

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

БІЛОНОГА ЮРІЙ ЛЬВОВИЧ



УДК 664:661.12]. 021.3

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ  
ПРОЦЕСІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОРГАНОПРЕПАРАТІВ І ПЕРЕРОБЦІ  
ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ М'ЯСОКОМБІНАТІВ**

Спеціальність: 05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Одеса – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Львівській національній академії ветеринарної медицини імені С.З. Гжицького Міністерства аграрної політики України.

**Науковий консультант:** доктор біологічних наук, професор, академік УААН, заслужений діяч науки і техніки України

**Кравців Роман Йосипович,**

Львівська національна академія ветеринарної медицини імені С.З. Гжицького, кафедра ветеринарно-санітарної і радіологічної експертизи, завідувач кафедри, ректор академії.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор

**Бурдо Олег Грягорович,**

Одеська національна академія харчових технологій, кафедра процесів та апаратів, завідувач кафедри;

доктор технічних наук, професор

**Погожих Микола Іванович,**

Харківський державний університет харчування та торгівлі, кафедра енергетики та фізики, завідувач кафедри;

доктор технічних наук, професор

**Мальований Мирослав Степанович,**

Національний університет «Львівська політехніка», кафедра екології та охорони навколишнього середовища, завідувач кафедри.

**Провідна установа:**

Національний університет харчових технологій, кафедра процесів і апаратів харчових виробництв та технології консервування, Міністерство освіти і науки України, м. Київ

Землеробство «*М*» *грудень* 2006 р. о *10*<sup>30</sup> годині  
ради Д 41.088.01 Одеської національної  
сою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112.

бібліотеці Одеської національної  
м. Одеса, вул. Канатна, 112.

2006 р.

ОНАХТ 18.03.11

Інтенсифікація та оп



v017624

К.Г. Іоргачова

*v 017624*  
*с.В. 17624*

ОНАХТ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Технології виготовлення харчових продуктів, напівфабрикатів чи товарів фармацевтичного виробництва передбачають проведення низки фізичних, фізико-хімічних, біохімічних процесів, які протікають у гідромеханічній, дифузійній, реакторній апаратурі. Як правило, ці процеси проходять комплексно, тобто створюють потужну багатофакторну систему, яку неможливо описати тільки теоретичними функціональними залежностями. Тому дослідження в області харчових, фармацевтичних технологій опираються на велику експериментальну базу, яка дає змогу представити вказані залежності у вигляді емпіричних критеріальних рівнянь, що відображають реальну картину взаємодії складних багатокомпонентних і багатофакторних систем.

З приходом ринкових відносин в економіку України особливо відчутні зміни сталися в ціноутворенні, оскільки значну частину собівартості продукції, зокрема продуктів харчування і товарів фармацевтичної промисловості, почали складати енергоносії. Технологічний процес, проведений з максимальною продуктивністю і з мінімальними трудовими та енергетичними затратами – це головна запорука життєдіяльності сучасного підприємства. Особливою актуальністю користуються такі підходи, які направлені на енергозбереження в основних технологічних процесах, а також при функціонуванні допоміжних служб будь-якого виробництва, в тому числі, в агропромисловому комплексі (АПК). В АПК України споживається біля 20% всіх видів енергії, яка використовується в промисловості. При цьому енергоємність національного доходу України приблизно в 3-4 рази вища, ніж в країнах Західної Європи. Крім цього, сучасні м'ясокомбінати та підприємства з переробки вторинної сировини характеризуються низькою інтенсивністю процесів тепломасообміну, високою питомою витратою енергії в хімічних і фармацевтичних виробництвах, зокрема, при виготовленні органопрепаратів з ендокринної сировини.

Традиційним методом інтенсифікації тепломасопереносу є збільшення швидкості руху потоків теплоносіїв та екстрагентів. Однак, такий підхід веде до зростання гідравлічного опору системи, тобто до зростання енерговитрат. Виходячи з цього, пошук нових можливостей інтенсифікації та оптимізації технологічних процесів харчових, фармацевтичних виробництв є важливою проблемою народного господарства України і потребує детального вивчення та втілення в промисловість. Оскільки, базою будь-якої технології є фізичні і фізико-хімічні процеси, а також раціональне конструювання апаратури для їх проведення, то питання інтенсифікації тепломасообмінних процесів на основі зміни умов контактування окремих фаз при вагомій економії енергоресурсів, є особливо актуальними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукові дослідження дисертаційної роботи проводилися в рамках науково – дослідних робіт кафедри загальнотехнічних дисциплін Львівської національної академії ветеринарної медицини імені С.З. Гжицького "Розробка, удосконалення і автоматизація енергоекологічнозберігаючих технологічних процесів матеріалів та вузлів харчової і переробної промисловості" (№ держреєстрації 0102U001340 і 0102U001322) з 1994 по 2005 рік.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є розробка ефективних методів інтенсифікації та оптимізації тепломасообмінних процесів і апаратури, алгоритмів і методів її розрахунку при виробництві органопрепаратів і при переробці вторинної сировини м'ясокомбінатів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні проблеми і завдання:

- аналіз аналітичних та емпіричних функціональних залежностей розрахунку теплового та дифузійного опору на границі контактування фаз тверде тіло-рідина (стінка трубопроводу - потік рідини, тверда частинка - екстрагент, тощо);

- встановлення втрат теплоти та електроенергії при екстракції органопрепаратів з ендокринної сировини та при рідинних процесах переробки шкур забійних тварин на шкіропереробних підприємствах;

- пошук нових критеріїв оцінки ефективності роботи екстракційної апаратури при дії гравітаційних чи відцентрових сил, зокрема в умовах псевдозрідженого шару в системі тверде тіло – рідина (ТТ- Р);

- розробка нового алгоритму розрахунку масообмінної апаратури для оптимізації процесу екстракції при виготовленні лікарських форм з сировини тваринного та рослинного походження, зокрема в умовах псевдозрідженого шару;

- пошук нових способів інтенсифікації тепломасообмінних процесів в харчових та фармацевтичних виробництвах для збільшення їх енергоефективності.

*Об'єкт досліджень:* гідромеханічні процеси осадження, фільтрування, псевдозрідження, переміщування та апаратура для їх забезпечення при переробці ендокринної сировини, рідкофазних харчових продуктів і в рідинних процесах переробки шкіряного напівфабрикату.

*Предмет дослідження:* механізм інтенсифікації тепломасоперенесення, способи та апаратура для його забезпечення на межі контакту стінка трубопроводу – потік, тверда частинка – екстрагент при тепловій обробці рідкофазної харчової сировини та при екстракції органопрепаратів з подрібненої ендокринної сировини в умовах гравітаційного та відцентрового осаджування.

*Методи досліджень:* метод комп'ютерного експерименту, метод аналізу розбіжностей в теорії подібності, експериментальні дослідження з використанням контрольовано-вимірною апаратури, статистичні методи обробки експериментальних даних.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В результаті проведених досліджень створені науково-технологічні основи для інтенсифікації та оптимізації цілої ряду технологічних процесів з метою зменшення їх енергоспоживності, зокрема при виготовленні органопрепаратів та рідкофазних харчових продуктів. В даній дисертаційній роботі вперше:

Запропонована нова наукова концепція розгляду гідромеханічних процесів осадження, фільтрування, переміщування, псевдозрідження, а також руху рідин в трубопроводах чи апаратах з урахуванням дії сил поверхневого натягу на границі контакту ТТ-Р. Показано, що в межах приграничного  $L$  шару поверхнєве число є співмірним з числом Ейлера, яким не можна нехтувати при складанні критеріальних рівнянь.

На основі силового аналізу елементарного об'єму рідини з урахуванням сил поверхневого натягу в  $L$  шарі на границі ТТ-Р - стінка трубопроводу – потік, а також при осадженні твердої частинки в рідкому середовищі, аналітично виведені рівняння для розрахунку товщини цього  $L$  шару, введене поняття турбулізації ламінарного ( $L$ ) шару і коефіцієнта турбулізації  $L$  плівки. Методом комп'ютерного експерименту та методом розмірностей виведений параметр оптимізації дифузійних процесів, зокрема розчинення та екстракції в полі гравітаційних і відцентрових сил.

На основі виведеного параметру запропоновані співвідношення для розрахунку пріоритетної товщини приграничного  $L$  шару, що виникає при турбулентному ( $T$ ) осадженні твердої частинки, при якій вихід екстракту проходить максимально інтенсивно в полі гравітаційних та відцентрових сил. Виведені також співвідношення для розрахунку пріоритетного середнього діаметра подрібнення твердої або диспергування рідкофазної сировини за максимальної інтенсивності багатостадійних дифузійних процесів в системі ТТ - Р або рідина – рідина (Р – Р).

Розроблений алгоритм розрахунку дифузійної апаратури, зокрема екстракторів з псевдозрідженим шаром, а також змішувально – відстійних екстракторів, які забезпечують максимальну інтенсивність процесу при мінімальній енергоємності.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

На основі нових наукових підходів розраховані кожухотрубні та пластинкові теплообмінники з урахуванням теплового опору приграничного  $L$  шару на межі потік - стінка.

Розроблено спосіб підвищення коефіцієнта теплопередачі теплообмінної апаратури за рахунок зменшення коефіцієнта поверхневого натягу теплоносіїв з використанням поверхнево-активних речовин (ПАР).

Розроблено та захищено патентами ряд способів інтенсифікації дифузійних процесів, зокрема при виробництві органопрепаратів інсуліну, аденозинтрифосфорної кислоти (АТФ), адренкортикотропного гормону (АКТГ), панкреатину, хонсуриду, силеніну.

Розроблений алгоритм вибору пріоритетних параметрів подрібнення ендокринної сировини перед екстрагуванням, а також пріоритетних параметрів перемішування або псевдозрідження в екстракторах за максимальної інтенсифікації та оптимізації дифузійних процесів з мінімальними енергозатратами.

Розроблені апарати, їхні конструктивні елементи та схеми їх ввімкнення для ефективного проведення дифузійних процесів, зокрема, екстракції при виробництві органопрепаратів з одночасним використанням псевдозрідження та перемішування, що захищені патентами.

Виробниче випробування методів інтенсифікації розчинопоглинання в шкіряно-хутровому виробництві та методів інтенсифікації екстракції при виробництві субстанції інсуліну проведено на підприємствах України (Львівському шкіряному підприємстві "Світанок", на ДП ЗАТ "Біохімфарма"- "Основа" і на підприємстві "Дуліби", Гошанського району Рівненської області).

Новизна практичних розробок захищена патентами України на винахід: № 75715; № 75736, деклараційними патентами України на винахід № 53421;

№ 55103; № 56795; № 59263; № 62393; № 63580; № 64364, деклараційними патентами України на корисну модель № 11323; № 13519; № 13913; 14491 та заявкою на деклараційний патент № U 2006 02485 від 1.06.06.

**Особистий внесок здобувача** полягає в розробці основної концепції дисертаційної роботи, а також в постановці основної мети і задач дослідження. Всі теоретичні та експериментальні дослідження були виконані особисто автором. Автору належить аналіз та узагальнення літературних даних, а також отриманих ним результатів в процесі виконання дисертаційної роботи. Деякі експериментальні дослідження були виконані у співавторстві з колегами кафедри загальнотехнічних дисциплін Львівської національної академії ветеринарної медицини імені С.З. Гжицького, що відображено у сільських публікаціях. Питання, що пов'язані з функціонуванням наукової лабораторії процесів та апаратів харчових виробництв, а також основні наукові положення, що стосуються заявок на патенти України за тематикою виробництва органопрепаратів, здійснювалися при безпосередній участі наукового консультанта дисертаційної роботи, доктора біологічних наук, академіка УААН, професора Кравціва Романа Йосиповича.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та схвалені на Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні проблеми ветеринарії, медицини, зооінженерії та технології продуктів тваринництва" (Львів, 1997); VI Міжнародній науково - практичній конференції "Сучасні інформації і енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини. СИЭТ6-99" (Харків, 1999); Міжнародній науково-технічній конференції "Землеробська механіка на рубежі сторіч" (Мелітополь, 2001); Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та спеціалістів «Молоді вчені у вирішенні проблем аграрної науки і практики» (Львів -2003); 64-й науковій конференції (Одеса, 2004); V-ому Симпозіумі Україна – Австрія /Сільське господарство: Наука і практика (Київ - 2004); IX-й міжнародній науково-технічній конференції "Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогоднішня і перспективи" (Київ, НУХТ-2005); Міжнародній науковій конференції "Інноваційний розвиток сучасного аграрного виробництва" (Львів, ЛНАВМ імені С.З. Гжицького -2005); V-й Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв" Харків, ХНТУСГ імені Петра Василенка - 2005); 66-й науковій конференції професорсько-викладацького складу Одеської національної академії харчових технологій (Одеса, ОНАХТ - 2006); Міжнародній науково-практичній конференції Інтегровані технології та енергозбереження «ІТЭ-2006» (Крим, Алушта – 2006); XI-й Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, ОНАХТ-2006); Міжнародній науково-технічній конференції «Стан і перспективи розвитку сучасних технологій і обладнання переробних і харчових виробництв» (Вінниця, ВДАУ-2006).

**Публікації.** За результатами поданих в дисертаційній роботі досліджень опубліковано 42 наукових праці, з них 26 у фахових виданнях, в тому числі 2 патенти на винахід, 7 деклараційних патентів на винахід, 4 деклараційних патенти на корисну модель та 1 заявка на винахід, а також 2 публікації у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел із 219 найменувань ( 21 стор.) та 2 додатків (17 стор.). Робота викладена на 322 сторінках основного тексту, що містять 64 рисунки (16 стор.) та 23 таблиці (8 стор.).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладена актуальність теми дисертаційної роботи, показані мета та задачі, а також описані об'єкти і методи досліджень, висвітлена наукова новизна, практичне значення та особистий внесок автора, представлена апробація дисертаційної роботи та її структура, подана кількість публікацій.

У першому розділі зроблена загальна характеристика гідромеханічних, тепломасообмінних процесів з урахуванням приграничного  $L$  шару на межі контакту  $TT - P$ , представлені теоретичні залежності для розрахунку товщини цього шару в пристінній області трубопроводу, а також при осадженні твердої частинки в рідкому середовищі.

Подані основні особливості кінетики руху рідин в капілярах, представлені ряд закономірностей Лапласа, Жюрена, Хагена - Пуазейля, Кавказова, Ушборна, Гібса, які пов'язують фізичні характеристики середовища з висотою та швидкістю піднімання рідини, а також тиском в капілярі.

Проаналізовано процес фільтрування з позицій проходження рідини через систему капілярів, представлені ряд рівнянь для визначення швидкості фільтрування, які не враховують гідрофільності чи гідрофобності поверхні змочування.

Висвітлений гідромеханічний процес псевдозрідження, представлені відомі емпіричні закономірності для визначення пріоритетних середніх діаметрів подрібнення твердої та диспергування рідкої сировини за максимальної інтенсивності процесів, зокрема теплообміну в системі тверде тіло-газ ( $TT - G$ ) та масообміну в системі рідина - рідина ( $P - P$ ). Вказано на відсутність у літературних джерелах узагальнюючих підходів для пошуку пріоритетних параметрів псевдозрідженого шару, що пов'язані з оптимізацією параметрів подрібнення твердої сировини, зокрема перед екстракцією, для максимальної інтенсивності дифузійного процесу в системі  $TT - P$  при мінімальних енергозатратах.

