

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗАВ'ЯЛОВ ВОЛОДИМИР ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 664.061.4:084 (043.3)

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА АПАРАТУРНЕ ОФОРМЛЕННЯ
ПРОЦЕСІВ ВІБРОЕКСТРАГУВАННЯ В ХАРЧОВІЙ
ПРОМИСЛОВОСТІ

Спеціальність 05.18.12 — процеси та обладнання харчових, мікробіологічних
та фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ-2014

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Малежик Іван Федорович
Національний університет харчових технологій, професор
кафедри процесів і апаратів харчових виробництв,
заслужений працівник вищої школи України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бурдо Олег Григорович,
Одеська національна академія харчових технологій,
завідувач кафедри процесів, апаратів та енергетичного
менеджменту, заслужений діяч науки і техніки України

доктор технічних наук, професор
Поперечний Анатолій Микитович,
Донецький національний університет економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського,
професор кафедри обладнання харчових виробництв

доктор технічних наук, професор
Дячок Василь Володимирович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри прикладної екології та збалансованого
природокористування

Захист відбудеться 24 червня 2014 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.058.02 в Національному університеті харчових технологій за адресою:
01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, аудиторія А — 311.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету харчо-
вих технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий 21 травня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент

Л. О. Кривопляс-Володіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Харчова та переробна галузі промисловості в наш час є одними з основних джерел наповнення державного бюджету країни та підвищення добробуту населення, тому проблема технічного удосконалення виробництва на основі модернізації машин і апаратів, застосування досягнень науки і техніки та прогресивних принципів технології вилучення корисних речовин з використанням нових фізичних засобів інтенсифікації процесів є предметом постійної уваги науковців та загальноновизнаним напрямом науково-технічного прогресу. Для найбільш енерго- та матеріалоємних галузей харчової промисловості, таких як цукрова, оліє-жирова, консервна, виноробна, пивоварна, лікеро-горілчана, крохмале-патокова, фармацевтична, де щорічно переробляються мільйони тон рослинної сировини та її відходів овочевого, кореневого, трав'яного, листового та плодово-ягідного походження, ці задачі особливо актуальні. Особливо це стосується процесу екстрагування, який є одним з основних у цих галузях.

При всій різноманітності конструкцій сучасних екстракторів періодичної та безперервної дії існують загальні недоліки, обумовлені тим, що дрібнофракційна рослинна сировина або підготовлена з неї маса не має достатньої поруватості для протитечійного безперервного екстрагування, погано транспортується, ущільнюється та стає малопроникною для екстрагенту. Практичне забезпечення умов оптимального ведення процесу екстрагування традиційними методами ускладнюється, з одного боку, названими та іншими властивостями сировини, з іншого — процесно-технологічними та конструктивними можливостями існуючого екстракційного обладнання. Аналіз традиційних способів екстрагування в системі тверде тіло-рідина вказав напрямок вирішення цієї проблеми, суть якого полягає в створенні таких гідродинамічних режимів руху, що забезпечують максимальне оновлення поверхні взаємодії фаз за рахунок створення режиму інтенсивної знакозмінної турбулізації потоку.

Серед відомих апаратів, в роботі яких застосовують такі режими, найбільш перспективними є віброекстрактори. Віброекстрагування є порівняно новим технологічним процесом, загальна теорія якого складна і знаходиться на початку свого розвитку. До сьогоднішнього часу залишається нез'ясованою низка важливих питань, пов'язаних з теорією та практикою віброекстрагування, що потребують визначення особливості фізичної природи дії коливань на стадії їх генерації і розповсюдження в робочому об'ємі апарата та перенесення маси на різних масштабних рівнях в системі тверде тіло – рідина стосовно до задач екстрагування із рослинної сировини, включаючи питання гідродинаміки протитечійного розділення фаз, а також цілеспрямованого конструювання апаратів періодичної та безперервної дії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано у рамках Національної програми виробництва технологічних комплексів, машин та обладнання сільського господарства, харчової та переробної промисловості, затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України за № 536 від 18 вересня 1992 року, згідно із завданням, викладеним у плані науково-дослідних та дослідно-конструкторських розробок Міністерства аграрної політики України (наказ №181 від 10.06.96р. “Розробка і впровадження вібраційних машин для переробних галузей АПК”, відповідно до координаційного плану науково-дослідних робіт НУХТ за напрямом “Розроблення наукових основ тепломасообмінних та інших процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв з метою створення високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації і автоматизації”, плану науково-дослідної роботи кафедри процесів і апаратів харчових виробництв НУХТ «Наукове обґрунтування та апаратурне оформлення процесу віброекстрагування в харчовій і фармацевтичній промисловості» (шифр держреєстрації 0112U004674 за кодом тематичної рубрики 65.13.23 від 18.06.12) за напрямом «Інтенсифікація технологічних процесів в харчовій і мікробіологічній промисловості», а також держбюджетної тема-

тики фундаментальної науково-дослідної роботи ПНДЛ НУХТ «Дослідження впливу низькочастотних механічних коливань на інтенсифікацію процесу екстрагування із рослинної сировини» (наказ МОН №54 від 16.11.05, шифр держреєстрації 006U000418), і госпдоговірної тематики № 613/11 від 28.03.11 «Розроблення та впровадження технології отримання концентрованих екстрактів із рослинної сировини зернового походження», договорів про науково-технічне співробітництво між НУХТ та ТОВ «Технологія, механізація, автоматизація», виробничо-комерційною фірмою "Техно-Т" (м. Ніжин), ТОВ "ЧОЙС" (м. Київ).

Автором здійснювалось наукове керівництво названими кафедральними держбюджетними науково-дослідними та госпдоговірними тематиками, особисто розроблено концепцію, задачі та методики комплексних досліджень, здійснено планування експериментів, їх практичну реалізацію та узагальнення результатів, у співавторстві розроблено нові конструкції віброекстракторів, обґрунтовано їх робочі режими, розроблено апаратурно-технологічні схеми.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи — на основі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень гідродинаміки і масообміну на різних масштабних рівнях при інтенсифікації процесу вилучення цільових компонентів із рослинної сировини в полі низькочастотних механічних коливань, як джерела створення пульсуючих вібротурбулізуючих знакозмінних гідродинамічних струменів в системі тверде тіло – рідина, виконати наукове обґрунтування і апаратурне оформлення процесів віброекстрагування в харчовій та інших галузях промисловості.

Відповідно до поставленої мети визначено наступні завдання:

- виконати системний аналіз методів інтенсифікації процесу екстрагування в системі тверде тіло-рідина;
- класифікувати масообмінні апарати з вібраційною системою перемішування та способи створення коливань реагуючих систем із забезпеченням умов їх відносного руху, а також визначити місце і роль віброекстрагування серед сучасних інтенсивних технологій;
- розробити методологічну систему математичного моделювання процесу віброекстрагування в харчовій промисловості;
- дослідити дифузійні властивості рослинної сировини кореневого, трав'яного та листового походження, що використовується в харчовій промисловості, а також вивчити вплив на них низькочастотних механічних коливань;
- створити методи експериментального оцінювання ефективності масообміну та структури гідродинамічних потоків при безперервному та періодичному віброекстрагуванні та нові лабораторні установки для вивчення процесу;
- дослідити гідродинаміку, розробити математичну модель та виконати всебічний опис закономірностей розповсюдження пульсуючих струменів, що генеруються елементами віброперемішувальних пристроїв;
- розробити математичні моделі структури потоків віброекстракторів безперервної дії;
- розробити математичні моделі протитечійного розділення фаз при безперервному віброекстрагуванні та обґрунтувати механізм цього процесу;
- дослідити масштабування процесу віброекстрагування рослинної сировини на основі просторово-часових співвідношень;
- дослідити енерговитрати на періодичний та безперервний процеси віброекстрагування;
- розробити методику інженерного розрахунку віброекстрагування в харчовій промисловості;
- розробити високопродуктивні енергоощадні віброекстрактори періодичної та безперервної дії для системи тверде тіло-рідина з малою різницею густин фаз і на їх основі апаратурно - технологічні схеми поглибленої переробки рослинної сировини в різних галу-

зях промисловості;

- обґрунтувати економічну доцільність впровадження запропонованих нових технічних рішень та результатів у промисловість.

