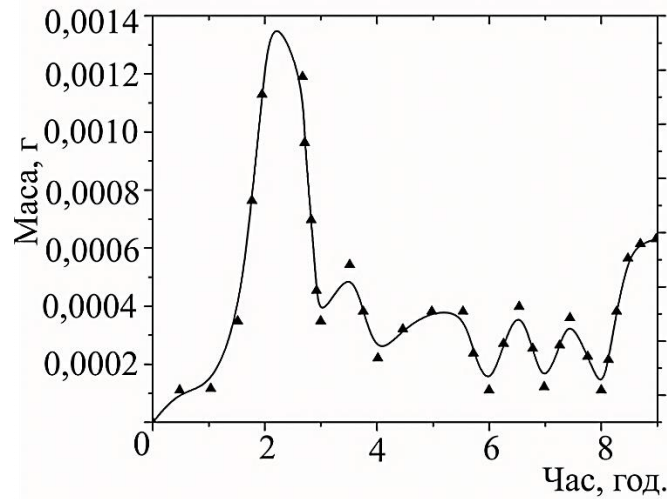


Рис. 2. Втрати маси керамічної мембрани за час досліджень

Третій розділ присвячено розробленню методу теоретичного дослідження ультрафільтрації, а також математичному опису закономірностей мембранного розділення рідких дисперсних систем з урахуванням структурно-механічних параметрів фільтрувальних елементів та шару осаду.



Рис. 3. Схематичне представлення методу дослідження закономірностей мембранного розділення рідких дисперсних систем

Основними елементами розробленого методу (рис. 3) є: 1) розрахункова схема, що відображає конструктивно-технологічні особливості мембранного елемента; 2) аналітична модель, що відображає математичний опис досліджуваного процесу; 3) алгоритмічна модель, що відображає розв'язок представлених математичних співвідношень; 4) цифрова модель, що є програмною реалізацією аналітичної та алгоритмічної моделей і дає змогу провести імітаційне моделювання із застосуванням комп'ютерних технологій.

Розглянуто процес проходження розчину під дією робочого тиску P крізь мембрану, яка представлена у вигляді вологовмісного пористого керамічного каркасу (рис. 4).

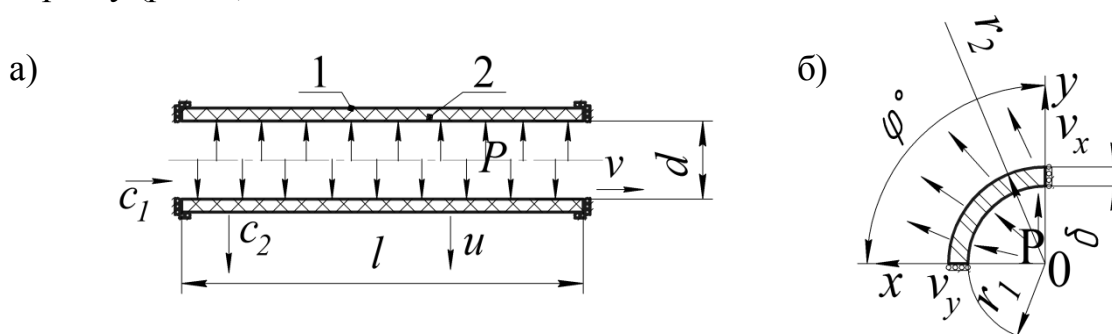


Рис. 4. Розрахункова схема ультрафільтрації рідкої дисперсної системи з використанням трубчастої мембрани з урахуванням:

а) по вздовжній координаті $0 \leq x \leq l$; б) окружній координаті $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$:
 c_1, c_2 – об'ємний вміст твердої та рідкої фази; u, v – вектори середньої швидкості переміщення частинок твердої та рідкої фази; P – робочий тиск; r_1, r_2 – внутрішній і зовнішній радіуси мембрани; d – діаметр внутрішнього каналу мембрани; δ – товщина мембрани; 1 – пористий вологовмісний каркас мембрани; 2 – рідка дисперсна система

Для математичного опису процесу ультрафільтрації використано рівняння збереження кількості руху:

а) твердої фази

$$\frac{d}{dt}(c_1 \rho_1 u) + \text{grad}(c_1 \rho_1 u^2) - \text{grad}(c_1 \sigma) - F_1 - F^{(1)} = 0; \quad (1)$$

б) рідкої фази

$$\frac{d}{dt}(c_2 \rho_2 v) + \text{grad}(c_2 \rho_2 v^2) - \text{grad}(c_2 P) - F_2 + F^{(2)} = 0, \quad (2)$$

де F_1, F_2 – вектори об'ємних сил у твердій та рідкій фазах відповідно; σ – величина напружень у твердій фазі; ρ_1, ρ_2 – густина твердої та рідкої фаз; $F^{(1)}, F^{(2)}$ – сили міжфазної взаємодії, що виникають під час контакту між часточками дисперсної системи та твердої фази пористого каркасу мембрани.

Сума рівнянь (1) і (2) описує взаємний рух фаз у всіх точках дисперсної системи у вигляді, аналогічному закону Дарсі:

$$\rho_2 \frac{dv}{dt} = -grad P - \frac{R}{c_2} + \rho_2 G \quad \text{або} \quad v = -\frac{k}{c_1} grad P, \quad (3)$$

де R – ефективна сила в'язкого опору; G – вектор прискорення сили ваги; v – швидкість течії в порі мембрани; $v = \frac{V}{\Pi(t)}$; $\Pi(t)$ – пористість каркасу в момент часу t ; V – об'єм пори.