Розглянуто гідромеханічний процес перемішування в системі  $TT - P$ , представлені відомі критеріальні залежності для вибору перемішуючих пристроїв необхідної потужності та частоти обертання. Вказано на відсутність в літературних джерелах узагальнюючих підходів для пошуку оптимізації параметрів перемішування, а також алгоритмів вибору відповідної змішувально-відстійної апаратури в системі  $TT - P$ , що пов'язані з оптимізацією параметрів подрібнення твердої сировини для можливості максимальної інтенсивності дифузійного процесу при мінімальних енерговитратах.

У другому розділі висвітлені основні методичні аспекти досліджень, описана будова та принципи роботи стенду гідромеханічних та тепломасообмінних процесів для експериментальних досліджень (рис.1). Стенд складається з таких основних вузлів:

1 – напірний бак; 2 – електричнагрівач, 3 – трубопровід подачі гарячого теплоносія, 4 – термометр для холодного теплоносія, 5 – термометр для гарячого теплоносія, 6 – макет кожухотрубного теплообмінника, 7 – мірний бак; 8 – прозора трубка, 9 – шкала, проградуєвана в м<sup>3</sup>, 10 – колба для осадження та псевдозрідження в системі ТТ-Р, 11 – термометр, 12 – термометр; 13 – вентиль, 14 – вентиль подачі теплоносія в теплообмінник, 15 – трубопровід подачі холодного теплоносія, 16 – фільтр, 17 – насос, 18 – металева решітка.

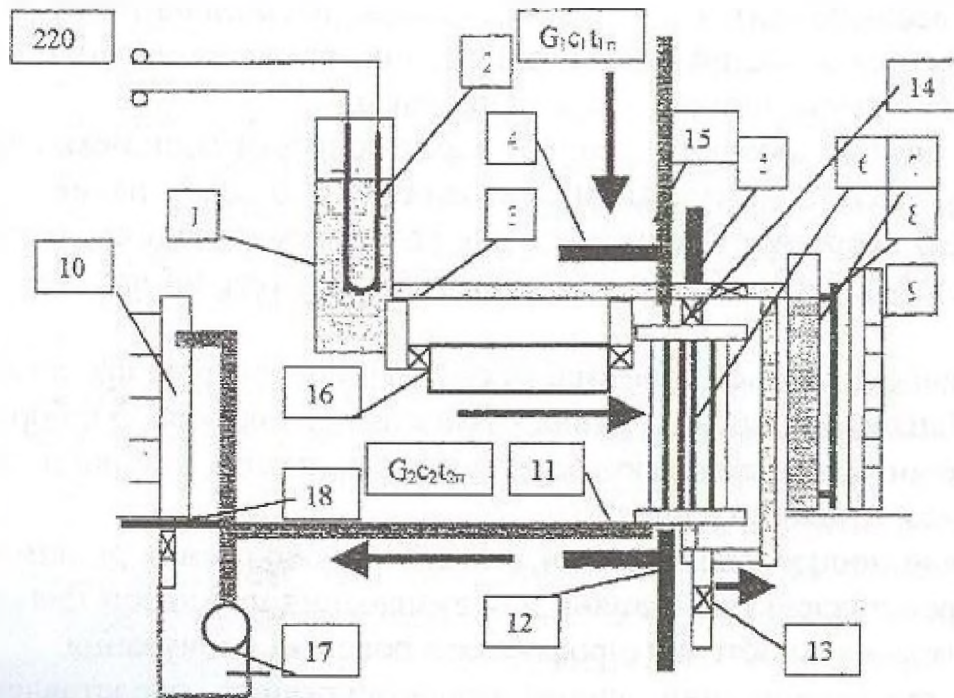


Рис.1. Схема стенду гідромеханічних та тепломасообмінних процесів

Для визначення інтенсивності водо- та розчинопоглинання шкур прісно-сухого консервування використовували зразки діаметром  $5 \cdot 10^{-3}$  м, що вирізалися з куска шкіри. Зразки зважувалися на вазі торсійній до та після поглинання. Швидкість розчинопоглинання розраховувалася за робочою формулою:  $N_E = \frac{m_B - m_C}{m_C} 100\%$ ,

де  $N_E$  – розчинопоглинання, %;  $m_B$  – маса зразка після водопоглинення, кг;  $m_C$  – маса сухого зразка, кг.

Для визначення інтенсивності екстракції в системі ТТ-Р використовували поляриметр круговий СМ-3.

Основні фізичні характеристики розчинів, екстрагентів (коефіцієнти поверхневого натягу, в'язкості та густину) міряли за стандартними методиками із залученням методів статистичної обробки. Гідрофільність поверхні твердих тіл визначали за допомогою цифрової фотографії вимірюванням кута змочування.

В третьому розділі зроблені теоретичні узагальнення літературних даних в таких основних напрямках:

- системний аналіз теплобмінних процесів і оптимізація режимів на стадії підготовки рідкофазної сировини;

- підвищення ефективності процесів теплообміну за рахунок зміни структури гідродинамічного приграничного шару за допомогою ПАР.

Сформульовано механізм інтенсифікації теплообмінних процесів, який полягає в наступному:

- на границі ТТ - Р - (стінка трубопроводу потік) формується приграничний Л шар товщиною  $\delta$ ;

- товщина Л приграничного шару  $\delta$  визначає тепловий опір системи;

- відомі аналітичні залежності по визначенню товщини Л шару  $\delta$  не враховують коефіцієнта поверхневого натягу рідини і гідрофільності поверхні змочування ( $\sigma \cdot \cos\theta$ );

- фізична суть концепції - на основі функціональної залежності: товщина приграничного Л шару є функцією від коефіцієнта поверхневого натягу та гідрофільності поверхні змочування теплоносіями ( $\delta = f(\sigma \cdot \cos\theta)$ ) можна керувати процесами теплообміну.

Представлений розрахунок загального коефіцієнта теплопередачі при теплової обробці виноградного соку, а також вершків. Показано, що тепловий опір середовищ на 98% концентрується в приграничних Л шарах по різні сторони рекуперативної стінки теплообмінника. Запропоноване співвідношення для розрахунку загального коефіцієнта теплопередачі.

$$K = \frac{1}{\delta_1/\lambda_1 + b/\lambda + \delta_2/\lambda_2}, \quad (1)$$

де  $K$  - загальний коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $\delta_1, \delta_2, b$  - товщини Л шарів Р1 і Р2 і металевій розділній стінки відповідно,  $\text{м}$ ;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda$  - коефіцієнти теплопровідності Л шарів Р1, Р2 і металевій стінки відповідно,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ .

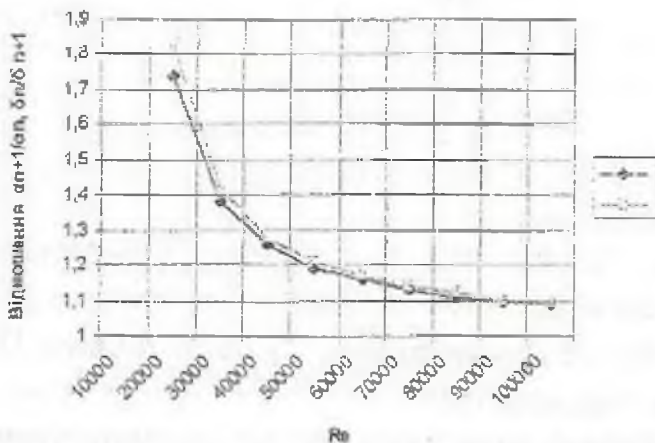


Рис. 2. Кореляція відношень  $\alpha_{n+1}/\alpha_n$  і  $\delta_n/\delta_{n+1}$  зі зростанням числа  $Re$

відношення  $\alpha_{n+1}/\alpha_n$  на 98% обернено пропорційні відношенням  $\delta_n/\delta_{n+1}$  (рис.2), де  $n$ -число Рейнольдса в діапазоні  $Re=10^4-10^5$ . Відношення  $\alpha_{n+1}/\alpha_n$  розраховані з відомих критеріальних рівнянь для Т режиму руху води. Аналогічна ситуація спостерігається для води при інших температурах, а також для інших теплоносіїв.

Зроблено силовий аналіз елементарного об'єму в Л приграничному шарі Р, що рухається в трубопроводі з Т режимом. В межах Л шару на елементарний об'єм

При Т режимі руху теплоносіїв в трубопроводах чи каналах коефіцієнти тепловіддачі теплоносіїв на 98% залежать від числа Рейнольдса, оскільки в критеріальних рівняннях  $Re$  має найвищу степінь. Наприклад, для трубопроводу діаметром  $d = 25 \cdot 10^{-3}$  м, по якому рухається вода з температурою  $80^\circ\text{C}$ , зміна коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  зі збільшенням числа

Рейнольдса в діапазоні  $Re = 10^4-10^5$  з кроком  $10^3$  обернено пропорційна зміні товщини Л шару  $\delta$ , тобто

діють сили (рис. 3): - сила поверхневого натягу рідини:  $F_n = 2\pi(dx)\sigma \cdot \cos\theta$ ; - сила тяжіння:  $mg = \rho \cdot g(dx dy dz)$ ; - сила тертя:  $T = \mu \frac{d^2 V_z}{dx^2} (dx dy dz)$ ; - сила інерції:  $ma = \rho \frac{dV_z}{d\tau} (dx dy dz)$ ; - сила тиску:  $P = - \frac{dp}{dz} (dx dy dz)$ ,  
 $P_2 = (p + \frac{dp}{dz} dz)(dx dy)$  - сила тиску, що діє на верхню грань елементарного об'єму, Н;  
 $P = P_1 - P_2 = p(dx dy) - (p + \frac{dp}{dz} dz)(dx dy) = - \frac{dp}{dz} (dx dy dz)$  - сила тиску, що діє на елементарний об'єм, Н;

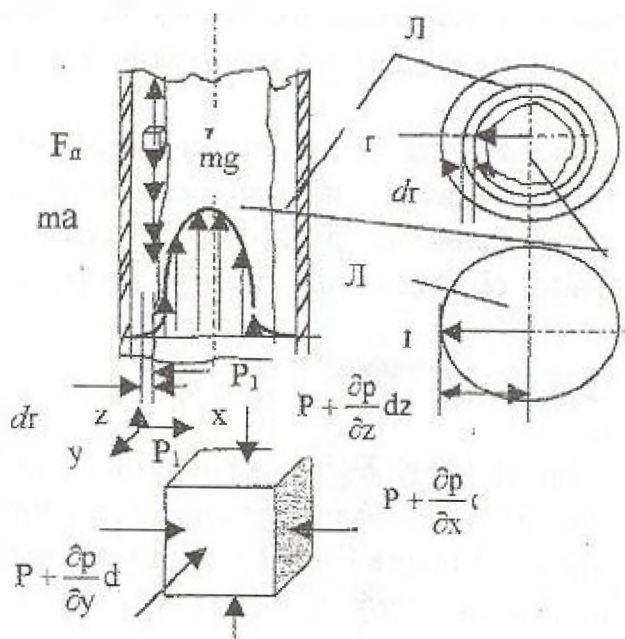


Рис.3. Схема силового поля, що діє на елементарний об'єм рідини в Л шарі

$T$  - сила тертя, віднесена до одиниці поверхні, Н/м<sup>2</sup>;  $T(dy dz)$  - сила тертя, що діє на грань елементарного об'єму, Н;  $(T + \frac{dT}{dx} dx)(dy dz)$  - сила тертя, що діє на протилежну грань, Н;

$R = - T(dy dz) + (T + \frac{dT}{dx} dx)(dy dz) =$

$\frac{dT}{dx} (dx dy dz)$  - результуюча сила тертя,

яка діє на елементарний об'єм зі сторони рідини, Н;  $T = \mu \frac{dV_z}{dx}$  - за законом

Ньютона, Н; Звідси,

$ma = \rho \frac{dV_z}{d\tau} (dx dy dz)$  - сила інерції, Н;

$T = \mu \frac{d^2 V_z}{dx^2} (dx dy dz)$ ;

$V_z$  - швидкість в пристінних шарах рідини, м/с;  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу рідин, Н/м;  $l$  - лінійний параметр елементарного об'єму, м;  $\rho$  - густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\mu$  - динамічна в'язкість рідини, Пас;  $\tau$  - час, с;  $\cos\theta$  - поверхнева гідрофільність твердого тіла.

За прийнятом Д'Аламбера, алгебраїчна сума всіх сил, що діє на елементарний об'єм, рівна силі інерції. Скорочуючи на  $(dx dy dz)$ , отримали співвідношення:

$$2\pi(dx)\sigma \cdot \cos\theta / (dx dy dz) + \rho g - \frac{dp}{dz} + \mu \frac{d^2 V_z}{dx^2} = \rho \frac{dV_z}{d\tau} \quad (2)$$

Викреслюємо у цьому диференціальному рівнянні символи диференціювання та напрямку, а лінійні параметри елементарного об'єму  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  замінимо на  $l$ .  $\frac{dV}{dt} \approx \frac{V}{l}$ , а  $\frac{dV}{d\tau} \approx \frac{V}{\tau}$  - виходячи з теорії подібності, враховуючи що швидкість руху рідини, а також лінійний параметр  $l$  в межах Л шару є дуже малими величинами.

Поділивши праву та ліву частини рівняння (2) на доданок  $\frac{\rho V}{\tau}$ , отримали наступні критерії, в які підставляли фізичні характеристики для води за нормальних умов. Швидкість в пристінних шарах трубопроводу приймали згідно літературних даних -  $V_z \approx 0,1$  м/с:

$$1. \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta \cdot \tau}{\rho V \cdot l^2} = \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta \cdot \mu}{\rho V^2 \cdot l \cdot \mu} = \frac{1}{N} \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{\mu V_z} \approx \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0725 \cdot 0,5}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1} \approx 228$$

- поверхнєве число в Л шарі;

$$2. Eu = \frac{\rho \tau}{\rho V \cdot l} = \frac{\Delta p}{\rho V_z^2} \approx \frac{100000}{1000 \cdot (0,1)^2} \approx 10000 - \text{число Ейлера в Л шарі};$$

$$3. Fr = \frac{\rho g \tau}{\rho V} = \frac{g \tau \cdot l}{V \cdot l} = \frac{g \cdot l}{V_z^2} \approx \frac{10 \cdot 8}{(0,1)^2} \approx \frac{10 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{(0,1)^2} \approx 0,3 - \text{число Фруда в Л шарі};$$

$$4. \frac{\mu V \tau}{l^2 \rho V} = \frac{\mu}{l \cdot \rho V_z} = \frac{1}{Re} \approx \frac{10^{-3}}{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 0,1} \approx 0,033 - \text{обернене число Рейнольдса,}$$

де  $N$  - видозмінене число Рейнольдса в Л шарі ( $N = \frac{\rho V_z l}{\mu} \approx 10,47 - 11,5$ ).

Введене поняття коефіцієнта турбулізації Л шару:

$$K_\tau = Re / Re_{кр}, \quad (3)$$

де  $K_\tau$  - коефіцієнт турбулізації Л шару;  $Re$  - робоче значення числа Рейнольдса;  $Re_{кр}$  - критичне значення числа Рейнольдса для руху рідини в трубопроводі ( $Re_{кр} \approx 2320$ ).

Числами Фруда та оберненим числом Рейнольдса нехтували, оскільки це величини, що на 4-5 порядків менші від числа Ейлера та поверхнєвого числа в Л шарі. Нехтуючи також одиницею в отриманому критеріальному рівнянні і проінтегрувавши його відносно змінної величини - радіуса трубопроводу, отримали формулу для визначення товщини Л шару:

$$\delta = \sqrt{\frac{D \cdot \sigma \cos\theta}{\Delta p}} \cdot Re / Re_{кр}, \quad (4)$$

де  $\delta$  - товщина Л шару, м;  $\Delta p$  - спад напору по довжині трубопроводу, Па;  $D$  - діаметр трубопроводу, м.