Об'єкт дослідження — гідродинаміка і масообмін в системі тверде тіло-рідина в полі низькочастотних механічних коливань на різних масштабних рівнях.

Предмет дослідження — віброекстрагування цільових компонентів із рослинної сировини.

Методи дослідження — аналітичні, теоретичні, експериментальні. Для теоретичних досліджень, узагальнення результатів експериментів та перевірки на адекватність отриманих математичних моделей використані методи математичного моделювання технологічних процесів харчових виробництв і математико-статистичного аналізу. Основні гідродинамічні і масообмінні характеристики віброекстрагування одержували теоретичними та експериментальними методами, заснованими на класичних положеннях і законах запропонованих проф. Лисянським В. М., Аксельрудом Г. А., використовували метод аналізу розмірностей, теорії: масопередачі, перемішування в рідких середовищах, турбулентних струменів, пограничного шару, оновлення поверхні фазової взаємодії, розчинення та ін.), із застосуванням сучасної вимірювальної апаратури. Масообмін досліджувався з використанням типових методик визначення якісних показників екстрактів із рослинної сировини, методів контролю бурякоцукрового та пивоварного виробництв. Структура гідродинамічних потоків віброекстракторів періодичної та безперервної дії вивчалась методом трасування на основі дифузійної, коміркової та комбінованої моделей. Оброблення експериментальних даних та розрахунки виконувались із застосуванням сучасних інтегрованих систем MathCAD, КОМПАС-V14, AutoCAD, CorelDRAW-X5, MatLab R2011b, OriginPro 8.6 та ін.

Наукова новизна одержаних результатів виражена у науковому обґрунтуванні теорії гідродинаміки та масообміну при віброекстрагуванні в системі тверде тіло-рідина з малою різницею густин фаз, що базується на нових уявленнях про механізми масоперенесення і структуру гідродинамічних потоків на різних масштабних рівнях процесу, а саме:

– на основі просторово- часових співвідношень і фундаментальної теорії турбулентних струменів Прандтля-Шліхтінга вперше науково обґрунтовано закономірності розповсюдження у непроточному середовищі турбулентних пульсуючих струменів, генерованих елементами віброперемішувальних і вібротранспортувальних пристроїв;

– дістало подальшого розвитку обґрунтування механізму протитечійного розділення фаз при безперервному віброекстрагуванні;

– набули подальшого розвитку теорія та методика встановлення зв'язку між параметрами коливань віброперемішувальної системи та розповсюдженням у непроточному середовищі пульсуючих турбулентних струменів, необхідні для конструювання та масштабування віброекстракторів;

– виходячи з умов взаємодії фаз, побудована нова математична модель, що описує кінетику зовнішнього масообміну з урахуванням нерівномірності перенесення речовини при екстрагуванні із рослинної сировини для визначення мінімальної тривалості процесу для досягнення рівноважного стану системи;

– розроблена нова математична модель масоперенесення на всіх масштабних рівнях при твердофазному екстрагуванні з урахуванням щільності зовнішніх джерел накопичення цільового компонента в екстрагенті в зоні віброперемішування, що може бути використана на стадії проектування віброекстракційної апаратури та при розв'язанні оптимізаційних задач;

– вперше розроблена математична модель, що встановлює зв'язок рівня поздовжнього перемішування з режимними параметрами роботи віброекстракторів безперервної дії, а також математичний опис структури гідродинамічних потоків, з урахуванням наяв-

ності застійних зон, зворотних та байпасних потоків в апаратах;

- виконано математичний опис протитечійного розділення фаз в умовах твердофазового віброекстрагування, що встановлює зв'язок продуктивності апаратів за твердою фазою з параметрами коливання вібросистеми;

- науково обґрунтовано нові підходи для експрес-аналізу ефекта масоперенесення екстракційних процесів за об'ємним коефіцієнтом масопередачі на основі введення просторово-часових співвідношень, а також за коефіцієнтом розчинення модельної сировини з дифузійним типом її розчинення;

- встановлена та науково обґрунтована залежність енергетичних показників та режимних параметрів роботи віброекстракторів періодичної та безперервної дії.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Математичні моделі структури гідродинамічних потоків, динаміки розповсюдження у непроточному середовищі пульсуючих турбулентних струменів, а також масоперенесення на всіх масштабних рівнях в умовах періодичного та безперервного віброекстрагування, обґрунтовані використанням фундаментальних фізичних законів. Математичні та математико-статистичні методи узагальнення експериментальних даних відповідають фундаментальним теоріям гідродинаміки та масоперенесення.

Наведені в роботі наукові результати, висновки та рекомендації обґрунтовані результатами розрахунків та експериментів, отриманих з використанням стандартного комп'ютерного програмного забезпечення та універсальної контрольно-вимірювальної апаратури.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено нові енергоощадні вископродуктивні конструкції віброекстракторів періодичної та безперервної дії та нові конструктивні рішення віброперемішувальних і вібротранспортувальних пристроїв.

Побудовані нові математичні моделі для визначення мінімального часу екстрагування та поточної концентрації насичення екстрагенту цільовим компонентом можуть бути використані для оптимізації технологічного режиму роботи апаратів для віброекстрагування та їх конструктивних параметрів.

Вперше розроблена методика інженерного розрахунку твердофазового віброекстрагування в харчовій промисловості.

Розроблено нові конструкції віброекстракторів періодичної дії з можливістю їх роботи під розрідженням у режимі з проміжним віджимом та віброперемішувальних пристроїв, здатних створювати організований протиспрямований рух взаємодіючих фаз, а також ряд нових конструкцій віброекстракторів безперервної дії та вібротранспортувальних і віброперемішувальних пристроїв. Результати використані КБ «Яготинський механічний завод» фірми «Технологія, механізація, автоматизація» для розроблення технічної документації віброекстракторів періодичної та безперервної дії. Обґрунтовано та розроблено нові принципів та апаратурно-технологічні схеми поглибленої перероблення рослинної сировини та її відходів на прикладі чайної, хмельової сировини, хвостиків та бою цукрових буряків з застосуванням періодичного та безперервного віброекстрагування. Віброекстрактори періодичної та безперервної дії успішно пройшли випробування в умовах агропромислового виробництва в м. Берегово, ТОВ «Бердичівський пивоварний завод», ТОВ «ЧОЙС», а також Келерашського консервного заводу республіки Молдова.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження у виробництво віброекстрактора періодичної дії для отримання чайних екстрактів складатиме 73,2 тис. грн.; для отримання екстрактів із зернової рослинної сировини складатиме 37,1 тис. грн.; для перероблення некондиційної бурякомаси безперервним способом у цукровому виробництві (для заводу продуктивністю 3 тис. т перероблення буряків на добу) — 2,9 млн. грн.; для отримання хмельових екстрактів у пивоварному виробництві — 1,0 млн. грн.

Технічна новизна апаратів та апаратурно-технологічних схем підтверджена 11 патентами України на винаходи.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес при підготовці фахівців напряму „Харчова технологія та інженерія” при вивченні дисциплін «Процеси і апарати харчових виробництв», «Математичні моделі в розрахунках на ЕОМ», «Математико-статистичні методи досліджень», при підготовці підручників і навчальних посібників з процесів і апаратів харчових виробництв, а також при курсовому та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, обґрунтуванні і формулюванні ідеї і теми дисертації; розробленні математичних моделей масообміну та гідродинаміки при віброекстрагуванні; узагальненні експериментальних даних; формулюванні відповідних висновків та рекомендацій.

Впровадження результатів роботи та експериментальні дослідження останніх років виконані в процесі керування науковою роботою колективу аспірантів дисертанта у складі Н. В. Попової, Т. Г. Мисюри, Ю. В. Запорожець при безпосередній участі автора та співпраці з проф. В. С. Бодровим. Патентування розроблених нових конструкцій апаратів, апаратурно-технологічних схем, публікація статей у фахових виданнях за темою дисертації є результатом колективної творчості і базується на дослідженнях здобувача. Конкретний особистий внесок здобувача в опублікованих за темою дисертації наукових працях, авторських свідоцтвах та патентах на винаходи, наведено у списку праць. Обговорення та аналіз результатів дослідження проведені з науковим консультантом проф. І. Ф. Малежиком.