З рівняння (3) отримано вираз для визначення коефіцієнту проникності k пористого вологовмісного каркасу мембрани. При цьому прийнято припущення, що інерційні ефекти в цій моделі відсутні:

$$k = \frac{\Pi(t) V c_1}{\mu \cdot grad P}, \quad (4)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Деформаційні закономірності пористого вологовмісного каркасу мембрани описують визначальними співвідношеннями відповідно до пружно-в'язко-пластичної моделі пористого матеріалу.

Для аналізу закономірностей впливу шару осаду на процес ультрафільтрації в роботі запропоновано метод визначення коефіцієнта проникності шару осаду та терміну експлуатації, за який відбувається критичне зменшення продуктивності мембранного елемента. Для аналізу структурно-механічних параметрів шару осаду запропоновано континуально-дискретну модель дисперсного матеріалу. Прийнято припущення, що об'єм окремої часточки осаду не змінюється, а діаметр є змінним унаслідок її пружно-пластичного деформування. Це призводить до суттєвої залежності розподілу пористості в шарі осаду від деформації його окремих часточок і, як наслідок, зменшення параметрів проникності.

Визначаючи за рівнянням Пуазейля та законом Дарсі питому продуктивність,

$$Q = \frac{n\pi r^2 \cdot r^2 S \cdot grad P}{8\mu L} = \frac{\Pi r^2 S \cdot grad P}{8\mu L}; \quad (5)$$

$$Q = \frac{k}{\mu} S \frac{grad P}{L}; \quad (6)$$

одержуємо:

$$\frac{\Pi r^2 S \cdot grad P}{8\mu L} = \frac{k}{\mu} S \frac{grad P}{L} \rightarrow k = \frac{\Pi r^2}{8}; \quad (7)$$

де n – число пор, що припадають на одиницю площі фільтрації, r – радіус частинок осаду, S – площа фільтрації; $grad P$ – різниця тисків (рушійна сила процесу); μ – коефіцієнт в'язкості осаду; L – довжина порового каналу.

З урахуванням структурних особливостей реальних тіл, згідно з теорією Сліхтера, коефіцієнт проникності визначається за виразом:

$$k = \frac{10,3d^2}{\mu K_S \cdot grad P} \Rightarrow \frac{10,3\Pi V r^2 \varepsilon}{4\mu \xi^2 K_S \cdot grad P} = \frac{2,575\Pi V r^2 \varepsilon}{\mu \xi^2 K_S \cdot grad P}; \quad (8)$$

де φ – структурний коефіцієнт осаду (емпірична поправка Котяхова для реальних тіл); d – діаметр часток осаду, м; K_S – коефіцієнт упаковки осаду; ξ – коефіцієнт звивистості порових каналів; ε – коефіцієнт проточності порових каналів.

Час до критичного зниження продуктивності при ($k \rightarrow 0$) з урахуванням рівняння Лапласа та (4)-(8) визначається за виразом:

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{\pi r^2 l}{\pi r^4 \text{grad } P / 8\mu l} = \frac{8\mu l}{\pi r^2 \text{grad } P}. \quad (9)$$

Тоді:

$$\tau = \frac{2l^2}{r} \frac{\mu}{k \cdot e_{ik}}, \quad (10)$$

де $\text{grad } P = \frac{2k \cdot e_{ik}}{r}$ – рушійна сила процесу ультрафільтрації, e_{ik} – швидкість деформування в точках шару осаду.

Рівняння (1)-(10) становлять основу запропонованої аналітичної моделі процесу ультрафільтрації. Для їхнього розв'язання використано проекційно-сіткові методи (метод скінченних елементів за просторовими змінними та метод скінченних різниць за часовим аргументом), на основі яких розроблена алгоритмічна модель (рис. 3). Її програмна реалізація представлена у вигляді програмного комплексу PLAST-POR-M+GiD. Для врахування поведінки дискретних часточок осаду під час створення цифрової моделі використали мову програмування TCL, що дає змогу скомпілювати роботу алгоритмів програмного пакету PLAST із відповідними алгоритмами CAE пакету GiD. Це забезпечує зручність та інтуїтивність під час виконання розв'язку сформульованої задачі.

У **четвертому розділі** наведені результати імітаційного моделювання поведінки керамічного фільтрувального елемента з визначенням коефіцієнту його проникності та ущільнення шару осаду, що виникає на його поверхні (згідно з розробленою розрахунковою схемою – рис. 6-7).

Аналіз ізограм для різних моментів часу показав, що коефіцієнт проникності має лінійну залежність від пористості, що не суперечить загальній теорії фільтрації та закону Дарсі (рис. 8). Пористість мембранного елемента зменшується з 0,51 до 0,46, а коефіцієнт проникності – від 1,1 до 0,9 м³/(м²·с·Па). При цьому відбувається зменшення продуктивності мембранного модуля з 14,121 до 12,72 л/(м²·год). Це пояснюється зміною пористості вологовмісного каркасу мембранного елемента внаслідок його деформування під дією експлуатаційного навантаження.