Фізичний зміст інтегрування в даній системі полягає в тому, що Л шівка сумується по всьому "живому перерізу" трубопроводу. Тоді маємо граничний випадок, тобто межю переходу потоку від ламінарного до перехідного (II) режиму, де товщина Л шару дорівнює радіусу потоку  $r = D/2$ , а коефіцієнт турбулізації -  $K_\tau = 1$ , тобто  $Re = Re_{кр} = 2320$ .

Оскільки товщина Л шару є визначальною у формуванні теплового опору системи, згідно рівності (4), запропоновано зменшувати коефіцієнт поверхнєвого нагряду теплоносіїв в теплообмінній апаратурі за допомогою ПАР.

Проведена серія експериментів для зменшення коефіцієнта поверхнєвого нагряду  $\sigma_{1,2}$ , косинуса кута змочування  $i$  в'язкості теплоносія (води при температурі

20<sup>0</sup>С) під дією ПАР. В ролі ПАР використовувався сульфонат натрію при різних концентраціях. Мінімальне значення поверхневого натягу води досягалося при концентрації в цій ПАР 0,026 мас.%. При даній концентрації  $\sigma_{1-2}$  зменшується в 1,85 раз в порівнянні з водою. Мінімальне значення динамічної в'язкості води спостерігається при концентрації ПАР 0,026 мас.%, де  $\mu$  зменшується в 1,25 раз в порівнянні з водою. Під дією ПАР зменшувався кут змочування з 30<sup>0</sup> до 20<sup>0</sup>, що приводило до збільшення гідрофільності поверхні  $\cos\theta$ .

Аналогічні експерименти проведені для теплоносія – молока, де в якості ПАР використовували лляну олію. Мінімальне значення коефіцієнта поверхневого натягу молока спостерігається при концентрації 0,010 мас.% лляної олії. Ці дані узгоджуються з літературними. При заданій концентрації коефіцієнт поверхневого натягу зменшується в порівнянні з молоком в 1,31 рази, а коефіцієнт динамічної в'язкості - в 1,3 рази. При більших концентраціях зміна динамічної в'язкості була незначною. Для нормалізованого кожухотрубного теплообмінника ( $D = 800$  мм,  $d = 25$  мм,  $n = 56$ ,  $z = 6$ ,  $\pi = 196$ ,  $l = 3$  м,  $S = 46$  м<sup>2</sup>) було розраховано коефіцієнт теплопередачі  $K$  для двох випадків: при відсутності і додаванні ПАР до теплоносіїв. Холодний теплоносій – молоко (початкова температура  $t_{1п} = 15^0$ С), гарячий теплоносій – вода (початкова температура  $t_{2п} = 95^0$ С) і холодний носій – молоко + 0,010 мас.% лляної олії, гарячий носій – вода + 0,026 мас.% сульфонату натрію. Коефіцієнт теплопередачі  $K$  розраховували за формулою (1). Результати представлені в таблиці (1).

Загальний коефіцієнт теплопередачі теплообмінника збільшився на 38%. Аналогічні розрахунки проводились для декількох нормалізованих теплообмінників, де коефіцієнт  $K$  при наявності ПАР в обох теплоносіях збільшувався в діапазоні 33-38%.

Таблиця 1

## Зміна теплофізичних параметрів теплоносіїв під впливом ПАР

Параметри	Молоко	Вода	Молоко + 0,010 мас.% ПАР	Вода + 0,026 мас.% ПАР
$\mu_{30}$ , Па·с	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$0,345 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$
$\sigma$ , Н/м	$5,21 \cdot 10^{-2}$	$6,36 \cdot 10^{-2}$	$4,02 \cdot 10^{-2}$	$3,68 \cdot 10^{-2}$
Re	10426	16103	13611	18335
$\delta_{пл}$ , м	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$5,98 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$4,12 \cdot 10^{-4}$
$\frac{\delta_{пл}}{\lambda_{пл}}$ , м <sup>2</sup> /К $\lambda_{пл}$ , Вт/м	$3,97 \cdot 10^{-1}$	$8,93 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-4}$	$6,15 \cdot 10^{-4}$
$K$ , $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	712		984	

Проведений розрахунок кожухотрубного теплообмінника, в якому вода з температурою  $t_{1п} = 20^0$ С і витратою  $G_1 = 12$  кг/с нагрівалась до температури  $t_{1к} = 50^0$ С. Нагрівник - вода з початковою температурою  $t_{2п} = 90^0$ С. Кінцева температура гарячого теплоносія  $t_{2к} = 60^0$ С. Розрахунок теплообмінника зроблений за класичною схемою, тобто з використанням критеріального рівняння для Т режиму руху теплоносія в трубному просторі та з використанням критеріального рівняння для міжтрубного простору ( $Nu_2 = 0,24 \cdot Re_2^{0,6} \cdot Pr^{0,36}$ ), дав результат -  $K_K = 795$  Вт/м<sup>2</sup>К, а за схемою з вико-

ристанням формул (4) і (1) -  $K_M=788 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ . За розрахунками, які набагато простіші за попередні, отримали ідентичний теплообмінник. Був здійснений розрахунок цього ж теплообмінника за модернізованою схемою при умові використання води з додаванням 0,026 мас.% ПАР. При цьому загальний коефіцієнт теплопередачі зріс до значення  $K'_M=886 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ , тобто на  $(\Delta_M = \frac{886-788}{788} 100\%) = 12\%$ .

Даний розрахунок перевірявся нами експериментально на стенді гідромеханічних процесів (рис. 1), де визначалося експериментальне значення коефіцієнта теплопередачі макету кожухотрубного теплообмінника при використанні в якості холодного та гарячого теплоносіїв - води. У другому випадку до холодного теплоносія додавали ПАР (розчин сульфонату натрію) в кількості 0,026 мас.%. Отримали два експериментальних значення коефіцієнтів теплопередачі  $K_E=810 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  і  $K'_E=899 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ , тобто для води, та води з додаванням ПАР, відповідно. Експеримент співпав з теоретичними розрахунками для води з похибкою в  $(\Delta_E = \frac{810-788}{788} 100\%) = 2,8\%$ , а для води з додаванням ПАР -  $(\Delta'_E = \frac{899-886}{886} 100\%) = 1,5\%$ .

Розглянуто кінетику руху рідини у відкритому та закритому капілярах. Виведено формулу (5) для розрахунку швидкості мимовільного піднімання рідини у відкритому вертикальному капілярі та співвідношення (6) для визначення числа Рейнольдса:

$$V = \frac{\mu \left[ \sqrt{1 - \frac{4\pi \cdot \rho \sigma D^2 \cos\theta}{\mu^2 l} \left( \frac{g/D\rho}{\pi \cdot \sigma \cos\theta} - 1 \right)} - 1 \right]}{2\rho D}, \quad (5)$$

$$Re = \frac{\sqrt{1 - \frac{4\pi \cdot \rho \sigma D^2 \cos\theta}{\mu^2 l} \left( \frac{g/D\rho}{\pi \cdot \sigma \cos\theta} - 1 \right)} - 1}{2}, \quad (6)$$

де  $V$  - швидкість руху рідини у відкритому вертикальному капілярі, м/с;  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м;  $\cos\theta$  - гідрофільність поверхні;  $\mu$  - динамічна в'язкість рідини, Па·с;  $D$  - діаметр капіляру, м;  $l$  - висота піднімання рідини в капілярі, м;  $\rho$  - густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  - прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ .

Розглянуто кінетику руху рідини в закритому капілярі. Виведено формулу для розрахунку швидкості руху рідини в закритому капілярі:

$$V = \frac{\sigma \cos\theta}{8\mu l} \left( 1 - \frac{g l \rho}{4\sigma \cos\theta} - \frac{P_0 d}{4\sigma \cos\theta} \left( \frac{h}{h-l} \right) \right), \quad (7)$$

де  $h$  - висота капіляру, м;  $P_0$  - атмосферний тиск, Па.

Розчинопогливання капілярами має важливе значення в технології переробки шкіри та хутра. Розглянуті відмочувально-зольні процеси при переробці шкур прісно-сухого консервування з точки зору капілярних явищ.

Пористість шкіри складає 40-60%. Причому, макронори з діаметром капілярів  $d=(20-40) \cdot 10^{-6}$  м мають 45% всього об'єму пор. Середні пори з діаметром капілярів  $d=(0,1-4) \cdot 10^{-6}$  м займають біля 45% об'єму всіх пор, а мікропори з діаметром

$d=(0,05-0,1) \cdot 10^{-6}$  м - 10%. Питома площа поверхні шкіри велика-біля 40000 м<sup>2</sup>/кг, тому водопоглинання шкіри є високим і складає за 24 години 50-80%.

Числовим методом розраховані швидкості піднімання води в капілярах голими діаметрами  $d = (20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200) \cdot 10^{-10}$  м. Висота піднімання води -  $l = 5 \cdot 10^{-3}$  м. Для температури ( $t=20$  °С) отримали наступні результати:  $V_{20A}=0,3$ ;  $V_{40A}=0,63$ ;  $V_{60A}=0,94$ ;  $V_{80A}=1,26$ ;  $V_{100A}=1,57$ ;  $V_{120A}=1,87$ ;  $V_{140A}=2,2$ ;  $V_{160A}=2,5$ ;  $V_{180A}=2,8$ ;  $V_{200A}=3,15$  [ $\cdot 10^{-5}$  м/с].

Згідно розподілу пор в загальному об'ємі шкіри розрахована маса води, яка увійшла у капіляри протягом 300 с за формулою  $M = V \cdot S \cdot t \cdot \rho$ : де  $M$ —маса води, кг;  $V$ —швидкість піднімання води в капілярі, м/с;  $S$ —площа «живого перерізу» капілярів, що припадає на одиницю маси шкіри, м<sup>2</sup>/кг;  $t$  — час водопоглинення - 300 с — густина води - 998 кг/м<sup>3</sup>:

$M_{20A}=0,0182$ ;  $M_{40A}=0,0262$ ;  $M_{60A}=0,0282$ ;  $M_{80A}=0,0188$ ;  $M_{100A}=0,0235$ ;  $M_{120A}=0,0279$ ;  $M_{140A}=0,0329$ ;  $M_{160A}=0,0299$ ;  $M_{180A}=0,0335$  [кг/кг].

Загальна маса води, що поглинула шкіра за 300 с складає суму цих мас і становить 48,5%, тобто водопоглинання шкіри  $H_T$ , що визначене теоретично.

Проводилися експериментальні дослідження по водопоглинанню зразків шкіри прісно-сухого консервування. Водопоглинання  $H_E$  визначалося нами за робочою формулою. В чотирьох дослідях водопоглинання протягом 300 с складо:  $H_{E1}=45,5\%$ ;  $H_{E2}=48\%$ ;  $H_{E3}=49,43\%$ ;  $H_{E4}=50,52\%$ , що добре узгоджується з комп'ютерним експериментом (табл.2).

Таблиця 2

## Водопоглинання зразків шкіри ВРХ при застосуванні ПАР

Варіанти застосування розчинів	Маса зразка до водопоглинання $m_1 \cdot 10^{-6}$ , кг	Маса зразка після водопоглинання $m_2 \cdot 10^{-6}$ , кг	Водопоглинання $H_T = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%$	Тривалість водопоглинання $\tau$ , с
Вода	134	192	45,5	300
	150	195	48,0	1800
	130	223	71,5	3600
	52	92	76,9	57600
Вода + ПАР (0,05 мас.%).	130	201	54,6	300
	86	133	54,6	1800
	131	227	73,3	3600
	187	346	85,0	57600
Вода + ПАР (0,1 мас.%).	139	215	57,5	300
	77	127	64,9	1800
	118	205	73,7	3600
	126	232	84,1	57600

При підвищенні температури до 50°С швидкість водопоглинання зростає. Числовим методом розраховано швидкість руху води у відкритому капілярі діаметром  $D=100 \cdot 10^{-6}$  м довжиною  $l=5 \cdot 10^{-3}$  м в діапазоні температур (10-50) °С:

$V_{10}=4,92 \cdot 10^{-6}$ ;  $V_{20}=6,81 \cdot 10^{-6}$ ;  $V_{30}=8,96 \cdot 10^{-6}$ ;  $V_{40}=11,58 \cdot 10^{-6}$ ;  $V_{50}=14,61 \cdot 10^{-6}$  [м/с].

Комп'ютерний розрахунок показав, що для попередніх параметрів капіляру при температурі розчину  $20^{\circ}\text{C}$  з додаванням ПАР у воду, коли  $\sigma_{2,1} = 0,0378$  Н/м, швидкість руху рідини в капілярі  $V = 15,906 \cdot 10^{-6}$  м/с - перевищує при температурі  $50^{\circ}\text{C}$ , що говорить про можливість суттєвого підвищення швидкості розчинопоглинання під впливом ПАР. Проведена серія експериментів на зразках із шкіри ВРХ прісно-сухого консервування. При цьому зразки піддавалися водопоглинанню у воді, в розчині ПАР (0,05 мас%) і в розчині ПАР (0,1 мас.%) протягом 5хв, 30 хв, 60 хв і 16 год. При використанні розрахункових даних з формул 5, 6, 7 можна прогнозувати пріоритетний гідродинамічний режим в технологіях шкіряного та хутрового виробництв, який забезпечить швидке розчинопоглинання без значних енергетичних затрат на нагрівання. Експерименти показали вагому інтенсифікацію розчинопоглинання зразками шкіри при додаванні ПАР.

В четвертому розділі зроблені теоретичні узагальнення літературних джерел.

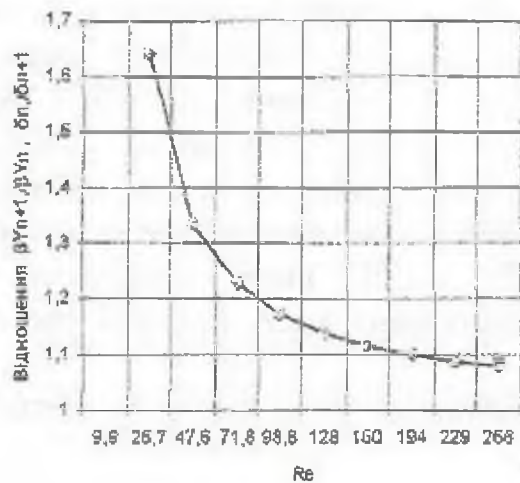


Рис. 4. Кореляція відношень  $\beta_{\gamma_{n+1}}/\beta_{\gamma_n}$  і  $\delta_n/\delta_{n+1}$  зі зростанням числа  $Re$  при осадженні частинки у воді в полі відцентрових сил

- аналіз масообмінних процесів на рівні "сировина – апарат" і оптимізація режимів на стадії підготовки сировини.
- підвищення ефективності процесів масообміну за рахунок зміни структури ламінарного приграничного шару при осадженні, фільтруванні псевдозрідженні, перемішуванні за допомогою ПАР.