Апробація результатів дисертації виконана шляхом оприлюднення та публічного обговорення на науково-технічних конференціях: VII Республиканской научно-технической конференции «Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств» (Львов, 1988.); Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов «Совершенствование технологических процессов производства новых видов пищевых продуктов и добавок» (Київ, ВНИИППД, 1989); Республиканской научно-технической конференции «Интенсификация технологии и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК» (Київ, КТИПП, 1989); Всесоюзной конференции по теории и практике перемешивания в жидких средах «Теория и практика перемешивания в жидких средах» (Ленинград, 1990); Республиканской научно-технической конференции «Разработка и внедрение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевой и перерабатывающей отрасли АПК» (Київ, КТИПП, 1991); Межгосударственной конференции «Обработка жидких сред электромагнитными полями. Тепломассообмен и гидродинамика в турбулентных течениях» (Алушта, 1992); Міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення процесів і апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв» (Одеса, ОДАХТ, 1996); Міжнародній науково-технічній конференції «Розроблення та впровадження прогресивних ресурсощадних технологій та обладнання в харчову промисловість» (Київ, УДУХТ, 1997); III міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Євпаторія, 1998.); V міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості» (Київ, УДУХТ, 1999); IX міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодення і перспективи» (Київ, НУХТ, 2005); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв» (ХНТУСГ, Харків, 2007); Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні напрями розвитку технології машинобудування та металооброблення» (Ростов н/д, ДГТУ, 2008); IX міжнародній науково – технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Вінниця, ВДАУ, 2009); Науково – практичній конференції «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи» (Київ, НУХТ, 2010); IV Международной конференции «Экстракция органичес-

ких соединений» (Воронеж, ВГТА, 2010); X міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Львів, НУ «Львівська політехніка», 2011); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Земля України – потенціал економічної і екологічної безпеки держави» (Вінниця, ВНАУ, 2011); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології та обладнання харчових виробництв» (Тернопіль, ТНТУ, 2011); Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (Київ, НУХТ, 2012); Міжнародній конференції «Сучасні технології в харчовій промисловості» (Кишинів, Технічний університет Молдови, 2012); Міжнародному науково-практичному форумі «Наука і бізнес — основа розвитку економіки. Союз науки і бізнесу — Україні XXI сторіччя» (м. Дніпропетровськ, 2012); II Міжнародній спеціалізованій науково-практичній конференції «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентноздатності» (м. Київ, 2013); Другому Північно та Східно-європейському харчовому конгресі з харчової науки on Food 2013 (м. Київ, 2013).

За результатами дисертації автором було зроблено доповіді на пленарних засіданнях XI-тої Міжнародної науково-технічної конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв» (м. Одеса, ОНАХТ, 1980), Міжнародної науково-технічної конференції «Стан і перспективи розвитку сучасних технологій і обладнання переробних і харчових виробництв» (м. Вінниця, ВДАУ, 2009), Першого Північно-європейського харчового конгресу NEFood — 2012 (м. Санкт-Петербург, RUSFoST); XIV-тої Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (м. Одеса, ОНАХТ, 2012).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 84 роботи: 44 статті у фахових виданнях, 11 патентів України на винахід, 2 патенти України на корисну модель, 27 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 8 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Основний зміст дисертаційної роботи викладено на 310 сторінках, в тому числі 156 рисунків і 5 таблиць; до роботи додається 10 додатків на 160 сторінках. Список використаних літературних джерел містить 514 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрита сутність і стан наукової проблеми, її значимість, показано зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету та основні завдання досліджень, наведено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, інформацію про апробацію результатів дисертації та їх впровадження у виробництво.

У **першому розділі** наведено аналіз літературних джерел, що присвячені сучасному стану теорії та апаратного оформлення процесів вилучення цільових компонентів із рослинної сировини. Розкриваючи зміст дифузійних властивостей рослинної сировини та особливості математичного опису кінетики внутрішньодифузійної складової стадії перенесення, відзначено найвпливовіші на неї фактори, а також те, що складність морфологічної будови рослинної тканини та її новий стан після фізичного або фізико-хімічного впливу ускладнює створення універсальних методів опису кінетики процесу екстрагування. Процес описують рівняннями, що побудовані на чисельних припущеннях та спрощеннях реальних процесу — геометричних, морфологічних та фізико-хімічних, що не дає прямого розрахунку реального процесу, а лише має інформаційний зміст та інтерпретацію певної складової його стадії. Тоді, з практичної точки зору, для врахування дифузійної складової вилучення з рослинної тканини буде корисним визначення коефіцієнта молекулярної дифузії за відсутності екранування поверхні частинок, а також для умов з вибраними технологіч-

ними параметрами. Тобто, це може бути враховано без складних математичних моделей, наприклад, використовуючи коефіцієнт активності поверхні.

Аналізуючи сучасні технології та екстракційне обладнання, запропоновано класифікацію екстракційної апаратури для системи тверде тіло — рідина, а також дано порівняльну характеристику сучасних екстракторів з наведенням оригінальної класифікації способів технологічної реалізації низькочастотних механічних коливань та їх ознак з визначенням місця і ролі віброекстрагування в сучасній класифікації екстракційної апаратури та його прогнозований розвиток на основі системного та еволюційного підходів.

Зазначено, що переваги віброекстракторів, здатних переробляти рослинну сировину та її відходи з високим ступенем їх подрібнення, визначаються специфікою їх гідродинаміки, що ґрунтується на дії знакозмінних нестационарних турбулентних струменів і відкриває перед ними перспективи широкого використання в різних виробничих галузях. Віброекстрагування є порівняно новим технологічним процесом. Загальна його теорія складна і знаходиться на початку свого розвитку. Ефективна робота апаратів такого типу передбачає оптимізацію співвідношення між мікро-і макромасштабними параметрами дії турбулентних пульсуючих струменів, що можливо здійснити лише при більш глибокому аналізі їх природи. Конструктивно та за процесними особливостями віброекстрактори мають значні відмінності від традиційних екстракторів, що викликає необхідність пошуку та розроблення оригінальних привідної, віброперемішувальної і, в окремих випадках, одночасно вібро-транспортувальної систем. Внаслідок цього у віброекстракторах спостерігається відмінна структура гідродинамічних потоків та наявні особливості оновлення поверхні контакту фаз. Відомі методи розрахунку гідродинамічних, теплових і масообмінних характеристик традиційних екстракторів є непридатними у практичному використанні для віброекстракторів. До сьогодення залишається нез'ясованим ряд важливих питань, пов'язаних з теорією та практикою віброекстрагування, а саме: особливостями фізичної природи дії коливань на стадії їх генерування і розповсюдження в робочому об'ємі апарата; з перенесенням маси на різних масштабних рівнях в системі тверде тіло – рідина стосовно до задач екстрагування із рослинної сировини, включаючи питання гідродинаміки протитечійного розділення фаз; цілеспрямоване конструювання апаратів періодичної та безперервної дії. Удосконалення віброекстракційної апаратури, збільшення її продуктивності та технологічної ефективності може бути досягнуто на основі дослідження гідродинаміки та відповідних масообмінних характеристик процесу з урахуванням масштабних ефектів. Нові підходи до оцінення закономірностей гідродинаміки і масообміну процесу віброперемішування та протитечійного розділення фаз повинні базуватися на врахуванні фундаментальних законів руху пульсуючих струменів, генерованих віброперемішувальними пристроями спеціальних конструкцій, а також на врахуванні основ системного та еволюційного підходів. Від цього залежить подальший розвиток наукових основ віброекстрагування, методів гідродинамічного та масообмінного розрахунків віброекстракторів з метою створення найбільш ефективних конструкцій та вимагає розроблення цих методів з урахуванням просторово-часових закономірностей процесу. Зазначено, що використання традиційних способів визначення інтенсивності зовнішнього масообміну, в основу яких покладено розгляд елементарних процесів для тіл найпростішої геометричної форми в умовах, коли конвекція за межами тіла усталена, надто спрощує ідентифікацію теоретичних та експериментальних даних, зокрема для визначення кінетичних коефіцієнтів. З іншого боку, врахування всіх чинників, що впливають на процес (гідродинаміка обтікання твердого тіла екстрагентом, поля швидкостей та концентрацій екстрагента навколо частинки, її геометричні та дифузійні особливості, тощо), ускладнює визначення цієї найважливішої для екстрагування характеристики. Разом з тим, вивчення закономірностей зовнішнього перенесення маси в системі тверде тіло-рідина за допомогою коефіцієнта масовіддачі на сьогодні є поки що єдиним способом. Відомі аналітичні методи є громіздкими, а точність розрахунків залежить

від якості визначення розмірів частинок, коефіцієнта дифузії тощо. Отже, існує необхідність створення більш простих, у порівнянні з класичними, і, одночасно, більш точних методів оцінювання інтенсивності зовнішнього масообміну, що ґрунтуються на методах математичного моделювання. Відсутність надійних рівнянь для розрахунку структури потоків при вібраційному перемішуванні в системі тверде тіло-рідина, рівнянь для розрахунку транспортувальних ефектів для безперервних режимів роботи апарата, витрат енергії, а також небагаточисельні дослідження масопередачі, які не мають достатньо широких узагальнень, що необхідні для конструювання та масштабування нових апаратів, стримують розробку і широке промислове використання віброекстракційної апаратури.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню конструктивних рішень створених експериментальних установок та методик досліджень, які визначили шляхи опрацювання та узагальнення результатів досліджуваних процесів та їх апаратурного оформлення.