Рис. 6. Ізограма розподілу в точках мембрани по повздовжній координаті:
а) пористості; б) еквівалентних деформацій



Рис. 7. Ізограма розподілу в точках мембрани по окружній координаті:
а) пористості; б) еквівалентних деформацій

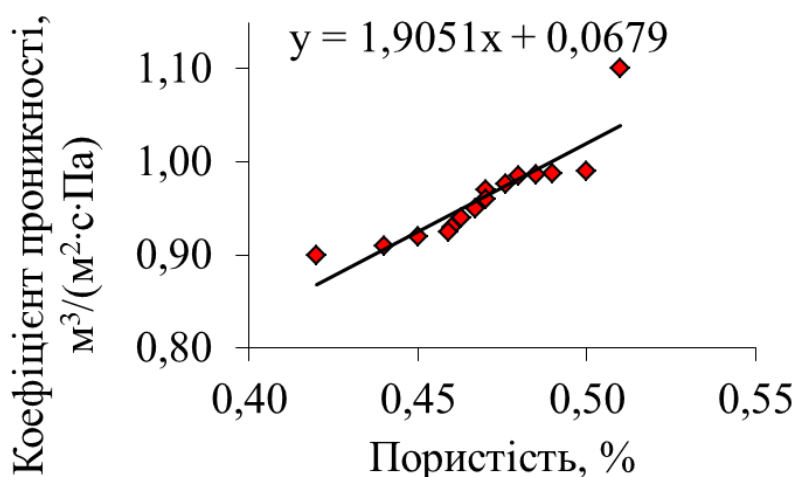


Рис 8. Залежність коефіцієнту проникності мембрани від пористості

Визначено, що через регулювання розподілення величини пластичної деформації матеріалу за об'ємом заготовки можна змінювати її пористість та проникність. Це дозволяє отримувати керамічні вироби підвищеної міцності та зносостійкості з порошку $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Для оцінки структурно-механічних та технологічних параметрів шару осаду внаслідок його ущільнення розроблено розрахункову схему, що наведена на рис. 9. Було проведено комплекс обчислювальних експериментів з дослідження ущільнення шару осаду до терміну блокування проходження рідкої дисперсної системи крізь пори мембрани, результати яких наведено на рис 10.

Аналіз одержаних результатів дав змогу встановити час до повного блокування проходження рідкої дисперсної системи крізь пори шару осаду, що становить 1595 с та деградацію коефіцієнту проникності від 1,94 до 0,044 м³/(м²·с·Па) при заданих експлуатаційних умовах. Використання запропонованих методів дає змогу визначити зниження продуктивності процесу ультрафільтрації від 12,850 до 2,775 л/(м²·год). Показано, що основним фактором при зниженні продуктивності є зміна проникності мембранного елемента внаслідок пластичної деформації окремих часточок шару осаду.

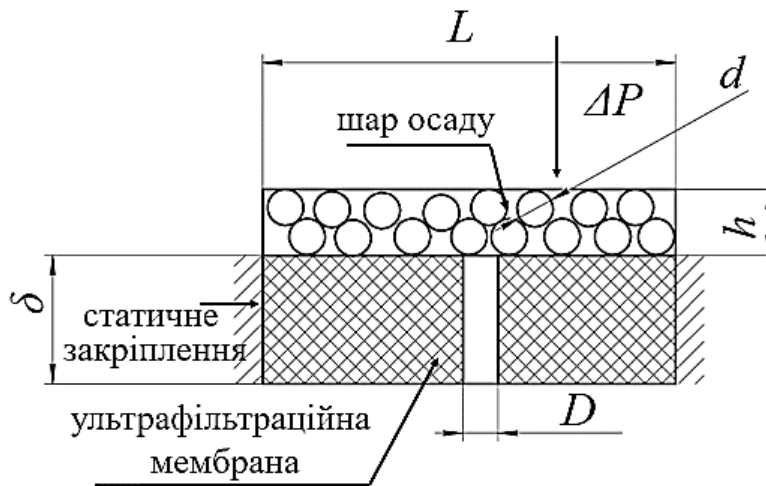


Рис. 9. Розрахункова схема поведінки ущільнення шару осаду на поверхні керамічного мембранного елемента з використанням континуально-дискретної моделі: d – діаметр часточки шару осаду, D – діаметр пори, δ – ширина стінки, h – висота шару осаду; ΔP – рушійна сила процесу; L – довжина площадки мембранного елемента, Δl – довжина сторони елементарної площадки осаду