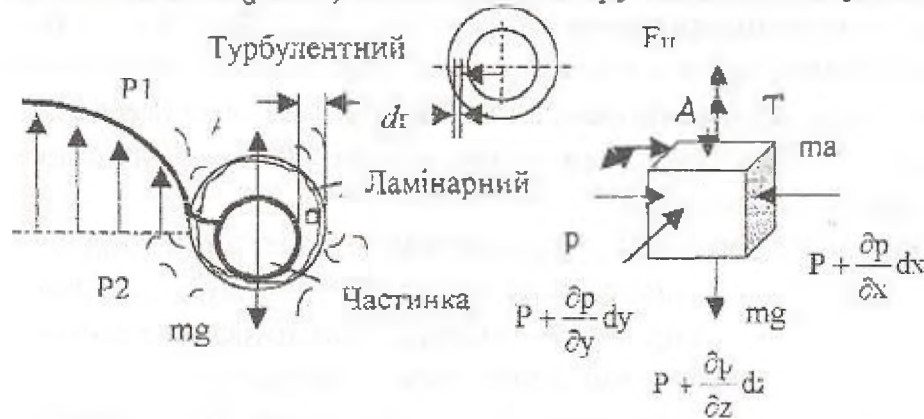
Сформульовано механізм інтенсифікації масообмінних процесів, який полягає в наступному:

- на границі ТТ - Р - (подрібнена частинка, що осаджується - екстрагент) формується приграничний Л шар товщиною  $\delta$ .
  - товщина Л приграничного шару  $\delta$  визначає дифузійний опір системи.
- відомі аналітичні залежності по визначенню товщини Л шару  $\delta$  при осадженні частинки не враховують коефіцієнта поверхневого натягу рідини і гідрофільності поверхні змочування ( $\sigma \cdot \cos\theta$ ).
  - фізична суть концепції – на основі функціональної залежності: товщина приграничного Л шару є функцією від коефіцієнта поверхневого натягу та гідрофільності поверхні змочування екстрагентами ( $\delta = f(\sigma \cdot \cos\theta)$ ) можна керувати процесами масообміну.

Розрахований процес осадження частинки з середнім діаметром  $d_c = 100 \cdot 10^{-6}$  м і густиною  $\rho_c = 1100$  кг/м<sup>3</sup> у воді з температурою  $t=70^{\circ}\text{C}$  в полі відцентрових сил. Частота обертання ротора центрифуги змінюється в діапазоні  $n = 10^3 - 10^4$  об/хв. Діаметр ротора барабана центрифуги  $D = 0,12$  м. Показано, що зміна коефіцієнта масообміни  $\beta_\gamma$  зі збільшенням числа Рейнольдса при осадженні частинки у воді в діапазоні  $Re = (9,9 - 229,2)$  обернено пропорційна зміні товщини Л шару  $\delta$ , тобто від-

відношення  $\beta_{Y_{n+1}}/\beta_{Y_n}$  на 98% обернено пропорційні відношенням  $\delta_n/\delta_{n+1}$  (рис. 4.) (де  $n$ —число від 1-10). Відношення  $\beta_{Y_{n+1}}/\beta_{Y_n}$  розраховувалися з критеріального рівняння Аксельруда. Показано, що інтенсивність дифузійних процесів, що проходять при гідромеханічному осадженні на 98% залежать від товщини  $L$  приграничного шару, що утворюється навколо твердої частинки при її осадженні з  $\Pi$  або  $T$  режимом.

Проведений силовий аналіз елементарного об'єму рідини в  $L$  шарі, що виникає при осадженні твердої частинки в рідкому середовищі з  $T$  режимом в полі гравітаційних сил (рис. 5). В межах  $L$  шару на елементарний об'єм  $P$  діють аналогічні сили, як і в трубопроводі



(рис.3). За принципом Д'Аламбера отримали рівняння, аналогічне як для варіанту руху рідини в трубопроводі (2). Значення швидкості в  $L$  шарі -  $V_z \approx 0,0085$  м/с. Діаметр частинки -  $d = 0,9 \cdot 10^{-3}$  м.

Рис. 5. Схема формування  $L$  шару навколо рухомої частинки, що осаджується в рідині з  $T$  або  $\Pi$  режими.

Визначали числа Ейлера, Фруда, Рейнольдса та поверхнєве число в  $L$  шарі, підставляючи значення фізичних характеристик для води за нормальних умов. Густина твердої частинки, що осаджується -  $\rho_{\tau} = 2100$  кг/м<sup>3</sup>.

Різниця тисків попереду та позаду частинки спричинена різницею сили тяжіння ( $mg$ ) та Архімеда ( $A$ ), віднесеної до площі поверхні.

$$1. Eu = \frac{\rho_{\tau} l}{\rho V \cdot l} = \frac{d(\rho_{\tau} - \rho_c)g}{3 \cdot \rho V_z^2} \approx \frac{0,9 \cdot 10^{-3} (2100 - 1000) 9,8}{3 \cdot 1000 \cdot 0,0085^2} \approx 45 - \text{число Ейлера в } L \text{ шарі};$$

$$2. \frac{1}{N} = \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{\mu V_z} \approx \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0725 \cdot 0,5}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0085} \approx 2678 - \text{поверхнєве число в } L \text{ шарі};$$

$$3. \frac{1}{Re} = \frac{\mu}{\delta \rho V_z} \approx \frac{10^{-3}}{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 0,0085} \approx 0,392 - \text{число Рейнольдса в } L \text{ шарі};$$

$$4. Fr = \frac{\rho g l}{\rho V} = \frac{g \tau \cdot l}{V \cdot l} = \frac{g \cdot l}{V_z^2} - \text{число Фруда в } L \text{ шарі.}$$

Числами Фруда та оберненим числом Рейнольдса нехтували, оскільки це величини, що на 4-5 порядків менші від числа Ейлера та поверхнєвого числа в  $L$  шарі. Нехтували також одиницею в критеріальному рівнянні.

Також введене поняття коефіцієнта турбулізації  $L$  шару, який обчислювався з рівності (3) для критичного значення числа Рейнольдса при осадженні ( $Re_{кр} = 2$ ). З отриманого критеріального рівняння виведені формули для розрахунку товщини  $L$  шару за умов гравітаційного (а) та відцентрового (б) осадження частинки:

$$\text{а) } \delta = \sqrt{\frac{9,42 \cdot \sigma \cos \theta}{g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}} : K_{\text{T}} \quad \text{б) } \delta = \sqrt{\frac{9,42 \cdot \sigma \cos \theta}{\omega^2 r(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}} : K_{\text{T}}, \quad (8)$$

де  $\delta$  - товщина приграничного Л шару при осадженні, м;  $\rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{с}}$  - густина твердої частинки та рідкого середовища, відповідно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g, \omega^2 r$  - прискорення вільного падіння та доцентрове прискорення, відповідно,  $\text{м/с}^2$ ;  $K_{\text{T}} = Re/2$  - коефіцієнт турбулізації Л шару.

Фізичний зміст інтегрування в даній системі полягає в тому, що товщина Л шівки сумується від поверхні частинки до нескінченості. Тоді маємо граничний випадок, тобто межу переходу потоку навколо частинки від Л до ІІ режиму.

На прикладі осадження кристалів марганцевокислого калію у воді експериментально встановлено невідповідність ІІ режиму осадження з Л режимом руху фарбника від розчинення кристала. Експериментально встановлена наявність приграничного Л шару навколо частинки кристала  $\text{KMnO}_4$ , що осаджується з ІІ режимом у воді.

Виходячи з критеріального рівняння Г.А. Аксельруда, представлене критеріальне співвідношення (9), яке дозволяє співставляти маси екстракту, який виділяється з подрібнених твердих частинок різного діаметра при їх осадженні в полі гравітаційних або відцентрових сил:

$$\frac{M_{\text{n}}}{M_{\text{k}}} = \frac{Re_{\text{n}}^{0,5} d_{\text{k}}^2}{Re_{\text{k}}^{0,5} d_{\text{n}}^2} \cdot \left( \frac{Re_{\text{n}}}{Re_{\text{k}}} 0,66 \right)^{0,66}, \quad (9)$$

де  $M_{\text{n}}, M_{\text{k}}$  - маси екстракту, що виділяється з подрібнених частинок при їх осадженні з  $n$ -им чи  $k$ -им діаметром, відповідно,  $\text{кг/с}$ ;  $Re_{\text{n}}, Re_{\text{k}}$  - числа Рейнольдса при осадженні частинок з  $n$ -им чи  $k$ -им діаметром, відповідно;  $d_{\text{n}}, d_{\text{k}}$  - відповідні середні діаметри частинок, м.

Вирішувалася задача оптимізації для умов гравітаційного або відцентрового осадження. Методом комп'ютерного експерименту знаходився пріоритетний середній діаметр подрібненої сировини, який забезпечує максимальну інтенсивність проходження багастадійного дифузійного процесу, зокрема розчинення та екстракції, через Л шар. Розрахунки проводилися за критеріальним співвідношенням (9) для осадження кристалів  $\text{KMnO}_4$  у воді, подрібнених частинок підплункової залози забійних тварин у розчині етанолу  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (85 мас.%) +  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (2 мас.%) та етанолу з додаванням диетилового ефіру  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (96 мас.%) +  $\text{C}_2\text{H}_5\text{-O-C}_2\text{H}_5$  (20 мас.%) в полі гравітаційних та відцентрових сил на прикладі екстракції інсуліну. Для екстрагентів, які використовуються при екстракції інсуліну, аденозинтрифосфорної кислоти (АТФ) та адренкортикотропного гормону (АКТГ) експериментально визначали коефіцієнти поверхневого натягу та динамічної в'язкості (табл.3).

Шляхом комп'ютерного експерименту отримані емпіричні співвідношення для осадження частинок в полі гравітаційних (а) або відцентрових (б) сил:

$$\text{а) } \frac{d_{\text{пр.}}}{\delta_{\text{пр.}}} \approx \sqrt[3]{Ag_{\text{пр.}}} \quad \text{б) } \frac{d_{\text{пр.}}}{\delta_{\text{пр.}}} \approx \sqrt[3]{Ag_{\text{пр.}}^M}, \quad (10)$$

де  $d_{\text{пр.}}$  - пріоритетне значення середнього діаметра подрібненої сировини, м;  $\delta_{\text{пр.}}, \delta_{\text{пр.}}^{\text{II}}$  - пріоритетні значення товщини Л шару при осадженні частинки в полі гра-

вітаційних та відцентрових сил, відповідно;  $m$ ;  $A_{\text{пр}}^M$ ,  $A_{\text{пр}}^M$  - пріоритетні значення чисел Архімеда і модифікованого числа Архімеда для гравітаційного та відцентрового осадження, відповідно.

Співвідношення (10) для інших, не пріоритетних значень, не справджуються. Розрахунки для умов екстракції АТФ, де розчинником є станол  $C_2H_5OH$  (96мас.%), а також для умов екстракції АКПГ, де розчинником є ацетон  $(CH_3)_2CO$  (96мас.%), узгоджуються з попередніми.

Таблиця 3

Значення коефіцієнта поверхневого натягу  $\sigma_{1-2}$  та коефіцієнта динамічної в'язкості  $\mu$  спиртових розчинів

Речовина	К-ість крапель, шт	Маса 1 краплі, мг	Поверх. натяг, $\sigma_{1-2}$ Н/м	в'язкість, $\mu$ Па·с
$C_2H_5OH$ (96 мас.%)	5	24,0	0,0293	0,00123
$C_2H_5OH$ (96 мас. %), $t = 2-3$ °C	-	24,4	0,0295	0,00170
$C_2H_5OH$ (85 мас. %)	-	25,0	0,0299	0,00128
$C_2H_5OH$ (85 мас.%) + $H_3PO_4$ (1 мас. %)	-	25,6	0,0313	0,00132
$C_2H_5OH$ (85 мас.%) + $H_3PO_4$ (2 мас. %)	-	26,0	0,0318	0,00134
$(CH_3)_2CO$ (96 мас. %)	-	20,0	0,0237	0,00039
$C_2H_5OH$ (96 мас.%) + $C_2H_5-O-C_2H_5$ (20 мас. %)	-	17,0	0,0208	0,00028

Аналітично отримані рівності для розрахунку пріоритетних значень товщини Л шару, що виникає навколо частинок при їх осадженні в рідкому середовищі в полі гравітаційних (а) або відцентрових (б) сил:

$$а) \delta_{\text{пр}} = \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})\rho_{\text{с}}}} \quad б) \delta_{\text{пр}}^{\omega} = \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\omega^2 r(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})\rho_{\text{с}}}} \quad (11)$$

де  $\rho_{\text{ч}}$ ,  $\rho_{\text{с}}$  - густина подрібненої та суцільної фаз відповідно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$ ,  $\omega^2 r$  - прискорення гравітаційне та доцентрове, відповідно,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\mu$  - динамічна в'язкість розчинника,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

Методом комп'ютерного експерименту, а також методом розмірностей виведений пріоритетний коефіцієнт турбулізації Л шару (параметр оптимізації В). Загальна функціональна залежність має вигляд:  $V = f[\sigma \cos\theta, (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}), \rho_{\text{с}}, g, \mu]$ . Ця залежність представлена степеневою функцією:

$V = C[(\sigma \cos\theta)^X, (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})^Y, \rho_{\text{с}}^Z, g^K, \mu^L]$ . Розв'язано рівняння методом розмірностей, записуючи фізичні величини екстрагента (суцільної фази), а також подрібненої твердої фази через основні розмірності - ( $\text{кг}$ ,  $\text{м}$ ,  $\text{с}$ ):  $(\sigma \cos\theta)$ - $[\text{Н}/\text{м} = \text{кг}/\text{с}^2]$ ;  $(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})$ - $[\text{кг}/\text{м}^3]$ ;  $\rho_{\text{с}}$ - $[\text{кг}/\text{м}^3]$ ;  $g$ - $[\text{м}/\text{с}^2]$ ;  $\mu$ - $[\text{Па}\cdot\text{с} = \text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}]$ . На основі рівняння розмірностей:

$$V = C(\text{кг}/\text{с}^2)^X (\text{кг}/\text{м}^3)^Y (\text{м}/\text{с}^2)^Z (\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с})^K \text{або: } \text{кг}^0 \text{м}^0 \text{с}^0 = C \text{кг}^{X+Y+K} \text{м}^{-3Y+Z-K} \text{с}^{-2X-2Z-K}$$

(де  $Y=Y_1+Y_2$ ), отримали систему лінійних рівнянь. Методом Гауса звели основну матрицю системи до трикутного вигляду:

$$\begin{pmatrix} X+ & Y+ & K= & 0 \\ -3Y+ & Z- & K= & 0 \\ -2X & -2Z & -K= & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -3 & 1 & -1 \\ -2 & 0 & -2 & -1 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -3 & 1 & -1 \\ 0 & 2 & -2 & 1 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -3 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -4 & 1 \end{pmatrix}$$

і, повертаючись до відповідної еквівалентної системи, отримали:  $z = \frac{k}{4}$ ;  $y = -\frac{k}{4}$ ;  $x = -\frac{3k}{4}$ . Враховуючи формулу (8), визначено, що параметр  $\sigma \cdot \cos\theta$

має степінь  $1/2$ . Тоді, при  $X=1/2$  розв'язок системи набуває значень:  $Y=1/6$ ;  $Z=-1/6$ ;  $K=-2/3$ . Виходячи з рівняння розмірностей, отримано:

$B = C[(\sigma \cos\theta)^{1/2}, (\rho_q - \rho_c)^{Y_1}, \rho_c^{1/6 - Y_1}, g^{-1/6}, \mu^{-2/3}]$ . З рівності (8) константа  $C = \sqrt{9,42} \approx 3,07$ . Для визначення параметра  $Y$  співставлено параметр  $B$  та число Архімеда таким чином, щоб виділити безрозмірне відношення діаметра частинки до товщини  $L$  шару  $d/\delta$ .