Процес безперервного віброекстрагування досліджувався на розробленій моделі віброекстрактора безперервної дії за схемою рис.1. Установа має вертикальний циліндричний корпус з приєднаним *U*-подібним завантажувальним пристроєм. Для подачі екстрагенту в останній верхній царзі закріплений душовий розподілювач у вигляді лотка.

Всередині колони розміщено врівноважений вібротранспортувальний пристрій, що складається із системи штоків із закріпленими на них транспортувальними тарілками спеціальної конструкції (в залежності від виду рослинної сировини: трав'яного, листового, кореневого, плодово-ягідного, зернового походження), показаними на рис.1 (*б, в, г, д*) з можливістю регулювання їх кількості, відстані між ними, частоти коливань та амплітуди. Для відбору проб екстрагенту для аналізу та відведення його з апарата в кожній царзі передбачено відбірні крани.

Через розподілювач апарат заповнюється екстрагентом, що подається на рівень верхньої тарілки. Одночасно встановлюється заданий амплітудно-частотний режим коливання вібротранспортувальної системи. Підготовлена до екстрагування подрібнена рослинна сировина через завантажувальний пристрій направляється під нижню тарілку, рухається безперервно вздовж апарата за допомогою вібротранспортувальних тарілок протитечійно екстрагенту з поступовим вилученням цільових компонентів та вивантажується з апарата у вигляді шроту через лоток. Готовий екстракт через фільтр відводиться з апарата. Протитечійне розділення фаз для всіх типів досліджуваних конструкцій вібротранспортувальних тарілок здійснюється за рахунок різниці гідравлічних опорів перетоку робочого середовища через транспортувальні відкриті елементи (гнучкі патрубки, стулки, або пелюстки), фільтрувального ефекту через фільтрувальні елементи та седиментації часток твердої фази на поверхні тарілок. Встановлений по периферії тарілок борт призначений для утримання твердої фази на їх поверхні, посилення розділювального ефекту фаз та запобігання відмиву дрібних фракцій твердої фази за межі під тарілку.

На рис.2 (*а, б, в*) показані установки для досліджень періодичного віброекстрагування, принцип роботи яких заснований на можливості працювати на дрібнофракційній рослинній сировині одночасно в режимі псевдозрідження та проміжного віджиму твердої фази в робочій зоні апарата. Під час руху штоку із закріпленими на ньому тарілками (рис.2*а*), або мембранами (рис.2*б*), зменшується міжтарілочний (міжмембранний) простір, віджимаючи сировину з одночасним її промиванням пульсуючими потоками, що генеруються в кінцевих отворах перемішувальних пристроїв. Під час руху штока вверх відбувається зворотній процес із збереженням ефекту промивання шару сировини пульсуючими струменями. Проникна лише для екстрагенту сітчаста поверхня контейнера 18 забезпечує відбір екстрагенту без вмісту твердої фази.

В розділі також висвітлена експериментальна установка та методика дослідження дифузійних властивостей рослинної сировини. Фізико-хімічні властивості рослинної сировини-

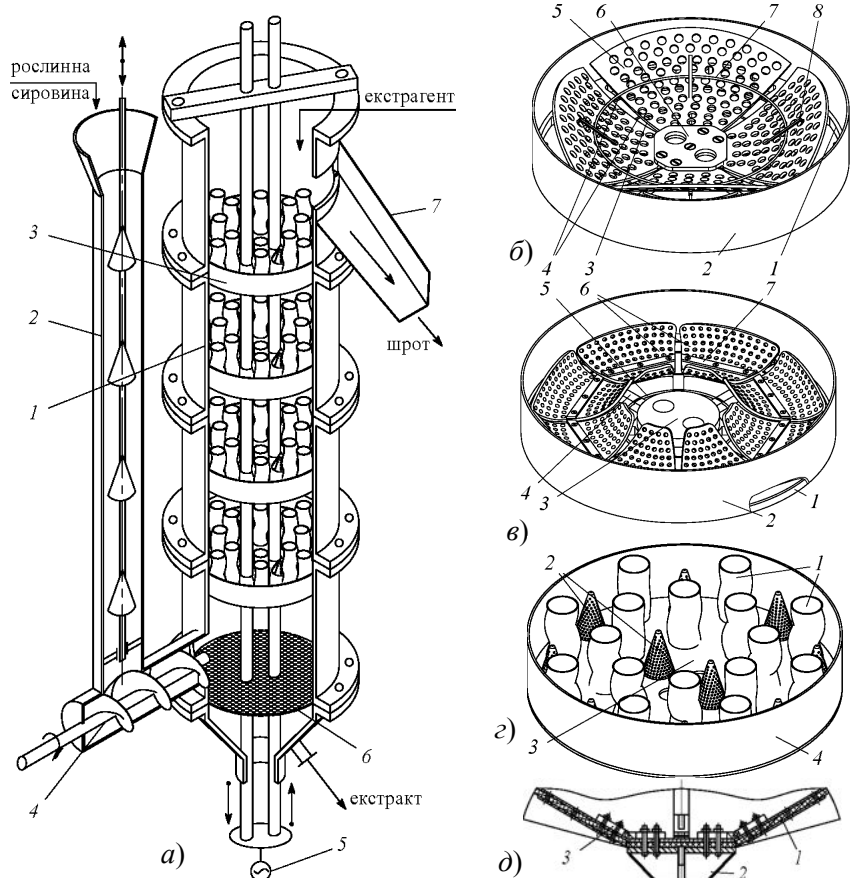


Рис.1. Віброекстрактор безперервної дії:

а) загальний вигляд віброекстрактора: 1 — корпус; 2 — завантажувальний пристрій; 3 — тарілки; 4 — шнек; 5 — вібропривід; 6 — фільтрувальна решітка; 7 — лоток; б) тарілка з гнучкими пластинами — пелюстками: 1 — рамка; 2 — борт; 3 — спиці; 4 — решітка; 5 — пластини—пелюстки; 6 — накладка; 7 — обмежувачі; 8 — направляючі елементи; в) тарілка з гнучкими пластинами — стулками: 1 — рамка; 2 — борт; 3 — спиці; 4 — решітка; 5 — пластини—стулки; 6 — накладка; 7 — накладка; г) тарілка з гнучкими патрубками: 1 — гнучкі патрубки; 2 — фільтрувальні елементи; 3 — днище; 4 — борт; д) тарілка змінної форми: 1 — пластина; 2 — конус опорний; 3 — стопор