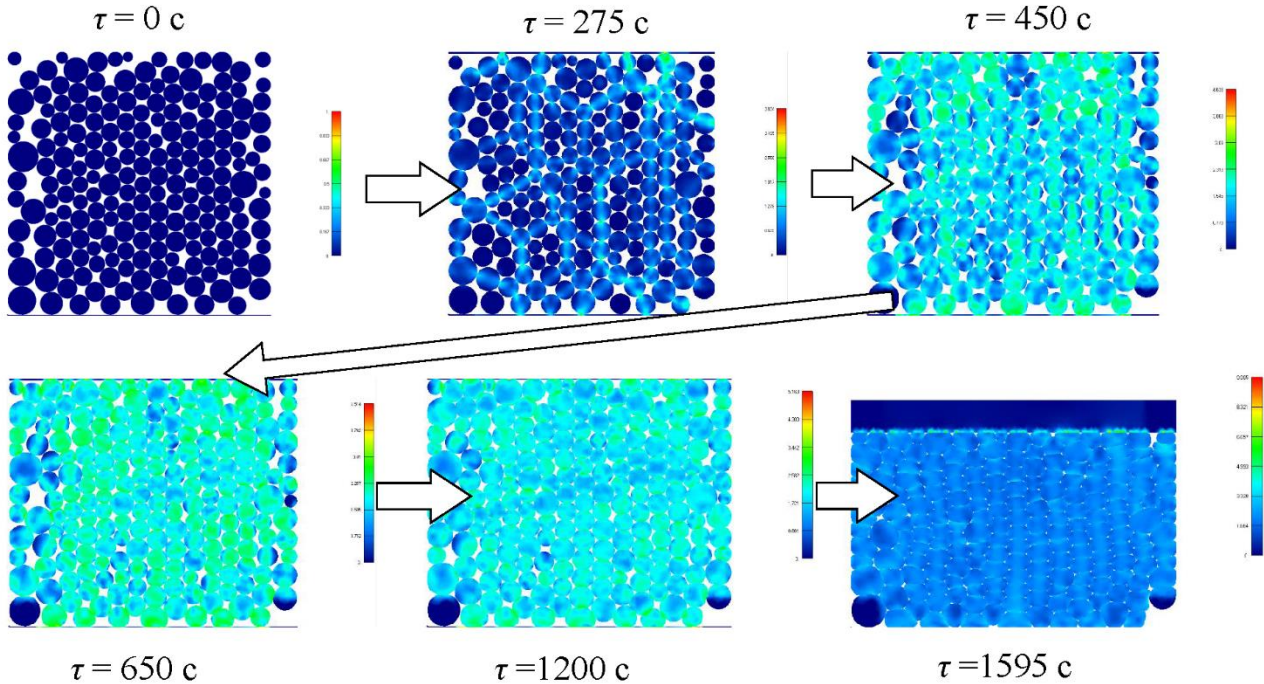


Рис. 10. Поведінка континуально-дискретної моделі шару осаду під дією експлуатаційного навантаження

У **п'ятому розділі** наведено результати порівняння фізичного та імітаційного моделювання, виконані проектувальні розрахунки ультрафільтраційного обладнання; надано рекомендації щодо практичного застосування результатів наукових досліджень та оцінка адекватності розробленої математичної моделі.

Зіставлення результатів розрахунків із даними експериментів наведені на рис. 11-14.

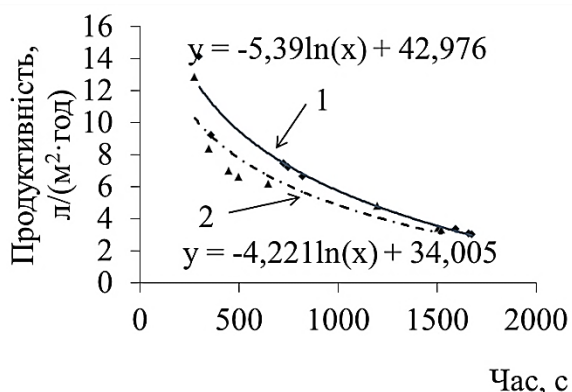


Рис. 11. Продуктивність процесу ультрафільтрації рідкої дисперсної системи: 1 – фізичний експеримент, 2 – імітаційне моделювання

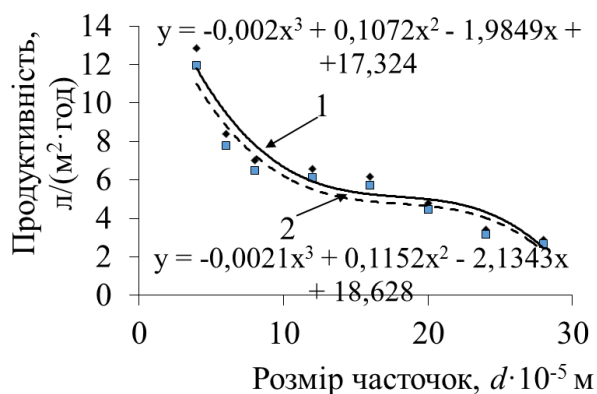


Рис.12. Продуктивність зі збільшенням деформації часточок осаду: 1 – фізичний експеримент, 2 – імітаційне моделювання

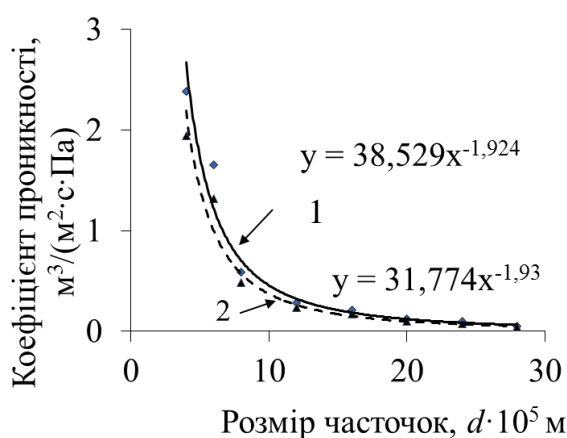


Рис. 13. Коефіцієнт проникності в процесі формозміни часточок шару осаду: 1 – фізичний експеримент, 2 – імітаційне моделювання

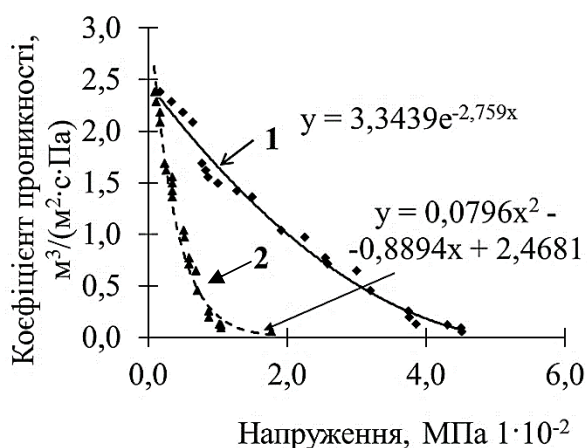


Рис. 14. Залежність коефіцієнту проникності від напруженого стану часточок осаду в процесі ущільнення: 1 – пружна деформація, 2 – пластична деформація