Отримали:  $\sqrt[3]{Ar} \cdot B = \frac{d}{\delta} (\rho_q - \rho_c)^{1/6} \cdot f(\rho_c, \mu, g, \sigma \cdot \cos\theta)$ . Остаточо виведено параметр оптимізації для умов пріоритетного проведення дифузійних процесів, зокрема екстракції в системі ТТ - Р або Р - Р в полі гравітаційних (а) або відцентрових (б) сил:  $B = 3,07 [(\sigma \cos\theta)^{1/2}, (\rho_q - \rho_c)^{-1/6}, \rho_c^{1/3}, g^{-1/6}, \mu^{-2/3}]$ :

$$\text{а) } B = 3,07 \cdot \sqrt[6]{\frac{(\sigma \cdot \cos \cdot \theta)^3 \cdot \rho^2 c}{\mu^4 g (\rho_q - \rho_c)}} \quad \text{б) } B_{ц} = 3,07 \sqrt[6]{\frac{(\sigma \cdot \cos \theta)^3 \cdot \rho^2 c}{\mu^4 (\omega^2 r) \cdot (\rho_q - \rho_c)}} \quad (12)$$

Показано, що параметри оптимізації  $B$  і  $B_{ц}$  можна представити у вигляді критеріальних рівнянь:

$$\text{а) } B = 3,07 \cdot We_{пр}^{0,5} \left( \frac{\rho_q}{\rho_q - \rho_c} \right)^{0,5} \quad \text{б) } B_{ц} = 3,07 \cdot We_{цпр}^{0,5} \left( \frac{\rho_q}{\rho_q - \rho_c} \right)^{0,5} \quad (13)$$

де  $We_{пр}, We_{цпр}$  - пріоритетні числа Вебера за умов гравітаційного та відцентрового осадження, відповідно,  $\delta_{пр}, \delta_{цпр}$  - пріоритетна товщина приповерхневого  $L$  шару, за умов гравітаційного та відцентрового осадження, відповідно.

$$(We_{пр} = \frac{\sigma \cos\theta}{\rho_c g \delta_{пр}^2}; We_{цпр} = \frac{\sigma \cos\theta}{\rho_c (\omega^2 r) \delta_{цпр}^2}).$$

Враховуючи рівності (10) - (12), запропонований алгоритм розрахунку пріоритетних параметрів подрібнення сировини, а також розрахунку апаратури за умов максимальної інтенсивності проходження дифузійних процесів, який полягає в наступному:

- за відомими фізичними характеристиками суцільної рідкої та подрібненої твердої фаз розраховують пріоритетну товщину  $L$  шару, що виникає навколо частинки, яка осаджується в суцільному середовищі під дією сил тяжіння або відцентрових сил при П або Т режимі;
- визначають параметр оптимізації  $B$  або  $B_{ц}$  для даних умовах осадження частинки;
- розраховують число Рейнольдса для певної швидкості осадження  $Re = 2 \cdot B$ ;
- визначають режим осадження (якщо  $500 > Re > 2$  - П режим осадження, якщо  $Re > 500$  - Т режим);

- визначають число Архімеда з рівності, відповідно для П або Т режиму осадження;
- визначають пріоритетний діаметр частинки  $d_{гр}$ , яка осаджується в суцільному середовищі за умов максимальної інтенсивності процесу екстракції;
- за числом Рейнольдса з відомим пріоритетним розміром подрібненої частинки визначають швидкість осадження;
- якщо задана продуктивність, визначають площу поверхні осадження, тобто габаритні розміри апарату, або вибирають нормалізований.

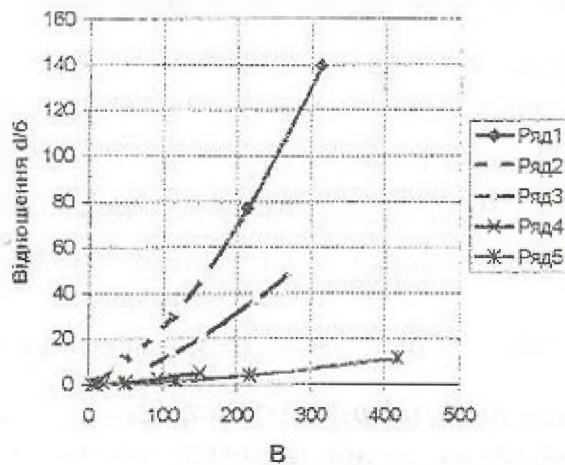


Рис. 6. Залежність відношення  $d/\delta$  від  $B$

$C_2H_5OH$  (85 мас.%) +  $H_3PO_4$  (2 мас. %); Ряд 5 – відцентрове осадження подрібненої залози у розчині  $C_2H_5OH$  (96 мас. %) +  $C_2H_5-O-C_2H_5$  (20 мас.%).

В п'ятому розділі розглянуто процес фільтрування через пористу перегородку з урахуванням сил поверхневого натягу рідини. Показано, що капілярні сили та сили тиску, що діють на елементарний об'єм рідини в капілярі, на декілька порядків більші від сил тяжіння, тертя та інерції. Виведена формула для розрахунку швидкості фільтрування, яке здійснюється під впливом сил тяжіння:

$$V_f = \frac{(\sigma_{3-2} - \sigma_{3-1})}{27,5\mu} \frac{d_{екв}^2 \varepsilon^2}{L}, \quad (14)$$

де  $V_f$  - швидкість фільтрування, м/с;  $\sigma_{3-2}$ ,  $\sigma_{3-1}$  - коефіцієнти поверхневого натягу на границі тверде тіло - повітря і тверде тіло - рідина, відповідно, Н/м;  $\mu$  - динамічна в'язкість середовища, Па·с;  $d_{екв}$  - еквівалентний діаметр каналів фільтра, м;  $L$  - товщина фільтра, м;  $\varepsilon$  - доля пористості у фільтрі.

На стенді гідромеханічних процесів (рис.3) проводили дві серії експериментів. Перша стосувалася визначення швидкості фільтрування для води при температурі  $12^\circ C$ , а друга - визначення швидкості фільтрування для води з додаванням ПАР (0,5 мас.%). Матеріал фільтра - зерниста кераміка, для якої значення поверхневої енергії приймалося  $\sigma_{3-2} = 2$  Дж/м<sup>2</sup>. Встановлено, що швидкість фільтрування при використанні ПАР зростає у 2,5 рази. Таке зростання приводить до економії енергоресурсів в процесі фільтрування.

Визначені пріоритетні параметри подрібнення сировини при екстракції інсуліну в умовах фільтрування. Показана позитивна дія ПАР (диетилового ефіру) по

відношенню до спиртового розчину, що забезпечує інтенсифікацію процесу фільтрування в умовах фільтрувальної екстракції при виробництві інсуліну.

В шостому розділі розглянуто процес гідромеханічного перемішування з урахуванням товщини  $L$  шару, що виникає при турбулентному осадженні твердої частинки в полі відцентрових сил, пріоритетну величину якої можна розраховувати за співвідношенням (11б). Користуючись параметром оптимізації при відцентровій екстракції (12б), розраховані пріоритетні параметри подрібнення сировини та пріоритетні кутові швидкості обертання мішалок в змішувально-відстійних екстракторах при виробництві низки органопрепаратів. Виведене співвідношення (15) між пріоритетними середніми діаметрами подрібнення сировини перед дифузійними процесом екстракції і пріоритетними кутовими швидкостями обертання мішалок в умовах гідромеханічного перемішування:

$$\frac{d_{1ПР}}{d_{2ПР}} = \frac{\omega_{2ПР}^{5/6}}{\omega_{1ПР}^{5/6}}, \quad (15)$$

де  $d_{1ПР}, d_{2ПР}$  - пріоритетні середні діаметри подрібненої сировини, м;  
 $\omega_{1ПР}, \omega_{2ПР}$  - відповідні пріоритетні кутові швидкості обертання мішалок в екстракторах,  $c^{-1}$ ;

На основі експериментальних даних та з літературних джерел, зокрема проф. В.І. Чуєшова, відомо, що подрібнення при екстракції з сировини тваринного або рослинного походження проводять в діапазоні  $d_i = (1-10) \cdot 10^{-3}$  м, який є дуже широким. Подрібнення до середнього діаметра  $d_i < 1 \cdot 10^{-3}$  м є не ефективне, оскільки може приводити до злипання та збивання сировини.

Нами підібрана пріоритетна частота обертання мішалки ( $\omega_{ПР} \approx 10 c^{-1}$ ) для екстрактора з об'ємом -  $W = 1 м^3$ , діаметром днища -  $D_1 = 1,2$  м, діаметром мішалки ( $D \approx 0,3 D_1$ ) -  $D = 0,4$  м, робочою висотою розчину в екстракторі -  $h = 0,8$  м. При цьому пріоритетні параметри перемішування і подрібнення сировини є такими:

- екстракція інсуліну з підшлункової залози в розчиннику  $C_2H_5OH$  (85 мас. %) +  $H_3PO_4$  (2 мас. %):  $d_{ПР} = (2,5-3) \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ПР} = 142$ ;  $Re_{ПР} = 219$ ;  $Ar_{ПР}^M = 33909$ ;  
 $\delta_{ПР}^{II} = 0,092 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n = 2406$  Вт;

- екстракція інсуліну з підшлункової залози в розчиннику  $C_2H_5OH$  (96 мас. %) +  $C_2H_5-O-C_2H_5$  (20 мас. %):  $d_{ПР} = (1,4-1,5) \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ПР} = 248$ ;  $Re_{ПР} = 497$ ;  
 $Ar_{ПР} = 108120$ ;  $\delta_{ПР}^{II} = 0,03 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n = 2355$  Вт;

- екстракція АТФ з м'язової тканини в розчиннику  $C_2H_5OH$  (96 мас. %),  
 $(t = 2-3^\circ C)$ :  $d_{ПР} = (2-2,3) \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ПР} = 188$ ;  $Re_{ПР} = 154$ ;  $Ar_{ПР}^M = 21051$ ;  $\delta_{ПР}^{II} = 0,08 \cdot 10^{-3}$  м;  
 $N_T^n = 2157$  Вт;

- екстракція панкреатину з підшлункової залози в розчиннику  $H_2O$ :  $d_{ПР} = (3,5-4) \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ПР} = 188$ ;  $Re_{ПР} = 376$ ;  $Ar_{ПР}^M = 73178$ ;  $\delta_{ПР}^{II} = 0,09 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n = 2560$  Вт;

- екстракція АКТГ з гіпофізів в розчиннику  $(CH_3)_2CO$  (96%),  $t = 20^\circ C$ :  $d_{ПР} = (1,4-1,5) \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ПР} = 192$ ;  $Re_{ПР} = 384$ ;  $Ar_{ПР}^M = 75334$ ;  $\delta_{ПР}^{II} = 0,035 \cdot 10^{-3}$  м;  
 $N_T^n = 2022$  Вт;

- екстракція хонсуриду з хрящів молодняка в розчиннику  $KCl$  (25 мас. %) +  $KOH$  (2 мас. %) +  $K_2O$  (1 мас. %):  $d_{ПР} = (2,5-3) \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ПР} = 194$ ;  $Re_{ПР} = 388$ ;  $Ar_{ПР}^M = 76446$ ;  
 $\delta_{ПР}^{II} = 0,065 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n = 2586$  Вт;

де  $d_{\text{ПР}}$  - пріоритетний діапазон подрібнення сировини для умов перемішування, м;  $B_{\text{ПР}}$  - параметр оптимізації при відцентровій екстракції;  $Re_{\text{ПР}}$  - пріоритетне число Рейнольдса;  $Ar^M$  - пріоритетне модифіковане число Архімеда;  $\delta_{\text{ПР}}$  - пріоритетна товщина  $L$  шару при відцентровій екстракції, м;  $N_T^{\text{II}}$  - споживана потужність екстрактора, Вт.

Зроблено порівняльний розрахунок інтенсивності екстракції субстанції інсуліну в розчиннику  $C_2H_5OH$  (85 мас.%) +  $H_3PO_4$  (2 мас.%) і в розчиннику  $(C_2H_5OH$  (96 мас.%) +  $C_2H_5-O-C_2H_5$  (20 мас.%) за умов пріоритетних параметрів подрібнення сировини. В обох випадках порівняння проводили за виведеними нами критеріальними співвідношеннями.

$$\frac{M_n}{M_k} = \frac{Re_{\text{ПР},n}^{0,5} d_{\text{ПР},k}^2}{Re_{\text{ПР},k}^{0,5} d_{\text{ПР},n}^2} = \frac{497^{0,5} 3^2}{219^{0,5} 1,5^2} = 6 \text{ раз, або}$$

$$\frac{M_n}{M_k} = \frac{Re_{\text{ПР},n}^{1,5} d_{\text{ПР},k}^4 \delta_{\text{ПР},n}^2}{Re_{\text{ПР},k}^{1,5} d_{\text{ПР},n}^4 \delta_{\text{ПР},k}^2} = \frac{497^{1,5} 3^4 \cdot 0,03^2}{218,7^{1,5} 1,5^4 \cdot 0,09^2} = 6,16 \text{ раз,}$$

де  $M_n/M_k$  - відношення мас екстракту при використанні різних розчинників;  $Re_{\text{ПР},n}, d_{\text{ПР},n}, \delta_{\text{ПР},n}$  - пріоритетні число Рейнольдса, діаметр подрібнення сировини, товщина  $L$  шару за використання екстрагента  $C_2H_5OH$  (96 мас.%) +  $C_2H_5-O-C_2H_5$  (20 мас.%) при екстракції інсуліну, відповідно;  $Re_{\text{ПР},k}, d_{\text{ПР},k}, \delta_{\text{ПР},k}$  - пріоритетні число Рейнольдса, діаметр подрібнення сировини, товщина  $L$  шару при використанні екстрагента  $C_2H_5OH$  (85 мас.%) +  $H_3PO_4$  (2 мас. %) при екстракції інсуліну, відповідно. При такій інтенсифікації виходу екстракту процес протікає приблизно у 6 раз швидше при суттєвій економії енергоресурсів.

В цьому розділі висвітлені питання оптимізації параметрів псевдозрідженого шару в системі ТТ-Р. В псевдозрідженому парі визначальним є число Архімеда, тому параметр оптимізації  $B$  (12а) для гравітаційної екстракції може бути застосований для розрахунку пріоритетних його параметрів.

За допомогою параметра  $B$  (12а) проведено оптимізацію псевдозрідженого шару за умов максимальної інтенсивності екстракції в системі тверда частинка - вода в залежності від температури (табл.4.). Густина частинки -  $\rho_s$  - 1100 кг/м<sup>3</sup>.

Показано, що процес псевдозрідження є менш енергоємним, ніж гідромеханічне перемішування. Екстракцію цілої низки органопрепаратів (інсуліну, АТФ, панкреатину, АКТГ, хонсуриду, сшеніну) запропоновано проводити в стані псевдозрідженого шару в системі ТТ-Р. Оптимізація параметрів псевдозрідженого шару повинна бути пов'язана, передовсім, з вибором пріоритетного середнього діаметра подрібненої твердої фази і з врахуванням фізичних характеристик середовища.

Запропонований алгоритм розрахунку пріоритетних параметрів роботи екстракційної апаратури з псевдозрідженим шаром в системі ТТ-Р, який полягає в наступному:

- визначення параметра оптимізації гравітаційного процесу екстракції,  $B$ ;
- розрахунок пріоритетного числа Рейнольдса,  $Re_{\text{ПР}} = 2 \cdot B$ ;
- визначення пріоритетного числа Архімеда;
- розрахунок пріоритетного значення товщини  $L$  шару,  $\delta_{\text{ПР}}$ ;
- визначення пріоритетного середнього діаметра подрібнення сировини,  $d_{\text{ПР}}$ ;

- визначення пріоритетної швидкості подачі середовища в екстрактор;

- визначення пріоритетної неоднорідності зваженого шару в системі ТТ-Р.

Для ефективної дифузії, зокрема екстракції в псевдозрідженому шарі в системі ТТ-Р, запропонована критеріальна нерівність.