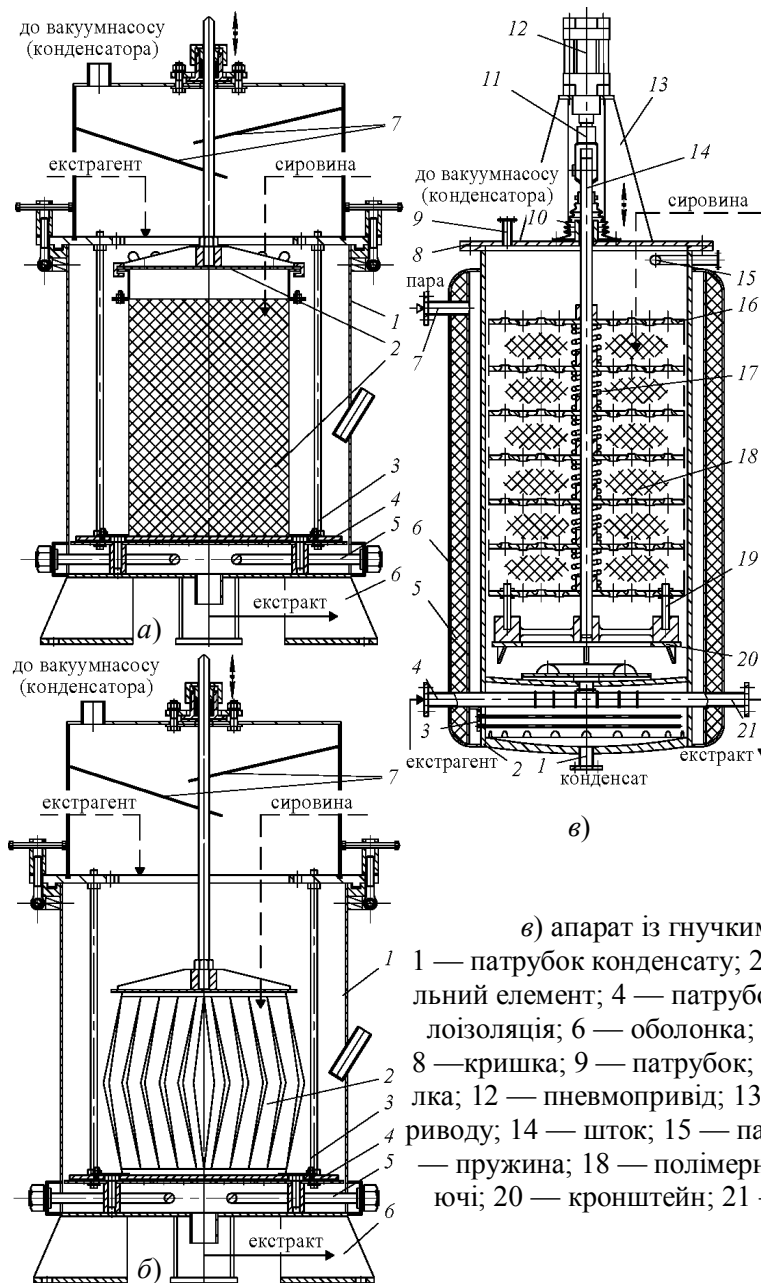


Рис.2. Апарати періодичної дії:

а) апарат із сітчастим контейнером:

1 — корпус; 2 — віброперемішувальний пристрій та сітчастий контейнер; 3 — направляюча штанга; 4 — перфорований диск - основа; 5 — нагрівальний елемент; 6 — опора; 7 — лабіринтний бризкоуловлювач;

б) апарат із гнучким контейнером:

1 — корпус; 2 — віброперемішувальний пристрій; 3 — направляюча штанга; 4 — перфорований диск - основа; 5 — нагрівальний елемент; 6 — опора; 7 — лабіринтний бризкоуловлювач;

в) апарат із гнучкими мембранами:

1 — патрубок конденсату; 2 — корпус; 3 — нагрівальний елемент; 4 — патрубок екстрагенту; 5 — теплоізоляція; 6 — оболонка; 7 — патрубок паровий; 8 — кришка; 9 — патрубок; 10 — сифон; 11 — вилка; 12 — пневмопривід; 13 — кронштейн пневмоприводу; 14 — шток; 15 — патрубок; 16 — тарілка; 17 — пружина; 18 — полімерна сітка; 19 — направляючі; 20 — кронштейн; 21 — патрубок екстракту.

ни (шишкового хмелю, цукрового буряку, байхового чаю, лофанту, гісопу) та їх вплив на процес внутрішнього масоперенесення цільових компонентів на сьогодні вивчені недостатньо. Це створює певні труднощі при встановленні механізму окремих інтенсифікуючих процесів стадій і потребує кількісного визначення дифузійних властивостей сировини, а також впливу різних факторів на ефективність процесу екстрагування. Концентрації водорозчинних речовин в пробах екстрактів визначались рефрактометричним методом. Коефіцієнти дифузії визначались за методикою В. М. Лисянського.

Узагальнення експериментальних даних по дослідженню кінетики процесу віброекстрагування та їх порівняння з іншими способами вилучення цільових компонентів виконувалось з використанням нових уявлень, заснованих на введенні функціональних просторово-часових співвідношень, що надає можливість оцінити результуюче перенесення речовини на мікро- і макрорівнях у вигляді об'ємного коефіцієнта масопередачі, величини, оберненої до часу релаксації процесу. З цією метою будувалась залежність в системі функціонально зв'язаних координат, де за функціональний час приймався проміжок часу, за який рушійна сила процесу екстрагування змінювалась у «e» разів, тобто на порядок натуральних логарифмів.

Зважаючи на те, що пульсуючі турбулентні струмені, що генеруються віброперемішувальними пристроями, визначають їх гідродинаміку в масштабі апарата та умови обтікання поверхні твердого тіла при масообміні, значний інтерес представляли закономірності їх розповсюдження в непроточному робочому середовищі. А відтак, для вимірювання швидкості пульсуючих потоків користувались трубкою Піто-Прандтля з рідинним дифманометром, встановленою вздовж осі транспортувального сопла. Дослідження виконувались на воді з температурою 20 °С без та з твердою фазою (модельна сировина — капронова дрібка білого кольору, кутастої форми із еквівалентним діаметром 3 мм та густиною 1110 кг/м³). Обґрунтовано та описано методику досліджень структури гідродинамічних потоків у віброекстракторі безперервної дії, яка заснована на дифузійній моделі, ускладненої зворотними потоками, методом трасування робочої зони апарата.

Викладено методику вимірювання, розрахунку масообмінних характеристик віброекстрагування, а також узагальнення експериментальних даних.

Вміст сухих водорозчинних речовин в екстрагенті та тканині сировини визначався рефрактометричним методом та за балансовими рівняннями.

Під час опрацювання експериментальних даних розрахунок кінетичних коефіцієнтів виконувався за методикою Г. А. Аксельруда для прямоточного процесу, з виділенням регулярного режиму.

Обґрунтована методика та експериментальна установка досліджень сумісної дії низькочастотних механічних коливань та електроіскрового оброблення рослинної сировини на масоперенесення при віброекстрагуванні. Розкрито фізичний зміст способу інтенсифікації процесу екстрагування за допомогою утворення ударної хвилі в рідині при виникненні в ній спеціально сформованого імпульсного високовольтного електричного розряду.

Напруга розряду встановлювалась регулюванням зазору між торцями торового повітряного розрядника, а також зміненням частоти розрядів.

Наведена також методика досліджень впливу турбулентних пульсуючих струменів на зовнішній масообмін при віброекстрагуванні з використанням модельної речовини із дифузійним типом розчинення (кристалогідрату сірчаноокислого алюмінію $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ з вмістом кристалізаційної води в межах 13,5—14,0 молекул), визначеної циліндричної форми (діаметром 14 мм і висотою 22 мм) із захищеними від розчинення торцями спеціальним покриттям. У такому випадку коефіцієнт масовіддачі практично дорівнюватиме коефіцієнту швидкості розчинення зразка, який розраховували із врахуванням маси зразка до та після розчинення.