Аналіз результатів експериментальних досліджень свідчить про те, що час до повного блокування проходження рідкої дисперсної системи крізь пори шару осаду становив 1610 с, значення критичного зниження продуктивності мембранного модуля становили від 14,121 до 3,05 л/(м²·год), зміна коефіцієнту проникності осаду – від 2,386 до 0,054 м³/(м²·с·Па). Порівняння результатів імітаційного моделювання з даними експериментів показують, що розбіжність становить менше 9%. Крім того, було визначено продуктивність мембранного модуля, поправковий температурний коефіцієнт та гідравлічний коефіцієнту корисної дії (ККД). Розбіжність між величинами гідравлічного ККД, одержана фізичним та імітаційним моделюванням складає 1,1% (62,5% і 63,6% відповідно), що свідчить про високу точність розробленого методу дослідження.

Оцінка адекватності розробленої математичної моделі під час проведення обчислювальних експериментів виконувалася також за статистичним критерієм Фішера. Він становить 1,21, що задовольняє умову $F_p < F_{KP}$ ($F_{KP} = 3,79$ при відповідних дисперсіях виборок $S_1 = 14,24$, $S_2 = 11,79$ та $\alpha = 0,05$), що показує

адекватність розробленого методу. При цьому відповідна ймовірність розрахованого критерію Фішера становить $\alpha_p = 0,41$, що відповідає наступній умові адекватності: $\alpha_p > \alpha$.

На основі отриманих результатів запропоновано використання мембранної фільтраційної установки на етапі доочищення стічних вод харчових виробництв у наявних схемах очищення. Аналіз ефективності доочищення стічних вод за показниками ХПК, БПК, забарвленості, каламутності та рівню рН підтверджує, що використання запропонованої апаратурно-технологічної схеми в поєднанні з розробленим методом дослідження процесу ультрафільтрації дає змогу підвищити ступінь очищення стічних вод підприємства на 15% (у схемі доочищення стоків спиртового виробництва) та на 10% (у схемі доочищення стоків м'ясопереробного заводу).

Рекомендації щодо використання запропонованої схеми очищення стоків м'ясопереробного виробництва передані на підприємство ТОВ «Солом'янський МПЗ» (акт від 29.10.2019 р.). Одержані результати наукової роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету харчових технологій на кафедрі машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв під час проведення лабораторних і практичних занять із дисциплін «Технології виробництв», «Технології матеріалів» та «Технологічне обладнання харчових виробництв» (акт від 07.10.2019 р.).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній праці вирішено важливе науково-технічне завдання дослідження закономірностей процесу мембранного розділення рідких дисперсних систем з урахуванням структурно-механічних параметрів фільтрувальних елементів та ущільнення шару осаду, що виникає на їхній поверхні.

Сукупність наукових і практичних результатів отриманих автором дисертаційної праці полягає в наступному:

1. Розроблено метод теоретичного дослідження процесу розділення рідких дисперсних систем за допомогою фільтрувальних елементів з урахуванням проникності керамічних мембран та структурно-механічних параметрів шару осаду при його ущільненні.

2. Розроблено математичну модель процесу ультрафільтрації з використанням керамічних фільтрувальних елементів, що враховує структурно-механічні параметри мембранного елемента, закономірності зміни пористості, коефіцієнту проникності мембрани та шару осаду внаслідок його ущільнення.

3. Запропоновано метод визначення коефіцієнта проникності мембранного елемента, що дає змогу встановити закономірності його зміни залежно від деформування часточок шару осаду та пористості каркасу елемента. Визначено, що пористість мембранного елемента змінюється з 0,51 до 0,46, а коефіцієнт проникності змінюється в межах – від 1,10 до 0,9 $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$. Визначено, що це явище зумовлено зміною пористості мембрани під час її деформування внаслідок дії експлуатаційного навантаження.

4. Проведена апробація математичної моделі та запропоновано теоретичний метод дослідження через зіставлення отриманих результатів імітаційного та фізичного моделювання. При імітаційному моделюванні час до повного блокування проходження рідкої дисперсної системи крізь пори мембрани склав 1595 с, а при проведенні фізичного експерименту – 1610 с. Значення критичного зниження продуктивності за фізичного експерименту становили від 14,121 до 3,05 кг/(м²·год), а при імітаційному моделюванні – від 12,850 до 2,775 кг/(м²·год). Числові значення коефіцієнта проникності за фізичного експерименту становили – від 2,386 до 0,054 м³/(м²·с·Па), а при імітаційному моделюванні – від 1,940 до 0,044 м³/(м²·с·Па). Зіставлення значень імітаційного та фізичного моделювання показують розбіжність у межах 9 %, що вказує на високу точність розробленого методу.

5. Проведено дослідження фізико-механічних властивостей та зносостійкості фільтрувального керамічного елемента на основі α -Al₂O₃. Виявлено, що механізм зношування мембрани полягає в поступовому накопиченні енергії деформування з подальшим стрибкоподібним її вивільненням у поверхневому шарі мембранного елемента. Цей ефект призводить до поступового руйнування матеріалу. Водночас загальна втрата маси мембрани суттєво менша, ніж для зразків з інших керамічних матеріалів. Це пояснюємо підвищеним вмістом оксиду алюмінію і показником ударної в'язкості матеріалу досліджуваного мембранного елемента.