Таблиця 4

**Оптимізація параметрів псевдозрідженого шару в системі тверда частинка - вода в залежності від температури**

Температура води, °С	Параметр оптимізації, В	Пріоритетне число Рейнольдса, $Re_{пр} \approx 2B$	Пріоритетне число Архімеда, $Ar$	Пріоритетна товщина І шару, $\delta_{пр}$	Пріоритетний середній діаметр подрібнення сировини, $d_{мес}$ , мм
10	172	343	64421	0,120	4,80
20	203	405	81281	0,100	4,30
30	231	462	97590	0,086	3,95
40	259	518	115335	0,074	3,60
50	287	573	140959	0,065	3,39
60	311	622	165982	0,058	3,20
70	335	670	193011	0,052	3,00
80	358	716	219906	0,047	2,83
90	377	755	244641	0,043	2,68
100	395	790	267280	0,039	2,50

$$\frac{d_{екв.пр.}}{\delta_{пр.}} \geq \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\varepsilon_{пр.}}{1-\varepsilon_{пр.}}} B \quad (16)$$

де  $d_{екв.пр.}$ ,  $\delta_{пр.}$ ,  $\varepsilon_{пр.}$  - пріоритетні «еквівалентний діаметр каналів псевдозрідженого шару», товщина І шару, неоднорідність псевдозрідженого шару в системі ТТ-Р, відповідно; В - параметр оптимізації.

Розраховані пріоритетні параметри псевдозрідженого шару в системі ТТ-Р при виробництві органопрепаратів:

- екстракція інсуліну з підшлункової залози в розчиннику  $C_2H_5OH$  (85мас.%) +  $H_3PO_4$  (2 мас.%):  $d_{пр.} = (3,5-4) \cdot 10^{-3}$  м;  $B = 126$ ;  $Re_{пр.} = 252$ ;  $Ar_{пр.} = 137506$ ;  $\delta_{пр.} = 0,117 \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{пр.} = 0,089$  м/с;  $Re_K = 16,9$ ;  $Re_B = 308$ ;  $\varepsilon_{пр.} = 0,915$ ;  $d_{екв.пр.} = 32 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^{пр.} = 775$  Вт;

- екстракція інсуліну з підшлункової залози в розчиннику  $C_2H_5OH$

(96 мас.%) +  $C_2H_5-O-C_2H_5$  (20 мас.%) :  $d_{ГР}=(1,8-2) \cdot 10^{-3}$  м;  $B=283$ ;  $Re_{ГР}=566$ ;  $Ar_{ГР}=41772$ ;  $\delta_{ГР}=0,039 \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ГР}=0,0843$  м/с;  $Re_K=41,2$ ;  $Re_B=594$ ;  $\epsilon_{ГР}=0,96$ ;  $d_{ЕКВ,ГР}=37 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n=713$  Вт;

- екстракція аденозинтрифосфору (АТФ) з м'язової тканини м'яса в розчиннику  $C_2H_5OH$  (96 мас.%,  $t=2-3^{\circ}C$ ):  $d_{ГР}=(3-3,2) \cdot 10^{-3}$  м;  $B=90$ ;  $Re_{ГР}=180$ ;  $Ar_{ГР}=26202$ ;  $\delta_{ГР}=0,10810^{-3}$  м;  $V_{ГР}=0,12$  м/с;  $Re_K=11$ ;  $Re_B=235$ ;  $\epsilon_{ГР}=0,889$ ;  $d_{ЕКВ,ГР}=37 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n=930$  Вт;

- екстракція АТФ з м'язової тканини м'яса в розчиннику  $C_2H_5OH$  (96 мас.%) +  $C_2H_5-O-C_2H_5$  (20 мас.%) :  $d_{ГР}=(1,5-1,8) \cdot 10^{-3}$  м;  $B=271$ ;  $Re_{ГР}=543$ ;  $Ar_{ГР}=126477$ ;  $\delta_{ГР}=0,036 \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ГР}=0,09$  м/с;  $Re_K=39$ ;  $Re_B=568$ ;  $\epsilon_{ГР}=0,98$ ;  $d_{ЕКВ,ГР}=91 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n=785$  Вт;

- екстракція панкреатину з підшлункової залози в розчиннику (вода):  $d_{ГР}=(5-5,3) \cdot 10^{-3}$  м;  $B=212$ ;  $Re_{ГР}=445$ ;  $Ar_{ГР}=86403$ ;  $\delta_{ГР}=0,11910^{-3}$  м;  $V_{ГР}=0,0799$  м/с;  $Re_K=29$ ;  $Re_B=462$ ;  $\epsilon_{ГР}=0,96$ ;  $d_{ЕКВ,ГР}=82 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n=702$  Вт;

- екстракція АКГГ з гіпофізів в розчиннику  $(CH_3)_2CO$  (96 мас.%,  $t=20^{\circ}C$ ):  $d_{ГР}=(1,4-1,5) \cdot 10^{-3}$  м;  $B=215$ ;  $Re_{ГР}=430$ ;  $Ar_{ГР}=88137$ ;  $\delta_{ГР}=0,045 \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ГР}=0,106$  м/с;  $Re_K=30$ ;  $Re_B=467$ ;  $\epsilon_{ГР}=0,96$ ;  $d_{ЕКВ,ГР}=31,4 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n=790$  Вт;

- екстракція хонсуриду з хрящів молодняка в розчиннику  $KCl$  (25 мас.%) +  $KOH$  (2 мас.%) +  $K_2O$  (1 мас.%) :  $d_{ГР}=(3,7-4) \cdot 10^{-3}$  м;  $B=223$ ;  $Re_{ГР}=430$ ;  $Ar_{ГР}=92728$ ;  $\delta_{ГР}=0,08 \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{ГР}=0,097$  м/с;  $Re_K=31$ ;  $Re_B=480$ ;  $\epsilon_{ГР}=0,968$ ;  $d_{ЕКВ,ГР}=40,7 \cdot 10^{-3}$  м;  $N_T^n=896$  Вт;

де  $d_{ГР}$  - пріоритетний діапазон подрібнення сировини, м;  $B$  - параметр оптимізації;  $Re_{ГР}$  - пріоритетне число Рейнольдса;  $Ar_{ГР}$  - пріоритетне число Архімеда;  $\delta_{ГР}$  - пріоритетна товщина  $L$  шару, м;  $V_{ГР}$  - пріоритетна швидкість подачі середовища, м/с;  $Re_K, Re_B$  - значення числа Рейнольдса в точках  $K$  і  $B$  кривої псевдозрідження;  $\epsilon_{ГР}$  - пріоритетна «неоднорідність псевдозрідженого шару»;  $d_{ЕКВ}$  - пріоритетний «еквівалентний діаметр порожот псевдозрідженого шару», м;  $N_T^n$  - споживана потужність екстрактора, Вт.

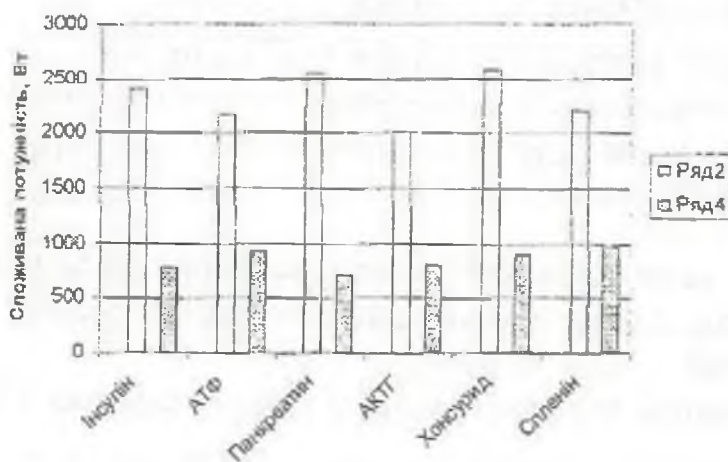


Рис. 7. Споживана потужність при екстракції в умовах гідромеханічного перемішування (Ряд 2) та псевдозрідження (Ряд 4) за пріоритетних умов подрібнення сировини.

Зроблено порівняння інтенсивності екстракції різних органопрепаратів у відповідних розчинниках в умовах псевдозрідження та перемішування. Показано, що при виробництві органопрепаратів в умовах псевдозрідження у 2,5-3 рази зменшується споживана потужність екстрактора (рис. 7).

Розроблений апарат для інтенсифікації екстракції низки органопрепаратів з ендокринної сировини. Апарат складається з циліндричного корпусу 1, днища екстрактора 2, закріпленої між кор-

пусом і днищем екстрактора решітки 3, накладки екстрактора 4, трубок зі спіралеподібними отворами 5, патрубків 6, насоса 7. Корпус екстрактора 1, днище 2, решітка 3 і накладка 4 скріплені по периметру роз'ємними болтовими з'єднаннями. Для можливості встановлення трубок зі спіралеподібними отворами 5, отвори днища 8 екстрактора закінчуються штуцерами 9. Зверху отворів накладки 4 закріплено штуцери 11. Для можливості під'єднання до накладки 4 патрубків 6 знизу отворів 10 закріплено штуцери патрубків 12. На штуцерах 9 і в штуцерах 11 знаходяться муфти 13, які після встановлення трубок 5 зі спіралеподібними отворами накручуються на них для герметичності з'єднання. Апарат для інтенсифікації перебігу процесу екстракції працює наступним чином. Насос 7, який сполучений з верхньою частиною корпусу 1, засмоктує екстрагент і подає його зі швидкістю, що забезпечує псевдозріджений стан подрібненої сировини (рис. 8).

Для екстракції кожного органопрепарату при використанні відповідного екстрагента ця пріоритетна швидкість визначається за вище запропонованою методикою. Екстрагент проходить через отвори 10 накладки екстрактора 4, по трубках зі спіралеподібними отворами 5, по штуцерах накладки 11 а також через отвори штуцерів патрубків, тому весь рідинний вміст апарату набуває обертового руху, що забезпечує додаткове його перемішування (рис.8).

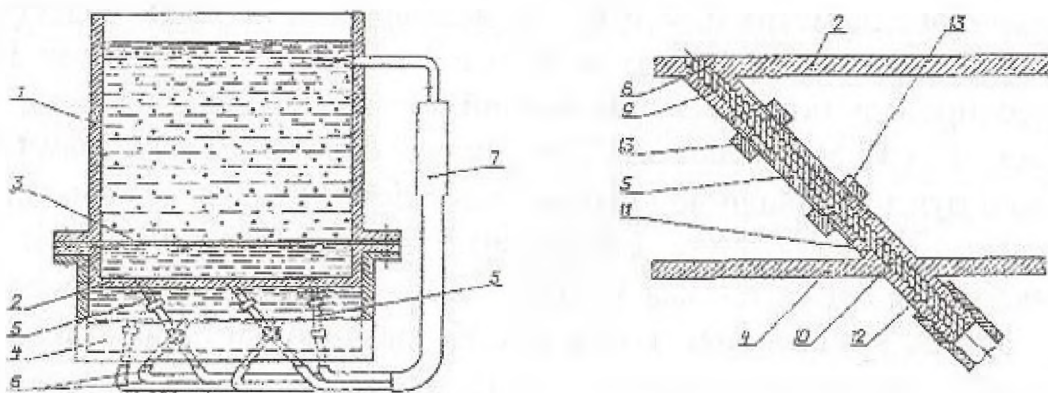


Рис 8. Схема гравітаційного екстрактора з псевдозрідженим шаром для ендокринної сировини

Патрубки, через які екстрагент подається під решітку екстрактора, встановлені так, що кут їх осьової лінії з горизонталлю становить близько  $35-55^{\circ}$ . Металева плетена решітка з нержавіючої сталі 3, на якій лежить подрібнена сировина, виконана з отворами, що забезпечують можливість не проникнення подрібненої сировини через них, тобто середній діаметр отворів не перевищує  $110^{-3}$  м. Подрібнення сировини відбувається згідно пріоритетних параметрів.

З метою підвищення інтенсивності екстрагування розроблений відцентровий екстрактор з псевдозрідженим шаром з наступними конструктивними елементами (рис.9): 1- пустотілий конічний барабан; 2- металева решітка з кроком 0,5 мм; 3 - герметичний корпус; 4 - сальники; 5- опори; 6 – ліва пустотіла цапфа; 7- права пустотіла цапфа; 8- герметичний люк; 9 – система трубопроводів; 10 – двосторонній

кран; 11- насос; 12 - двосторонній кран; 13 – репітка; 14 - подрібнена ендокринна сировина.

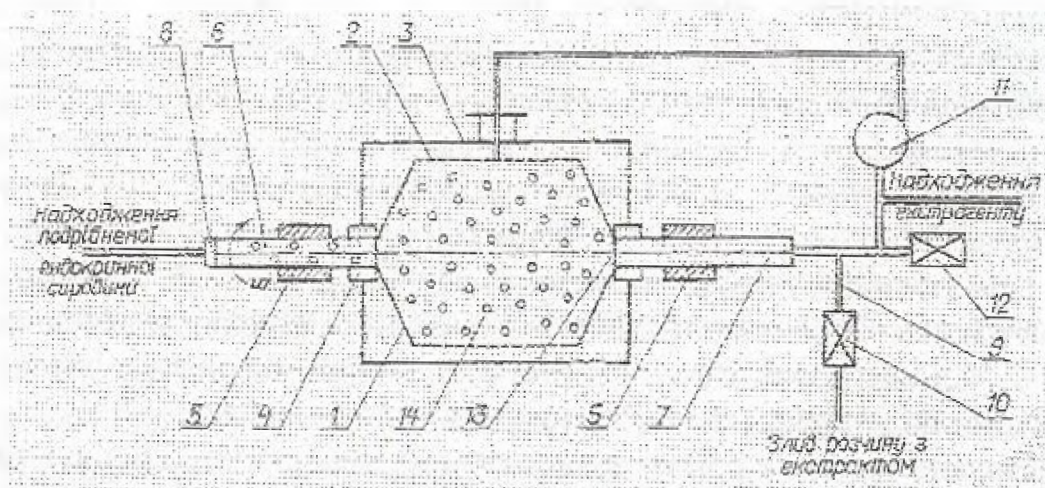


Рис. 9. Схема відцентрового екстрактора з псевдозрідженим шаром для ендокринної сировини

Радіус конічного барабана  $r$  залежить від заданої продуктивності апарата. Апарат працює в наступній послідовності. Фарш ендокринної сировини, що подрібнений до середнього діаметра  $d_c \approx 1 \cdot 10^{-3}$  м, відповідною порцією подається у ліву пустотілу цапфу 6, після чого герметичний люк 3 закривається. Насосом 11 з магістрального трубопроводу подається відповідний розчинник, який повністю заповнює корпус 3. Крани 10 і 12 закриваються. Пустотілому барабану 1 з цапфами 6, 7 надається обертовий рух з відповідною кутовою швидкістю  $\omega$ , що залежить від того, яка сировина прийшла на оброблення. Екстрагент з відповідною швидкістю  $V$  та витратою  $W_t$  насосом 11 нагнітається в корпус 3, що створює псевдозріджений шар подрібненого фаршу в полі відцентрових сил. Кутова швидкість обертання барабана 1 для конкретної ендокринної сировини  $\omega$  визначається за допомогою параметра оптимізації для умов відцентрової екстракції.

Представлена порівняльна характеристика відцентрового та гравітаційного екстракторів для екстракції органопрепаратів з ендокринної сировини. Показано, що при умові вибору пріоритетних параметрів подрібнення сировини та псевдозрідження в полі гравітаційних або відцентрових сил, інтенсивність виходу екстракту у відцентровому екстракторі в 1,2 - 7 разів вища, ніж у гравітаційному.