Третій розділ присвячено дослідженням гідродинаміки потоку при віброекстрагуванні. Звертаючи увагу на відсутність ґрунтовних теоретичних та експериментальних розробок в галузі гідродинаміки твердофазового віброекстрагування, вивчалися закономірності розповсюдження пульсуючих турбулентних потоків, генерованих транспортувальними елементами віброекстрактора, у непроточному рідкому середовищі та структури робочих потоків. Дослідження гідродинаміки пульсуючих струменів виконували на пілотному віброекстракторі безперервної дії з тарілками (живий переріз $\varepsilon = 5,5 \dots 14,2 \%$), що мають гнучкі транспортувальні елементи (рис.1.а,з), при частотах коливань вібротранспортувальної системи в межах до 10 Гц та амплітуд $(5; 10; 15) \cdot 10^{-3}$ м. За показаннями дифманометра, використовуючи трубку Піто-Прандтля, розраховували середньоінтегральні за період коливань та середні вздовж перерізу пульсуючого струменя швидкості пульсуючих потоків на відстані L від середнього положення тарілки. Результати експериментів узагальнені графіком S -подібної кривої (рис.3) в координатах $\lg(K) — \lg(\text{Re}_n)$, де K — функціональний комплекс, що зв'язує геометричні та режимні параметри роботи вібротранспортувальних пристроїв:

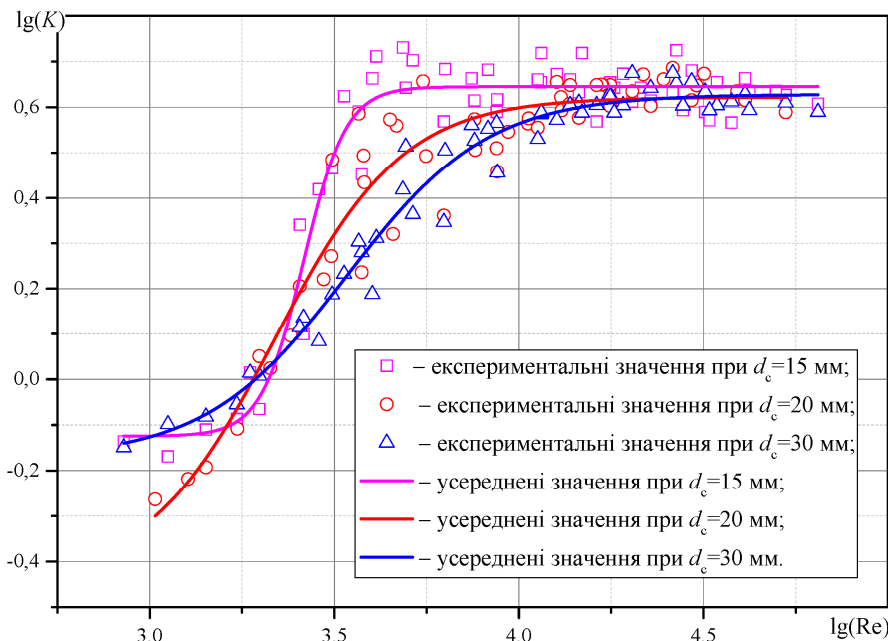


Рис.3. Узагальнення експериментальних даних по встановленню дальності розповсюдження пульсуючих струменів в двофазовому пульсаційному потоці при різних параметрах коливань

$$K = \text{Ho} \left(\frac{D^2}{d_c H} \right) \left(\frac{2Ap}{d_c \varepsilon} \right)^{0,85}, \quad (1)$$

де $\text{Ho} = L_0 \varepsilon / (2Ap)$ — модифікований критерій гомохронності; $\text{Re}_n = 4A^2 f p / (\varepsilon \nu)$ — пульсаційний критерій Рейнольдса; ν — кінематична в'язкість екстрагента; L_0 , d_c , D , H , A , f — відповідно відстань розповсюдження пульсуючого потоку з початковою швидкістю w_0 , діаметр сопла, діаметр та висота гнучкого патрубку, амплітуда та частота коливань віброросистеми; p , ε — відповідно частки неперфорованої частини тарілки та її перфорацій із зазором по периферії

в зоні встановлення в апарат.

Результати експериментальних даних у всьому дослідженому діапазоні гідродинамічних режимів роботи апарата узагальнюються залежністю:

$$\lg(K) = -0,238 + \frac{0,864}{1 + 10^{0,376(3,45 - \lg(\text{Re}_n))}}. \quad (2)$$

За сумісним вирішенням (1) і (2) відносно L_0 , отримуємо:

$$L_0 = 0,642 \cdot 7,311^{(1+19,815 \cdot \text{Re}_n^{-0,376})^{-1}} \cdot \left(\frac{H \cdot d_c^{1,85}}{D^2} \right) \left(\frac{Ap}{\varepsilon} \right)^{0,15}. \quad (3)$$

Таким чином, за величиною L_0 при проектуванні віброекстракторів стає можливим визначати відстань між віброперемішувальними пристроями, габарити апарата, висоту встановлення розвантажувального пристрою для відведення шроту. Величина L_0 також може бути взята як масштабний фактор при моделюванні процесу.

Експериментальні дослідження рівня поздовжнього перемішування здійснювали на основі однопараметричної дифузійної моделі за схемою апарата необмеженої довжини ме-

тодом імпульсного трасування потоку речовини, хімічно індиферентної до середовища (фарбована капронова дрібка, морква, рис.4). Будували експериментальні криві відгуку системи на імпульсне концентраційне збурення (C —криві) в безрозмірних координатах S (концентрації) — θ (час).

Співставлялись експериментальні та розрахункові дані щодо оцінювання рівня поздовжнього перемішування для транспортувальних тарілок з жорсткими та гнучкими патрубками. Доведено переваги конструкції тарілки з гнучкими патрубками, а також встановлено оптимальні геометричні симплексні показники гнучкого патрубка відносно поздовжнього перемішування.

Математичний аналіз структури потоків на основі комбінованої моделі заснований на припущенні, що апарат складається із зон ідеального перемішування у завантажувальній частині апарата та ідеального витіснення в робочій частині, ускладнених елементами зворотного перемішування за схемою рис.5.

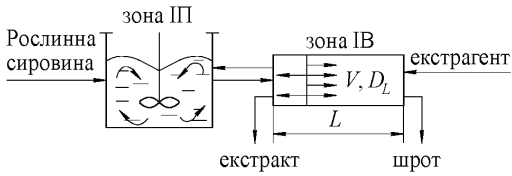


Рис.5. Схема структури потоків у виб-роекстракторі безперервної дії.

Із умов матеріального балансу для кожної із зон:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \frac{v}{V}(S^* - S); \\ \frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (4)$$

де S — поточна концентрація речовини в завантажувальному пристрої; S^* — рівноважна концентрація речовини в завантажувальному пристрої; t — час; x — змінна координата довжини робочої частини апарата; D_L — коефіцієнт поздовжнього перемішування; v , u — відповідно об'ємна та лінійна швидкість двофазового потоку; V — об'єм робочої зони апарата; C — поточна концентрація речовини в апараті (в зоні ІВ), що залежить від її концентрації S в завантажувальній частині (в зоні ІІІ).

Зважаючи на початкові умови та математичний опис кожної із зон: зона ІІІ описується моделлю:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t); \\ S(0) = S_0, \end{cases} \quad (5)$$

де $\beta = v/V$ — величина, еквівалентна оберненому середньому часу перебування трасера в апараті, тобто $\beta \neq \bar{\tau}$; v — об'ємна швидкість потоку; V — об'єм зони ІІІ; S_0 , $S(t)$ — відповідно початкова та поточна концентрація речовини в зоні ІІІ;

зона ІВ, що ускладнена зворотним перемішуванням, описується крайовою задачею:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - u \frac{\partial C(x,t)}{\partial x}, \quad 0 \leq x \leq L \quad (6)$$

з початковою умовою $C(x,0) = 0$; $0 \leq x \leq L$,

$$\text{та крайовими умовами на лівому} \quad -D_L \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = u(S(t) - C(x,t)), \quad \text{при } x = 0, \quad (7)$$

$$\text{та правому кінцях ділянки робочого об'єму апарата} \quad \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = 0, \quad \text{при } x = L. \quad (8)$$

Для розв'язання рівнянь (6) — (8) виконувалась заміна

$$C(x,t) = e^{kt+qx} \cdot w(x,t), \quad (9)$$

$$\text{де } k = -\frac{u^2}{4D_L}; \quad q = \frac{u}{2D_L}.$$

При цьому, неважко перевірити, що функція $w(x,t)$ задовольняє рівнянню

$$\frac{\partial w(x,t)}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}. \quad (10)$$

Використовуючи метод розділення змінних для розв'язання рівняння параболічного типу (10), з урахуванням (9) одержано:

$$C(x,t) = \frac{2V}{L} \int_0^t H(x,t-\tau) S(\tau) d\tau, \quad (11)$$

$$\text{де } H(x,t-\tau) = e^{\frac{\text{Pe} \cdot x}{2L} - \frac{\text{Pe}V}{4L}(t-\tau)} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{A_n} y_n(x) e^{-\frac{V}{L \cdot \text{Pe}} \lambda_n^2 (t-\tau)}. \quad (12)$$

Розв'язком моделі III $\frac{dS(t)}{dt} = \beta(S^* - S)$ є функція виду

$$S(t) = S^* (1 - e^{-\beta t}) \quad (13)$$

Підставляючи (13) у формулу (11), отримано:

$$C(x,t) = \frac{2S^*}{\bar{t}} e^{\frac{\text{Pe}}{2} \left(\frac{x}{L} - \frac{1}{2\bar{t}} \right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{A_n} y_n(x) e^{-\frac{1}{\text{Pe}} \lambda_n^2 \frac{t}{\bar{t}}} \cdot r_n, \quad (14)$$

де $r_n = \int_0^t e^{(\text{Pe}/4 + \lambda_n^2/\text{Pe})\tau/\bar{t}} (1 - e^{-\beta\tau}) d\tau$, Pe — критерій Пекле.