6. Визначено, що шляхом регулювання розподілу величини пластичної деформації матеріалу за об'ємом заготовки керамічного фільтрувального елемента можна змінювати його пористість та відповідно – проникність. Це дає змогу отримувати керамічні вироби підвищеної міцності та зносостійкості саме з Al₃O₂, на підставі чого цей матеріал рекомендовано для виготовлення мембран.

7. Одержані теоретичні та експериментальні результати покладені в основу проектувальних розрахунків під час вдосконалення апаратурно-технологічної схеми для очищення стоків харчових виробництв. Відмінністю від наявних схем є те, що на етапі доочищення оброблених стоків використана ультрафільтраційна установка на основі керамічних фільтрувальних елементів. Це дозволяє підвищити ступінь очищення стічних вод підприємства на 10-15%.

8. Результати виконаних наукових досліджень впроваджені у виробництво, зокрема: на підприємстві ТОВ «Солом'янський МПЗ» (акт від 29.10.2019 р.) та у навчальний процес Національного університету харчових технологій (акт від 07.10.2019 р.).

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття, що індексується міжнародною науково-метричною базою даних Scopus

1. E. Shtefan, B. Pashchenko, S. Blagenko, and S. Yastreba, «Constitutive Equation for Numerical Simulation of Elastic-Viscous-Plastic Disperse Materials Deformation Process», *Advances in Design, Simulation and Manufacturing: Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Vol. 1, p. 356-363, 2018.

Особистий внесок: аналіз наукових публікацій, формулювання основних положень нових технічних рішень та їх експериментальна апробація, формулювання висновків та підготовка матеріалів до публікації.

Статті у періодичних фахових виданнях

1. Б.С. Пащенко, та Є.В. Штефан, «Визначення концентрацій фаз при мембранному фільтруванні рідких середовищ», *Наукові праці ОНАХТ*, т. 80(1), с. 94-97, 2016 (видання, яке включено до міжнародних наукометричних баз – **Index Copernicus, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost**).

Особистий внесок: розроблення методики досліджень, участь у проведенні експериментів, обговорення результатів.

2. О.І. Некоз, О.А. Литвиненко, та Б.С. Пащенко, «Інтенсифікація технології водоочищення для харчових підприємств», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв*, №. 179, с. 139-145, 2016.

Особистий внесок: розроблення методики досліджень, проведення експериментів, розроблення схеми очищення, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків.

3. Б.С. Пащенко, Є.В. Штефан, та О.А. Литвиненко, «Перспективні матеріали для фільтраційних мембран харчової промисловості», *Харчова промисловість*, № 20, с. 123-129, 2016 (видання, яке включено до міжнародних наукометричних баз – **Index Copernicus, Google Scholar**).

Особистий внесок: аналіз наукових публікацій, проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

4. О.А. Литвиненко, та Б.С. Пащенко, «Зносостійкість кераміки для фільтраційних мембран», *Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ»*, № 61, с. 105-109, 2018.

Особистий внесок: узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

5. О.А. Литвиненко, Б.С. Пащенко, та С.В. Кадомський, «Диспергування емульсій у багатоступеневих кавітаційних апаратах», *Харчова промисловість*, № 24, с. 92-99, 2018.

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

6. І.Я. Стадник, С.І. Федак, Б.С. Пащенко, Н.А. Ткачук, «Методика розрахунку оптимальних параметрів валкового розкачування», *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, Т. 24, №6, с. 91-99, 2018 (видання, яке включено до міжнародних наукометричних баз – **Index Copernicus, Google Scholar, EBSCOhost**).

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

Стаття у матеріалах конференцій

7. Б.С. Пащенко, Є.В. Штефан, О.А. Литвиненко, та Ю.Г. Сухенко, «Використання комп'ютерних технологій для визначення коефіцієнту проникності шару осаду при мембранному фільтруванні дисперсних систем», *Збірник праць за підсумками VIII Міжнарод. наук.-практ. конф. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства*, с. 183-184, 2019.

Особистий внесок: обговорення ідей, формулювання основних положень нових технічних рішень та їх експериментальна апробація, підготовка та подача матеріалів до публікації.

Тези доповідей

8. B.S. Pashchenko, and E.V. Shtefan, «Some Kind of Dead-end Ultrafiltration Modules for Food Industries», on *II Ukrainian-Polish scientific conference Membrane and Sorption Processes and Technologies*, Kyiv, 2015, p. 252.

9. Ю.Г. Змієвський, І.І. Киричук, Л.В. Корнієнко, В.Г. Мирончук, В.В. Захаров, Б.С. Пащенко, Ю.С. Дзязько, та Л.М. Рождественська, «Отримання очищеної води за умов мембранного розділення біологічних рідин», на *Міжнар. наук.-практ. конф. Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки*, Київ, 2015, с. 148.

Особистий внесок по пп. 9-10: участь у проведенні експериментів, узагальнення та обговорення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

10. Б.С. Пащенко, «Моделювання пресування порошкових виробів з урахуванням ущільнення біпористих матеріалів», на *82 Міжнарод. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*, Київ, 2016, ч. 2, с. 125.

11. Б.С. Пащенко, Є.В. Штефан, М.Б. Штерн, та О.В. Міхайлов, «Аналіз структурно-механічних параметрів керамічних мембран в технологічному процесі виготовлення», на *VI Міжнарод. наук.-практ. конф. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*, Чернігів, 2016, с. 220.