Представлені результати розрахунків, які показують кореляцію запропонованих методик з поданими у літературі і принципово відрізняються тим, що в них не заданий середній пріоритетний діаметр подрібнення сировини перед процесом екстрагування або пріоритетна кутова швидкість обертання відцентрового екстрактора, які визначаються за допомогою параметрів оптимізації  $B$  або  $B_{II}$ . Параметри оптимізації отримані нами шляхом комп'ютерного експерименту над критеріальним рівнянням, що несе на собі великий масив експериментальних даних, а також методом аналізу розмірностей. Наші експерименти підтверджують правомірність використання таких методик.

## ВИСНОВКИ

1. Концепція розгляду гідромеханічних процесів осадження, фільтрування, перемішування, псевдозрідження, а також руху рідин в трубопроводах чи апаратах з врахуванням дії сил поверхневого натягу на границі контакту тверде тіло – рідина (стіжка трубопроводу – потік, частинка – екстрагент дає можливість інтенсифікувати тепломасообмінні процеси за рахунок зменшення коефіцієнта поверхневого натягу та гідрофільності поверхні змочування теплоносіїв та екстрагентів.

2. В межах приповерхневого  $L$  шару число Ейлера і поверхневе число  $e$  на 4-5 порядків більшими від чисел Фруда і оберненого числа Рейнольдса, яким не можна нехтувати при розгляді силового поля, що діє на елементарний об'єм рідини при гідромеханічних процесах осадження, фільтрування, псевдозрідження, перемішування.

3. Метод інтенсифікації теплообміну в теплообмінній апаратурі шляхом додавання до теплоносіїв незначної кількості домішок ПАР (вода + 0,026 мас.% сульфату натрію, молоко + 0,010 мас.% лляної олії) дає можливість підвищити загальний коефіцієнт теплопередачі кожухотрубного теплообмінника на 38%.

4. Додавання до води ПАР (0,05 мас.% і 0,1 мас.% сульфату натрію) дає можливість на 14 % інтенсифікувати розчинопоглинання зразками шкір прісно-сухого консервування у відмочувально-зольних процесах при виробництві шкіряного напівфабрикату.

5. На базі параметра оптимізації, який виведений методом комп'ютерного експерименту та методом аналізу розмірностей і дозволяє оптимізувати параметри подрібнення ендокринної сировини, перемішування та псевдозрідження при виробництві інсуліну, аденозинтрифосфорної кислоти, панкреатину, адренкортикотропного гормону, хонсуриду, спленіну, запропонований новий алгоритм розрахунку змішувально-відстійних екстракторів та екстракторів з псевдозрідженням шаром.

6. Використання станолу з додаванням поверхнево-активного диетилового ефіру ( $C_2H_5OH(96 \text{ мас.}\%) + C_2H_5-O-C_2H_5(20 \text{ мас.}\%)$ ) дає можливість в 6 раз інтенсифікувати процес екстрагування інсуліну та аденозинтрифосфорної кислоти з подрібненої підшлункової залози та, відповідно, м'язової тканини м'яса забійних тварин в порівнянні з традиційним екстрагентом ( $C_2H_5OH(85 \text{ мас.}\%) + H_3PO_4(2 \text{ мас.}\%)$ .)

7. Оптимізація кутової швидкості обертання лопаті мішалки у змішувально-відстійних екстракторах повинна проводитися узгоджено з пріоритетними параметрами подрібнення відповідної ендокринної сировини, що підлягає екстрагуванню.

8. Гравітаційний екстрактор зі зваженим шаром подрібненої до відповідних пріоритетних розмірів ендокринної сировини при виробництві інсуліну, аденозинтрифосфорної кислоти, панкреатину, адренкортикотропного гормону, хонсуриду, спленіну дає можливість у 2,5-3 рази зменшити споживану потужність в порівнянні зі змішувально-відстійним екстрактором.

9. Відцентровий екстрактор зі зваженим шаром подрібненої ендокринної сировини до середнього діаметра частинок  $d_c \approx 1 \cdot 10^{-3}$  м інтенсифікує процес екстрагування органопрепаратів у 1,2-7 разів в порівнянні з гравітаційним.

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АПК – агропромисловий комплекс; ПАР – поверхнево-активні речовини; ВРХ – велика рогата худоба; АТФ – аденозинтрифосфорна кислота; АКТГ – адренкортикотропний гормон; Л – ламінарний режим руху рідини; П – перехідний режим руху рідини; Т – турбулентний режим руху рідини; Р – рідина; ТТ – тверде тіло; Г – газ;  $Ar$  – число Архімеда;  $Ar^M$  – число Архімеда (модифіковане);  $Ar_{пр}$  – пріоритетне значення числа Архімеда;  $Re$  – число Рейнольдса;  $Re^M$  – число Рейнольдса (модифіковане);  $Re_{пр}$  – пріоритетне значення числа Рейнольдса;  $N$  – видозмінене число Рейнольдса ( $N \approx 10,47 - 11,5$ );  $Eu$  – число Ейлера;  $Eu^M$  – число Ейлера (модифіковане);  $We$  – число Вебера;  $We_{пр}$  – пріоритетне значення числа Вебера;  $B$  – параметр оптимізації в полі гравітаційних сил;  $B_{ц}$  – параметр оптимізації в полі відцентрових сил;  $\Delta P$  – спад напору (тиску) на певній довжині трубопроводу, фільтра, апаратур  $\rho$  – густина твердої частинки;  $\rho_c$  – густина рідини;  $\sigma_{2,1}$  – коефіцієнт поверхневого натягу на межі розділу рідина – газ;  $\sigma_{3,1}$  – коефіцієнт поверхневого натягу на межі розділу тверде тіло – рідина;  $\sigma_{3,2}$  – коефіцієнт поверхневого натягу на межі розділу тверде тіло – газ;  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини;  $\delta$  – товщина ламінарної плівки;  $\delta_{пр}$  – пріоритетне значення товщини ламінарної плівки;  $K$  – загальний коефіцієнт теплопередачі системи  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі;  $\epsilon$  – неоднорідність (доля пустот);  $\epsilon_{пр}$  – пріоритетна неоднорідність псевдозрідженого шару;  $\xi$  – коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі);  $\tau$  – час (тривалість);  $\omega$  – кутова швидкість обертання  $\theta$  – кут змочування;  $\cos \theta$  – гідрофільність поверхні твердого тіла;  $b$  – товщина металеві стінки рекуперативного теплообмінника;  $d$  – діаметр подрібненої або диспергованої частинки;  $d_{пр}$  – пріоритетний діаметр подрібненої або диспергованої частинки;  $d_{екв}$  – еквівалентний діаметр пор фільтрувальної перегородки або «еквівалентний діаметр пустот псевдозрідженого шару»;  $D$  – діаметр трубопроводу або перемішуючого пристрою;  $D_1$  – діаметр апарата (екстрактора).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях

1. Білонога Ю.Л. До питання енергозбереження на підприємствах харчової та хімічної промисловості // Хім. пром. України. - 1999. - № 4. - С.12 - 15.
2. Білонога Ю.Л. Оптимізація швидкості руху рідин в трубопроводах // Хім. пром. України. - 1999. - № 5. - С.33 - 35.
3. Білонога Ю.Л. Деякі аспекти енергозберігаючих технологій при переробці м'яса і молока / Ю.Л. Білонога, Б.Р. Ціж, Ю.Ю. Варивода // Науковий вісник ЛДАВМ ім. С.З. Гжицького. - 1999. - В.3, ч. II. - С.130 - 131.
4. Білонога Ю.Л. Залежність швидкості руху рідин у закритих вертикальних капілярах від ряду їх фізичних характеристик // Науковий вісник ЛДАВМ ім. С.З. Гжицького. - 1999. - В.2, ч. II. - С.185 - 188.

5. Білонога Ю.Л. Оптимальна дія поверхнево-активних речовин для інтенсифікації фізико-хімічних процесів при виробництві шкіри / Ю.Л. Білонога, Ю.Ю. Варивода // Науковий вісник ЛДАВМ ім.С.З.Гжицького. - 2000. - Т.2, ч.4. - С.14 - 17.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано використовувати поверхнево-активні речовини для інтенсифікації відмочувально-зольних процесів при переробці шкіри. Також розраховані швидкості розчинопоглинання та числа Рейнольдса в окремих капілярах шкіри. Докторант написав статтю.*

6. Кінетика капілярного волопоглинання при рідинній обробці шкіри та деякі аспекти енергозбереження / М.І. Пашечко, Ю.Л. Білонога, Б.Р. Ціж Д.М. Білонога, О.Р. Максисько // Науковий вісник ЛДАВМ ім.С.З.Гжицького.- 2001. -Т.3,ч.1.- С.179- 182.

**Особистий внесок:** *Докторантом визначене водопоглинення шкіурою прісно-сухого консервування без і з використанням ПАР. Також проведений експеримент на зразках шкіри прісно-сухого консервування. Докторант написав статтю.*

7. Білонога Ю.Л. Деякі аспекти енергозбереження при виробництві інсуліну / Ю.Л. Білонога, Д.М. Білонога, Ю.Ю. Варивода // Науковий вісник ЛДАВМ імені С.З.Гжицького. - 2001. - Т.3, ( № 4) Виш. 3. - С.217 - 220.

**Особистий внесок:** *Докторант виклав основні положення енергозберігаючих аспектів при виробництві інсуліну. Запропоновано використовувати добавку діетилового ефіру до основного екстрагенту (етилового спирту) при виробництві інсуліну. Докторант експериментально визначив коефіцієнти поверхневого натягу та динамічної в'язкості різних спиртових розчинів, написав статтю).*

8. Білонога Ю.Л. Інтенсифікація процесу фільтрування при використанні поверхнево-активних речовин (ПАР) // Інтегровані технології та енергозбереження.- 2001. - № 1. - С. 35 - 38.

9. Використання поверхнево-активних речовин (ПАР) в процесі фільтрування / Ю.Л. Білонога, Б.Р. Ціж, І.Г. Береза Ю.Ю. Варивода, Т.Б. Цилип // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: 2001.- Випуск 1, Т.23. - С. 3 - 6.

**Особистий внесок:** *Докторант провів експеримент на стенді гідромеханічних процесів, що сконструйований та розроблений автором, який підтвердив підвищення швидкості фільтрування при використанні ПАР, написав статтю.*

10. Білонога Ю.Л. До питання турбулентного осадження диспергованих частинок в суцільному середовищі // Інтегровані технології та енергозбереження. - 2002. - № 1 - С. 71 - 74.

11. Про техніко-економічну доцільність використання псевдозрідженого шару при виробництві інсуліну / Ю.Л. Білонога Б.Р. Ціж Д.М. Білонога Ю.Ю. Варивода // Науковий вісник ЛДАВМ імені С.З.Гжицького. - 2002. – Т.4, №.1. - С.156 - 159.

**Особистий внесок:** Докторант запропонував проводити екстракцію інсуліну в псевдозрідженому шарі подрібненої підшлункової залози забійних тварин, провів техніко-економічне обґрунтування, написав статтю.

12. Білонога Ю.Л. Особливості розрахунку теплообмінної апаратури з урахуванням теплового опору приграничного шару / Ю.Л. Білонога, О.Р. Максисько, Б.Р. Ціж // Науковий вісник ЛДАВМ імені С.З.Гжицького. - 2002. - Т.4, (№.2), Частина 5. - С.97 - 104.

**Особистий внесок:** Докторант запропонував розраховувати загальний коефіцієнт теплопередачі кожухотрубного теплообмінника з врахуванням теплового опору приграничного ламінарного шару ( $\delta$ ), ввів поняття турбулізації  $\delta$  шару.

13. Білонога Ю.Л. Критерій оптимізації гравітаційного процесу екстракції в системі тверде тіло-рідина або рідина-рідина / Ю.Л. Білонога Д.М. Білонога // Вісник НУ "Львівська політехніка" Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. - 2003. - № 480. - С. 3 – 6.

**Особистий внесок:** Докторант ввів критерій оптимізації гравітаційного процесу екстракції в системі тверде тіло-рідина або рідина-рідина методом розмірностей, написав статтю. Докторант запропонував нову формулу для розрахунку товщини приграничного ламінарного шару при русі рідини в трубопроводі.

14. Білонога Ю.Л. Оптимальні параметри подрібнення сировини при виробництві інсуліну з використанням псевдозрідженого шару / Ю.Л. Білонога, Д.М. Білонога // Науковий вісник ЛДАВМ імені С.З.Гжицького. - 2003. - Т.5. - №. 2.- Частина 1. - С.115-119.

**Особистий внесок:** Докторантом розраховані пріоритетні параметри подрібнення сировини а також основні параметри псевдозрідженого шару при екстракції інсуліну з подрібненої підшлункової залози забійних тварин. Докторант написав статтю.

15. Білонога Ю.Л. Оптимальні параметри подрібнення сировини при виробництві адренкортикотропного гормону (АКТГ) з використанням псевдозрідженого шару // Науковий вісник ЛДАВМ імені С.З.Гжицького. - 2003. - Т.5, №.4. - С.3 - 7.

16. Підвищення коефіцієнта теплопередачі теплообмінної апаратури при використанні поверхнево-активних речовин / Ю. Білонога, О. Максисько, Б. Ціж, Ю. Варивода // Науковий вісник ЛДАВМ імені С.З. Гжицького. - 2004. - Т.6, (№.2), Частина 3. - С.126 – 132.

**Особистий внесок:** Докторант запропонував підвищувати загальний коефіцієнт теплопередачі в кожухотрубному теплообміннику шляхом введенням ПАР у теплоносій.

17. Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів подрібнення твердої сировини під час розчинення та екстракції в полі гравітаційних або відцентрових сил // Вісник НУ "Львівська політехніка" Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. - 2004. - №

- нічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. - 2004. - № 481. - С. 104 – 116.
18. Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів перемішування для максимальної інтенсивності дифузійних процесів // Науковий вісник ЛНАВМ імені С.З. Гжицького. - 2004. Т.6, №.3 Частина 6. - С. 8 - 14.
19. Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів псевдозрідженого шару в системі тверде тіло – рідина / Ю.Л. Білонога, М.І. Папечко, Б.Р. Ціж // Холодильна техніка і технологія.- 2005.- №1 - С.69 - 76.  
**Особистий внесок:** Докторант розрахував пріоритетні параметри подрібнення твердої сировини, використовуючи виведений ним параметр оптимізації, густиною  $110 \text{ кг/м}^3$  під час екстракції у воді при різних температурах, навів приклад розрахунку пріоритетних параметрів псевдозрідження при виробництві АТФ, написав статтю.
20. Білонога Ю.Л. До питання розрахунку коефіцієнта теплопередачі теплообмінної апаратури / Ю.Л. Білонога, О.Р. Максисько, Б.Р. Ціж, Ю.Ю. Варивода // Науковий вісник ЛНАВМ імені С.З. Гжицького. - 2005. - Т.7, (№.2), Частина 6. - С. 3 - 7.  
**Особистий внесок:** Докторант запропонував і перевірів корелятивну залежність між зміною коефіцієнта тепловіддачі і товщиною  $\delta$  приграничного шару при зростанні числа Рейнольдса в теплообмінній апаратурі.
21. Білонога Ю.Л. Підвищення коефіцієнта теплопередачі кожухотрубного теплообмінника при тепловій обробці молока / Ю.Л. Білонога, О.Р. Максисько // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - 2005. – Випуск 38. - С.82 - 87.  
**Особистий внесок:** Докторант запропонував вводити лляну олію до молока, як ІІАР добавку для збільшення загального коефіцієнта теплопередачі при тепловій обробці молока.
22. Білонога Ю.Л. Експериментальне підтвердження критеріїв оптимізації екстракції та розчинення в полі гравітаційних або відцентрових сил // Вісник НУ “Львівська політехніка” Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. - 2005.- № 535.- С. 9 – 14.
23. Білонога Ю.Л. Інтенсифікація та оптимізація процесу екстракції при виробництві інсуліну / Ю.Л. Білонога, Д.М. Білонога, Б.Р. Ціж, Ю.Ю. Варивода // Науковий вісник ЛНАВМ імені С.З. Гжицького. - 2005.-Т.7, (№.4), Частина 2. - С. 256 -260.  
**Особистий внесок:** Докторантом запропонована методика розрахунку пріоритетних параметрів подрібнення та псевдозрідження при екстрагуванні панкреатину з підшлункової залози забійних тварин у відцентровому екстракторі, розраховані оптимальні параметри цього процесу. Докторант написав статтю.
24. Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів відцентрового екстрагування у псевдозрідженому шарі при виробництві органопрепаратів / Ю.Л. Білонога

Р.Й. Кравців // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій.- 2006.- Випуск № 28 - С. 174 - 181.