Величина r_n спрощується, використовуючи перетворення:

$$r_n = \frac{e^{\alpha_n t} - 1}{\alpha_n} - \frac{e^{(\alpha_n - \beta)t} - 1}{\alpha_n - \beta}, \quad (15)$$

де $\alpha_n = \frac{\text{Pe}/4 + \lambda_n^2/\text{Pe}}{\bar{t}}$.

Таким чином, розв'язок запропонованих систем в зонах III—IV із врахуванням реальних фізичних координат довжини x і часу t матиме вигляд:

$$C(x,t) = 2S_0 e^{\frac{\text{Pe}}{2} \left(\frac{x}{L} - \frac{1}{2\bar{t}} \right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{A_n} y_n(x) e^{-\frac{1}{\text{Pe}} \lambda_n^2 \frac{t}{\bar{t}}} r_n(t), \quad (16)$$

де $r_n(t) = \frac{e^{(\gamma_n - \beta\bar{t})\frac{t}{\bar{t}}} - 1}{\gamma_n - \beta\bar{t}}$, $\gamma_n = \frac{\text{Pe}}{4} + \frac{\lambda_n^2}{\text{Pe}}$, $y_n(x) = \cos\left(\lambda_n \frac{x}{L}\right) + \frac{\text{Pe}}{2\lambda_n} \sin\left(\lambda_n \frac{x}{L}\right)$, $A_n = 1 + \frac{\text{Pe}}{\lambda_n^2} \left(1 + \frac{\text{Pe}}{4}\right)$ — вла-

сні функції однопараметричної дифузійної моделі; $\lambda_n > 0$ — корені трансцендентного рів-

няння: $\frac{\text{tg}(\lambda_n)}{\lambda_n} = \frac{4\text{Pe}}{4\lambda_n^2 - \text{Pe}^2}$ — величина, еквівалентна оберненому середньому часу перебу-

вання трасера в апараті: $\beta \neq \bar{t}$

Отримані залежності для зручності моделювання структури потоків за прийнятою схемою у безрозмірних координатах, якщо ввести безрозмірні координати довжини, часу і концентрації, відповідно:

$$\eta = \frac{x}{L}; \quad \theta = \frac{t}{\bar{t}}; \quad \sigma = \frac{C(x,t)}{S^*}$$

матимуть наступний безрозмірний розв'язок:

$$\sigma(\eta, \theta) = 2e^{\frac{\text{Pe}}{2} \left(\eta - \frac{\theta}{2} \right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{A_n} y_n(\eta) e^{-\frac{\lambda_n^2 \theta}{\text{Pe}}} r_n(\theta), \quad (17)$$

де $r_n(\theta) = \frac{e^{\gamma_n \theta} - 1}{\gamma_n} - \frac{e^{(\gamma_n - \beta\bar{t})\theta}}{\gamma_n - \beta\bar{t}}$; $y_n(\eta) = \cos(\lambda_n \eta) + \frac{\text{Pe}}{2\lambda_n} \sin(\lambda_n \eta)$.

Таким чином, одержана аналітична залежність (16) та безрозмірнісний її вид (17) можуть бути використані для визначення поточної концентрації речовини в довільний час в

довільній точці робочої зони апарата, а також можуть бути взятими за основу при розв'язанні оптимізаційних задач та задач ідентифікації, планування експерименту тощо. Встановлено, що із зростанням частоти коливань тарілки від 2 до 4 Гц поздовжнє перемішування збільшується приблизно у 7 разів. Ще більший вплив на перемішування фаз вздовж осі потоку суміші в апараті має амплітуда коливань. Зі зміною амплітуди коливань транспортувальної тарілки від $5 \cdot 10^{-3}$ до $15 \cdot 10^{-3}$ м результуючий ефект поздовжнього перемішування збільшується приблизно в 30 разів.

У розділі також наведені результати математичного моделювання структури потоків на основі аналізу і узагальнення комірчастої моделі із зворотними потоками; із врахуванням явища байпасування, наявності застійних зон, зворотних та байпасних потоків. Так, в процесі безперервного віброекстрагування при певних конструктивних і режимних параметрах роботи вібротранспортувальної системи, що забезпечує розділення фаз із заданою продуктивністю, в зоні дії тарілок досягаються режими близькі до ідеального перемішування, в яких тверда фаза знаходиться в умовах псевдозрідження. Разом з тим, гіпотетично в умовних комірках, на які розбивається загальний робочий потік, можуть утворюватися аномальні зони, що порушують загальну впорядковану структуру потоку. Внаслідок цього виникає потреба у визначенні параметрів такої структури та встановленні їх залежності від параметрів процесу.

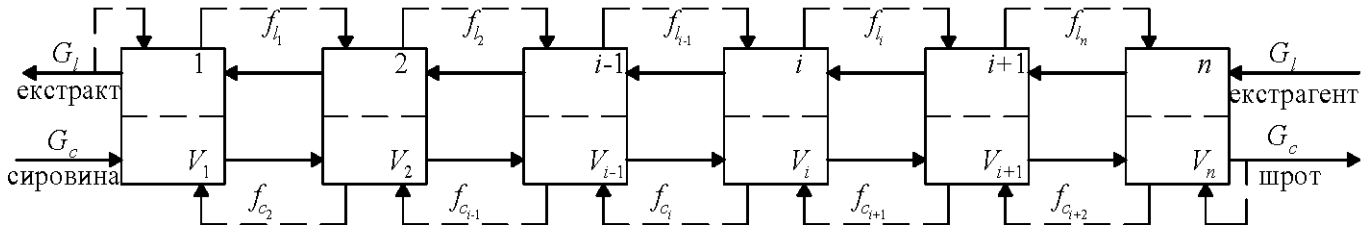


Рис.6. Параметрична схема комірчастої моделі структури гідродинамічних потоків віброекстрактора із зворотними потоками при зустрічному русі фаз: $f_{l,i}$, $f_{c,i}$, G_l , G_c — частки зворотного потоку та об'ємні витрати відповідно екстрагенту та твердої фази в i -тій комірці; x_i , y_i — відповідно концентрація індикатора в екстрагенті та твердій фазі в i -тій комірці; V_i — об'єм в i -тої комірці

Як приклад, математичне моделювання структури потоку на основі аналізу і узагальнення комірчастої моделі із зворотними потоками, що можуть виникати між комірками, представлена так.

Комірчаста модель структури потоку першої комірки (перших та n -х тарілок, на які подаються екстрагент та тверда фаза) матиме вигляд (рис.6):

$$\frac{V_1}{G_l} \frac{dx_1}{dt} = x_0 + f_{l1}x_2 - (1 + f_{l1})x_1; \quad \dots; \quad (18)$$

$$\frac{V_n}{G_l} \frac{dx_n}{dt} = (1 + f_{l,n-1})x_{n-1} - (1 + f_{l,n-1})x_n,$$

$$\frac{V_1}{G_c} \frac{dy_1}{dt} = (1 + f_{c,1})y_2 - (1 + f_{c,1})y_1; \quad \dots; \quad (19)$$

$$\frac{V_n}{G_c} \frac{dy_n}{dt} = (1 + f_{c,n-1})y_{n-1} - (1 + f_{c,n-1})y_n.$$

З урахуванням початкових умов та відповідних перепозначень:

$$M_{i,k}^x = \int_0^{\infty} t^k \cdot x_i(t) dt \approx \sum_j t_j^k \cdot x_i(t_j) \cdot \Delta t_j; \quad M_{i,k}^y = \int_0^{\infty} t^k \cdot y_i(t) dt \approx \sum_j t_j^k \cdot y_i(t_j) \cdot \Delta t_j, \quad (20)$$

$$M_{i,k(r)}^x = \int_0^{\infty} t^k \cdot \frac{d^r x_i(t)}{dt^r} dt; \quad M_{i,k(r)}^y = \int_0^{\infty} t^k \cdot \frac{d^r y_i(t)}{dt^r} dt, \quad (21)$$