Особистий внесок по пп. 11-12: проведення імітаційних експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

12. B. Pashchenko, M. Shtern, E. Shtefan, and O. Mikhailov, «Analys is of the structural and mechanical parameters of the ceramic membranes in the technological process of manufacturing», in *8th Central European Congresson Food 2016. Food Sciencefor Well-being*, Kyiv, 2016, p. 191.

13. Б.С. Пащенко, та Є.В. Штефан, «Ресурсоощадний метод очистки води харчових підприємств на установках з фільтрувальними мембранними елементами», на *V Міжнарод. спец. наук.-практ. конф. Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності*, Київ, 2016, с. 52.

Особистий внесок по пп. 13-14: розроблення методики досліджень, проведення експериментів, розроблення схеми очищення, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків.

14. Б.С. Пащенко, та Є.В. Штефан, «Використання комп'ютерних технологій для дослідження процесу мембранного розділення дисперсних систем», на *Міжнарод. наук.-практ. конф. Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженері*, Київ, 2016, с. 41-42.

Особистий внесок: розроблення методики досліджень, проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та подача матеріалів до публікації.

15. Б.С. Пащенко, та Є.В. Штефан, «Визначення концентрацій фаз при мембранному розділенні дисперсних систем», на *XVI Міжнарод. конф. Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв*, Одеса, 2016, с. 121-125.

16. Є.В. Штефан, Б.С. Пащенко, М.Б. Штерн, та О.В. Михайлов, «Розроблення методів виготовлення керамічних мембран для ультрафільтраційних установок», на *XII Международ. конф. Стратегия качества в промышленности и образовании*, г. Варна (Богария), 2016, с. 310-313.

Особистий внесок по пп. 16 - 17: аналіз наукових публікацій, розроблення методики досліджень, проведення експериментів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

17. Б.С. Пащенко, та Є.В. Штефан, «Моделювання процесів мембранного розділення дисперсних систем», на *Міжнарод. наук.-практ. конф. Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості*, Київ, 2016, с. 154-155.

18. Б.С. Пащенко, «Дослідження утворення гелевого шару на поверхні фільтрувальної мембрани», на *83 Міжнарод. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*. Київ, 2017, ч. 2, с. 168

Особистий внесок по пп. 18 - 19: розроблення методики досліджень, проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

19. Б.С. Пащенко, та О.А. Литвиненко, «Моделювання деформацій фільтрувальних елементів в процесах розділення дисперсних систем», на *VII Міжнарод. наук.-практ. конф. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*, Чернігів, 2017, ч. 2, с. 38-39.

Особистий внесок: розроблення методики досліджень, проведення імітаційних експериментів, оброблення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

20. О.А. Литвиненко, Є.В. Штефан, та Б.С. Пащенко, «Особливості зношування конструкційних матеріалів у харчових середовищах», на *II Міжнарод. наук.-практ. конф. Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях*, Суми, 2017, с. 81-82.

Особистий внесок: аналіз наукових публікацій, проведення імітаційних експериментів, оброблення отриманих результатів та підготовка до публікації.

21. Б.С. Пащенко, «Аналітичний спосіб опису мембранного розділення дисперсних систем на установках з керамічними фільтрувальними елементами», на

84 Міжнарод. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті. Київ, 2018, ч. 2, с. 146.

Особистий внесок: розроблення методики досліджень, проведення імітаційних експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків.

22. Б.С. Пащенко, та Є.В. Штефан, «Дослідження процесу забруднення пори фільтрувального елемента при мембранному розділенні дисперсних систем», на II Міжнарод. наук.-практ. конф. Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки, Київ, 2018, с. 111-113.

Особистий внесок: розроблення методики досліджень, проведення імітаційних експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків.

23. Б.С. Пащенко, та Є.В. Штефан, «Методика визначення проникності шару осаду при мембранному розділенні» на Міжнарод. наук.-практ. конф. Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії, Київ, 2018, с. 38.

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

24. O. Litvinenko, and V. Pashchenko, «Cavitation wearing of modified ceramics», on 85 Anniversary International scientific conference of young scientist and students. Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution. Kyiv, 2018, P. 2, p. 338.

25. Б.С. Пащенко, О.А. Литвиненко, та Є.В. Штефан, «Інформаційно-аналітична методика для прогнозування і розрахунку конструктивних параметрів мембранних фільтрувальних елементів», на IX Міжнарод. наук.-практ. конф. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем, Чернігів, 2019, ч. 2, с. 27-28.

Особистий внесок по пп. 25-26: обговорення ідей, розроблення методики досліджень та їх експериментальна апробація, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків, підготовка та подача матеріалів до публікації.

АНОТАЦІЯ

Пащенко Б.С. Закономірності мембранного розділення дисперсних систем з урахуванням структурно-механічних параметрів фільтрувальних елементів та осаду. – 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, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальних проблем дослідження закономірностей процесу мембранного розділення рідких дисперсних систем з урахуванням структурно-механічних параметрів керамічних

фільтрувальних елементів та ущільнення шару осаду, що виникає на їхній поверхні.