**Особистий внесок:** *Запропоновано методику розрахунку, а також конструктивні елементи відцентрового екстрактора з псевдозрідженим шаром в системі тверде тіло - рідина для екстракції органопрепаратів. Докторант написав статтю.*

25. Білонога Ю.Л. Про доцільність розгляду гідромеханічних процесів з урахуванням сил поверхневого натягу на границі контакту тверде тіло-рідина // Інтегровані технології та енергозбереження.- 2006. - № 2. - С. 56 - 64.

26. Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів подрібнення та перемішування при екстракції органопрепаратів // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій.- 2006.- Випуск № 29.- С. 187- 194.

**Особистий внесок:** *Докторант запропонував для збільшення коефіцієнта теплопередачі теплообмінників додавати ПАР до теплоносіїв, запропонував вводити лляну олію до молока, як ПАР добавку для збільшення загального коефіцієнта теплопередачі при тепловій обробці молока.*

### Патенти

27. ПАТ. 53421 А Україна, МПК 7 А61К38/00, С07К1/00. Спосіб екстракції інсуліну з підшлункової залози забійної худоби / Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська - № 2002054144; заявлено 21.05.02; опубл.15.01.03, Бюл. № 1.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції інсуліну з подрібненої підшлункової залози забійних тварин у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу.*

28. ПАТ. 55103 А Україна, МПК 7А61К38/00, С07К1/00. Спосіб інтенсифікації екстракції інсуліну з підшлункової залози забійних тварин / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська.- № 2002075345; заявлено 01.07.02; опубл. 17.03.03, Бюл. № 3.

**Особистий внесок:** *Докторант запропонував вводити в основний екстрагент при виробництві інсуліну – етиловий спирт 15-20 мас.% етилового ефіру, розрахував пріоритетні параметри цього процесу).*

29. ПАТ. 56795 А Україна, МПК 7А61К38/17, С07К1/00. Приспрій для інтенсифікації перебігу дифузійних процесів в системі тверде тіло - рідина, наприклад, інтенсифікації екстракції інсуліну з підшлункової залози забійних тварин / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська - № 2002097493; заявлено 17.09.02; опубл. 15.05.03, Бюл. № 5.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції ряду органопрепаратів з подрібненої ендокринної сировини у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина.*

30. ПАТ. 59263 А Україна, МПК 7 А61К38/00, С07К1/00. Спосіб інтенсифікації дифузійних процесів, наприкладі екстракції інсуліну з підшлункової за-

лози забійних тварин / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська - № 20021210384; заявлено 20.12.02; опубл. 15.08.03, Бюл. № 8.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновані пріоритетні параметри псевдозрідженого шару в системі тверде тіло-рідина на прикладі екстракції інсуліну, розраховані пріоритетні параметри цього процесу.*

31. ПАТ. 62393 А Україна, МПК7 С07Н19/20. Спосіб виробництва аденозинтрифосфорної кислоти / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська - № 2003032269; заявлено 17.03.03; опубл. 15.12.03, Бюл. №12.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції аденозинтрифосфорної (АТФ) кислоти з подрібненої м'язової тканини м'яса забійних тварин у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина. Також докторантом розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу.*

32. ПАТ. 63580 А Україна, МПК 7 А61К38/00, А61К35/39. Спосіб екстракції панкреатину з підшлункової залози забійних тварин / Р.Й. Кравців Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська - № 2003054151; заявлено 08.05.03; опубл. 15.01.04, Бюл. № 1.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції панкреатину з подрібненої підшлункової залози забійних тварин у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу.*

33. ПАТ. 64364 А Україна, МПК 7 А61К38/00. Спосіб екстракції адренкортикотропного гормону / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська - № 2003054568; заявлено 20.05.03; опубл. 16.02.04, Бюл. №2.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції адренкортикотропного гормону (АКТГ) з подрібнених гіпофізів забійних тварин у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу.*

34. ПАТ. 11323 А Україна, МПК 7 А61К38/00, С07К1/00. Спосіб підвищення ефективності екстрагування панкреатину з підшлункової залози забійних тварин / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська - № и 20050657; заявлено 21.06.05; опубл. 15.12.05, Бюл. № 12.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції панкреатину з подрібненої підшлункової залози забійних тварин у відцентровому екстракторі, у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу в полі відцентрових сил.*

35. ПАТ. 75715 А Україна, МПК 7 А61К35/32. Спосіб екстракції хонсуриду / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська - № 20040403003; заявлено 22.04.04, опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції хонсуриду з подрібнених хрящів, трахей, носа забійних тварин у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу.*

36. ПАТ. 75736 А Україна, МПК 7А61К35/28. Спосіб екстракції спленіну / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська - № 20040503493; заявлено 11.05.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції спленіну з подрібненої селезінки забійних тварин у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу.*

37. ПАТ. 13519 А Україна, МПК 7А61К38/00, С07К1/00. Спосіб підвищення ефективності екстрагування аденозинтрифосфорної кислоти з м'язової тканини м'яса забійних тварин / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська; - № и 200506345; заявлено 29.06.05; опубл. 17.04.06, Бюл. № 4.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції аденозинтрифосфорної кислоти з подрібненої м'язової тканини м'яса забійних тварин у відцентровому екстракторі, у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу в полі відцентрових сил.*

38. ПАТ. 13913 А Україна, МПК 7А61К38/00, С07К1/00. Спосіб підвищення ефективності екстрагування адренкортикотропного гормону / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська; - № и 200510732; заявлено 14.11.05; опубл. 17.04.06, Бюл. № 4.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції адренкортикотропного гормону з подрібнених гіпофізів забійних тварин у відцентровому екстракторі, у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу в полі відцентрових сил.*

39. ПАТ. 14491 А Україна, МПК С07К1/14, 7А61К38/22, 7А61К38/28С, С07К 75/00, С07К 14/625. Спосіб підвищення ефективності екстрагування ендокричних препаратів з органів забійних тварин, наприклад, ефективності екстрагування інсуліну / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога Л.В. Занічковська - № и 200511271; заявлено 28.11.05; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити основний процес екстракції інсуліну з подрібненої підшлункової залози забійних тварин у відцентровому екстракторі, у псевдозрідженому шарі в системі тверде тіло-рідина, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу в полі відцентрових сил.*

40. Позитивне рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель. Спосіб підвищення ефективності екстрагування хонсуриду з хрящів, трахей і носа забійних тварин / Р.Й. Кравців, Ю.Л. Білонога, Л.В. Занічковська; - № и 200602485; заявлено 06.03.06.

**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано проводити процес екстракції хонсуриду з подрібнених хрящів, трахей, носи забійних тварин у відцентровому екстракторі з псевдозрідженим шаром, розраховані пріоритетні параметри проведення цього процесу в полі відцентрових сил.*

## Матеріали наукових конференцій

41. Використання ультразвуку для підвищення продуктивності сепаратора / Б.Р. Ціж, Ю.Л. Білонога, Ю.Ю. Варивола, Ю.Л. Портак // «Сучасні проблеми ветеринарії, медицини, зооінженерії та технології продуктів тваринництва»: Тез. доп. Міжнар. наук.-практ. конф. - Львів. - 1997. - С. 631 - 633.  
**Особистий внесок:** *Докторантом запропоновано використовувати ультразвук для зменшення товщини приграничного ламінарного шару, а також динамічної в'язкості рідин, що можна використати для підвищення продуктивності сепаратора.*
42. Білонога Ю.Л. Шляхи інтенсифікації та оптимізації процесу екстракції при виробництві інсуліну / «Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодення та перспективи»: Матеріали ІХ-ої міжнародної науково-технічної конференції 17-19 жовтня 2005 р., Частина 2, -Київ.- НУХТ.- С. 17-18.

## АНОТАЦІЯ

**Білонога Ю.Л. Інтенсифікація та оптимізація тепломасообмінних процесів при виробництві органопрепаратів і переробці вторинної сировини м'ясокомбінатів. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2006.

В дисертаційній роботі представлена нова наукова концепція розгляду гідромеханічних процесів осадження, фільтрування, переміщення, псевдозрідження, а також руху рідин в трубопроводах чи апаратах з врахуванням дії сил поверхневого натягу в приграничному ламінарному шарі на границі контакту тверде тіло - рідина. Показано, що в границях цього шару поверхнєве число є співмірним з числом Ейлера, яким не можна нехтувати при складанні критеріальних рівнянь. Представлений метод розрахунку рекуперативної теплообмінної апаратури що враховує тепловий опір приграничних ламінарних шарів, а також метод підвищення коефіцієнта теплопередачі шляхом зменшення коефіцієнта поверхневого натягу теплоносіїв. Методом розмірностей та комп'ютерним експериментом над критеріальним рівнянням виведений параметр оптимізації дифузійних процесів, що може застосовуватися при розрахунках процесів розчинення, екстракції та інш. з подрібненої сировини в полі гравітаційних або відцентрових сил. На базі цього параметру запропоновано алгоритм розрахунку пріоритетних параметрів подрібнення сировини а також переміщення та псевдозрідження в екстракційній апаратурі. Розроблено ряд способів розрахунку, оптимізації та інтенсифікації дифузійних процесів при виробництві низки органопрепаратів з ендокринної сировини а також в шкіряному виробництві. Оптимізовані та виведені параметри переміщення та псевдозрідження, а та-

кож подрібнення сировини при екстракції інсуліну, аденозинтрифосфорної кислоти, панкреатину, адренкортикотропного гормону, хонсуриду, спленіну. Розроблені апарати для інтенсифікації перебігу дифузійних процесів з псевдозірдженим шаром в системі тверде тіло-рідина, зокрема при виробництві перелічених органопрепаратів.

**Ключові слова:** приграничний ламінарний шар, поверхнєве число, параметр оптимізації гравітаційної та відцентрової екстракції, псевдозірджений шар, ендокриша сировина.

## АННОТАЦІЯ

**Билонюга Ю.Л. Интенсификация и оптимизация теплообменных процессов при производстве органопрепаратов и переработке вторичного сырья мясокомбинатов. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 - процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2006.

В диссертационной работе представлена новая научная концепция рассмотрения гидромеханических процессов осаждения, фильтрования, перемешивания, псевдооживления, а также движения жидкостей в трубопроводах или аппаратах с учетом действия сил поверхностного натяжения в приграничном ламинарном слое на границе контакта твердое тело – жидкость (стенка трубопровода – поток, осаждающаяся частица – экстрагент). Показано, что в границах этого слоя поверхностное число есть соизмеримым с числом Эйлера, которым нельзя пренебрегать при сложении критериальных уравнений. Представлен метод расчета рекуперативной теплообменной аппаратуры, который учитывает тепловое сопротивление приграничных ламинарных слоев, а также метод повышения коэффициента теплопередачи путем уменьшения коэффициента поверхностного натяжения теплоносителей. Метод интенсификации теплопереноса в теплообменной аппаратуре путем добавления до теплоносителей примесей поверхностно-активных веществ (ПАВ) (вода + 0,026 мас.% сульфоната натрия, молоко + 0,010 мас.% льняного масла) дает возможность повысить общий коэффициент теплопередачи кожухотрубного теплообменника на 38 %.

При добавлении ПАВ к воде (0,05 мас.% и 0,1 мас.% сульфоната натрия) на 14 % интенсифицируется растворопоглощение шкурой пресно-сухого консервирования в отмачивально-зольных процессах при производстве кожного полуфабриката.

Методом размерностей и компьютерным экспериментом над критериальным уравнением выведен новый параметр оптимизации диффузионных процессов, который может использоваться при расчете процессов растворения, экстракции и др. в

поле гравитационных или центробежных сил с оптимизацией параметров измельчения сырья. На базе этого параметра разработан алгоритм расчета приоритетных параметров измельчения сырья, а также перемешивания и псевдооживления в экстракционной аппаратуре. Разработаны способы расчета, оптимизации и интенсификации диффузионных процессов при производстве ряда органолептических препаратов с эндокринного сырья, а также в кожано-медицинском производстве. Оптимизированы и внедрены параметры перемешивания и псевдооживления, а также измельчения сырья при экстракции инсулина, аденозинтрифосфорной кислоты, панкреатина, адренокортикотропного гормона, хонсурида, спленина. Разработан гравитационный экстрактор для интенсификации прохождения диффузионных процессов со взвешенным слоем в системе твердое тело–жидкость, в частности, при производстве перечисленных органолептических препаратов. Разработан центробежный экстрактор, который настраивается на приоритетную частоту вращения в зависимости от эндокринного сырья и экстрагента. При такой экстракции измельчение сырья животного происхождения производится до среднего диаметра частиц  $d_c \approx 1 \cdot 10^{-3}$  м.

**Ключевые слова:** приграничный ламинарный слой, поверхностное число, параметр оптимизации гравитационной и центробежной экстракции, псевдооживленный слой, эндокринное сырье.

## ANNOTATION

**Bilonoha Y.** The intensification and optimisation of the heat - and mass - exchange processes in the production of the organic preparations and in the alteration of the recycled meat-packing factories resources . – Manuscript.

Thesis for a Doctor's degree of technical sciences in specialty: 05.18.12 – processes and equipment for microbiological and pharmaceutic manufacture. – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2006.

In the thesis are presented a scientific consideration conception of processes of hydromechanic sedimentation, filtration, mixing, pseudoliquefying and liquid movement in pipes and apparatuses, taking into consideration surface tension activity on the contact limit of solid body and liquid. It was shown, that the surface number in limits of the boundary laminar layer is commensurable with the Euler number, which is not omitted in criterion equations compilation. A new recuperation rate method of heat-exchange apparatus, that considers the heat resistance of boundary laminar layers and a method of heat transfer increasing by the heat-carrying agent surface tension coefficient reduction are presented. By the dimensional method and by computing experiment on criterion equation was deduced a new optimisation parametr for diffusion processes, that can be used in computing of solution, extraction etc. processes of cut raw material in the gravity and centripetal force fields. On basis of this criterion a new algorithm of priority parameters rating of raw material cutting, mixing and pseudoliquefying in extraction equipment was proposed. It was worked out series of computing methods for optimisation and intensifica-

tion of diffusive processes in manufacture of a number of organic drugs from endocrine raw material as well as in leather manufacture. The optimized and introduced parameters of mixing and pseudoliquefying as well as cutting of raw material in manufacture of insulin, adenosine triphosphate acid, pancreatine, adrenocorticotropic hormone, honsuride, splenine. New preparates for the intensification of diffusive processes with pseudoliquefied layer in the solid-body-liquid system, especially in manufacture of higher-mentioned preparation were worked out.

**Key words:** boundary laminar layer, surface number, parametr of the optimization of gravity and centripetal extraction, pseudoliquefied layer, endocrine raw material.