Розроблено метод теоретичного дослідження процесу мембранного фільтрування з урахуванням структурно-механічних параметрів фільтрувальних керамічних мембран та шару осаду, що виникає на її поверхні. Розроблено математичну модель ультрафільтрації з використанням керамічних фільтрувальних елементів, що ґрунтується на представленні фільтрувального елемента у вигляді пористого вологонасиченого каркасу разом із шаром осаду, який описується із використанням моделі континуально-дискретного дисперсного матеріалу. Досліджено вплив деформування керамічного мембранного елемента на кінетику ультрафільтрації рідких дисперсних систем, зміну пористості, проникності та критичного зниження продуктивності обладнання, механізм блокування прохідного перетину пори за рахунок деформування шару осаду. Виявлено, що внаслідок дії експлуатаційного навантаження основним фактором при зниженні продуктивності обладнання є ущільнення шару осаду. Одержані числові значення зміни пористості, коефіцієнтів проникності мембрани та шару осаду, а також час перекриття пор мембрани часточками осаду. Порівняння результатів розрахунків із даними фізичного експерименту свідчать про високу точність розробленого методу. Отримані результати досліджень впроваджені у виробництво та в навчальний процес Національного університету харчових технологій.

Ключові слова: мембранне розділення, рідкі дисперсні системи, деформація фільтрувальних елементів, ультрафільтрація, харчова промисловість, переробні виробництва.

ANOTATION

Pashchenko B.S. – Regularities of the of membrane separation of dispersed systems with consideration for structural and mechanical parameters of filter elements and sediment. – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical industries. – National University of Food Technologies, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of urgent problems of investigation the regularities of the process of membrane separation of disperse systems, taking into account the structural and mechanical parameters of ceramic filter elements and the compaction of the sediment layer that occurs on their surface.

Based on the analysis of the scientific literature and our own experimental studies it was found, that none of the theoretical models takes into account the deformation of ceramic filter elements during the ultrafiltration process which, together with the formation of a sedimentary layer, affects the characteristics of the membrane itself and the process parameters.

The experimentally obtained numerical values and graphical dependences of the decrease in ultrafiltration productivity and the flow rate of the washing solution during the washing of the ceramic element on the duration of the process. This effect is caused

by the change of the permeability coefficient of the membrane and the sediment layer on its surface. Investigation of the wear resistance of a ceramic element of an «Inopor» filter based on $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ is carried out. The wear rate was determined by the weight loss of the specimen by the weight method. Analysis of the results showed that the nature of wear consists in the gradual accumulation of deformation energy and it's abrupt on the surface of the membrane element release with the destruction of material. This is explained by the high content of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

A method has been developed for theoretical research of the process of membrane separation of liquid dispersion systems. A mathematical model of ultrafiltration with using ceramic filter elements has been developed, taking into account the structural and mechanical parameters of the membrane element and the sediment layer, patterns of change of their permeability coefficient.

The design scheme of the ultrafiltration process based on the representation of the filter element in the form of porous moisture-proof framework containing a liquid dispersion system is developed. Such a continuum approach makes it possible to take into account the time variation of the sediment permeability coefficient under the action of operational load. The mechanism of overlapping the passage section of the pore due to the elastic-plastic deformation of the sediment layer is investigated. For this, on the basis of Slichter's theory, model of deformable porous continuous-discrete dispersed material is developed, that effectively reflects the nature of the porous structure change of the filtering medium.

The developed algorithms are used as the basis of the created digital model PLAST-GiD, which consists of two subsystems: 1) PLAST-POR-M, which is designed to conduct computational experiments to study filtration processes, taking into account the stress-strain state of ceramic membrane elements; 2) PLAST-POR-M + GiD, is designed to conduct computational experiments to determine the quantitative parameters of irreversible deformation of the sediment layer and determine its permeability coefficient.

The adequacy of the developed mathematical model was evaluated by comparing the obtained numerical values of specific productivity of the ultrafiltration process, the time to complete blocking of the passage of the liquid dispersion system through the pores and the permeability coefficient of filter element and sediment layer. The obtained numerical ratios of the values of simulation and physical modelling have a difference of 9%.

The main result of the simulation is the determination of dependencies of the decrease in the productivity of ultrafiltration equipment on changes in the permeability coefficient and compaction of the sediment layer, as well as numerical values of the permeability coefficient and changes in the diameter of its particles. The porosity of the membrane element varies from 0,51 to 0,46, and the permeability coefficient varies from 1.1 to 0.9 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$. It was revealed that as a result of the effect of elastic-plastic deformation, the main factor in the case of acritical decrease in the membrane productivity is the compaction of the sediment layer. The theoretical time to complete blocking of pores was 1595 s, and during physical experiment it was about 1600 s. The values of the decrease in productivity for the physical experiment varied from 14.121 to 3.05 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, and in simulation modelling from 12.850 to 2.775 $\text{l}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. The change in permeability coefficient in physical experiment was from 2.386 to 0.054 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$,

and in simulation from 1.940 to 0.044 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$. The adequacy of the developed mathematical description by Fisher's criterion is proved.

A method of manufacturing a membrane by pressing the molding material from a ceramic porous powder was simulated for ordering to control the permeability of the membrane element. It is determined that by adjusting the distribution of plastic deformation of a material by volume of a product, it is possible to change its porosity and permeability. This makes it possible to obtain high strength and durability ceramic products from Al_3O_2 .

The theoretical and experimental results obtained in the thesis are the basis for the design calculations of rational equipment and its elements selection in the process of development of a hardware-technological scheme for the wastewater treatment in food production. In this scheme there was used the ultrafiltration unit based on ceramic filter elements during the purification stage of pre-treated effluents.

The results of the carried out scientific researchers are put into production: at the meat processing enterprise of Company Limited "Solomensky MZP" (act dated 29.10.2019), and also introduced into the educational process of the National University of Food Technologies (act dated 07.10.2019).

Keywords: membrane separation, liquid dispersion systems, deformation of filter elements, ultrafiltration, food industry, processing industries.