та таких припущень: $t \rightarrow 0$, $t^\kappa x(t) \rightarrow 0$, $t^\kappa \frac{d^m x(t)}{dt^m} \rightarrow 0$, $t^\kappa \frac{d^m y(t)}{dt^m} \rightarrow 0$, $t^\kappa y(t) \rightarrow 0$, $\kappa \geq 0$, $r \geq 1$, $m > 0$, $m \in N$ (N — множина натуральних чисел), а також враховуючи, що $M_{i,\kappa,(1)}^x = -\kappa M_{i,\kappa(0)}^x - \kappa M_{i,\kappa}^x$, $M_{i,\kappa,(1)}^y = -\kappa M_{i,\kappa(0)}^y - \kappa M_{i,\kappa}^y$, $M_{i,\kappa,(2)}^x = \kappa(\kappa-1)M_{i,\kappa}^x$, $M_{i,\kappa,(2)}^y = \kappa(\kappa-1)M_{i,\kappa}^y$, матимемо:

- для системи рівнянь, що описують структуру потоку екстрагенту:

$$\begin{aligned} f_{l,1}M_{2,\kappa}^x + (1 + f_{l,\Gamma})M_{1,\kappa}^x - (1-\kappa)\frac{V_1}{G_l}M_{1,\kappa}^x; \\ \dots; \\ (1 + f_{l,n-1})M_{n-2,\kappa}^x - (1 + f_{l,n-1})M_{n-1,\kappa}^x - \kappa\frac{V_n}{G_l}M_{n,\kappa}^x \end{aligned} \quad (22)$$

- для системи рівнянь, що описують структуру потоку сировини:

$$\begin{aligned} (1 + f_{c,1})y_2 - (1 + f_{c,1})y_1 - \kappa\frac{V_1}{G_c}M_{1,\kappa}^y; \\ \dots; \\ f_{c,n-1}y_{n-1} - (1 + f_{c,n-1})y_n - (1-\kappa)\frac{V_n}{G_c}M_{n,\kappa}^y. \end{aligned} \quad (23)$$

Сукупність наведених рівнянь складає систему n лінійних алгебраїчних рівнянь, з яких можуть бути оцінені величини часток зворотних потоків у зонах встановлення віброперемішувальних пристроїв.

За результатами дослідження транспортувальної здатності віброперемішувальних пристроїв вибраних типів (в системі вода — капронова дрібка, бурякомаса, хмельова сировина, виноградні вичавки, дубова дрібка) встановлені оптимальні конструктивні параметри вібротранспортувальних пристроїв та режимні параметри роботи віброекстрактора безпервної дії. Вперше обґрунтовано та описано механізм протитечійного розділення фаз.

Візуальними спостереженнями встановлено, що вихід віброекстрактора на робочий режим при заданій інтенсивності коливань, який забезпечує необхідну продуктивність апарата, супроводжується створенням шару твердої фази у зоні між тарілками, незмінного за встановленою інтенсивністю коливань. Такий шар є штучним секціонуючим елементом, непроникним для пульсуючих турбулентних струменів як транспортувальних відкритих елементів нижньої тарілки, так і фільтрувальних елементів верхньої.

Наведено математичний опис закономірностей розділення неоднорідної системи за умови нестиснення її робочого середовища, нерозривності руху потоку, а також рівності втрат тиску при перетоку середовища у взаємно протилежних напрямках при його загальному русі через транспортувальні та фільтрувальні елементи у вигляді:

$$Q_{\text{тв}} = 4Af \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} (F_\phi - F_{\text{от}}) (K2 - K1) \tau, \quad (24)$$

де $K1 = f_\phi \frac{C1_1 + \sqrt{C1_1(C2_1 f_\phi^2 - C3_1)}}{C1_1 f_\phi^2 - C2_1 f_\phi^2 - C3_1}$ і $K2 = f_\phi \frac{C1_2 + \sqrt{C1_2(C2_2 f_\phi^2 - C3_2)}}{C1_2 f_\phi^2 - C2_2 f_\phi^2 - C3_2}$ — поправочні коефіцієнти для швидкості транспортування твердої фази; F_ϕ , $F_{\text{от}}$ — відповідно площа перерізу фільтрувальних елементів і перфорацій та площа перерізу сопла транспортувального елемента; $C1_1$, $C2_2$, $C3_3$ — гідродинамічні характеристики транспортувального елемента під час руху тарілки вверх і вниз та шару осаду на тарілці; f_ϕ — відносна поверхня фільтрування тарілки.

У четвертому розділі обґрунтовано вплив низькочастотних механічних коливань на інтенсивність процесу вилучення цільових компонентів із рослинної сировини при віброекстрагуванні. Так, наявність інформації про кінетичні коефіцієнти та їх зміну під час про-

У четвертому розділі обґрунтовано вплив низькочастотних механічних коливань на інтенсивність процесу вилучення цільових компонентів із рослинної сировини при віброекстрагуванні. Так, наявність інформації про кінетичні коефіцієнти та їх зміну під час про-

цесу в залежності від гідродинамічних умов та технологічних параметрів надає можливість встановлювати оптимальний час процесу, залишок цільового компонента в шроті, а також ефективність апаратурного оформлення процесу.

З огляду на викладене, вирішено задачу розрахунку коефіцієнтів молекулярної зії для типових досліджуваних видів рослинної сировини (хміль, цукровий буряк, чорний байховий чай), а також проаналізовано та встановлено закономірності їх зміни від режимних параметрів процесу у вигляді графічних залежностей.

Однією з найважливіших характеристик процесу екстрагування є тривалість досягнення рівноважного стану робочої системи. Тому, для узагальнення результатів проведених експериментів запропоновано систему функціонально зв'язаних координат, де як функціональний приймається час, протягом якого концентрація екстрагенту зміниться у «е» (основа натуральних логарифмів) разів, а як просторова одиниця — відстань, на якій функціональний час зміниться в тій же степені, тобто на порядок натуральних логарифмів. У таких координатах стає можливим швидко оцінити рівень масообміну при екстрагуванні.

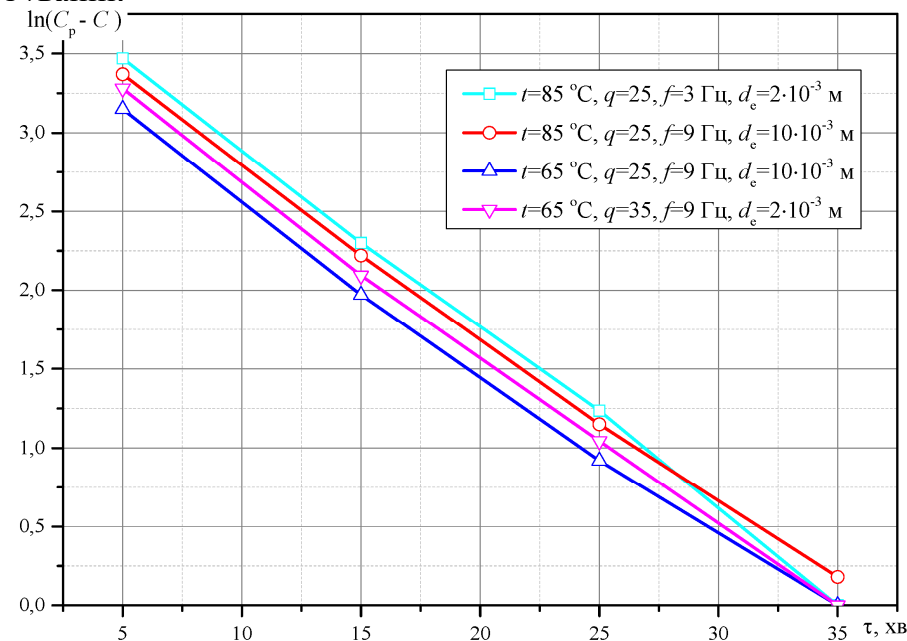


Рис.7. Залежність для визначення часу релаксації при екстрагуванні чайного листа в екстракторі з мембранною системою перемішування

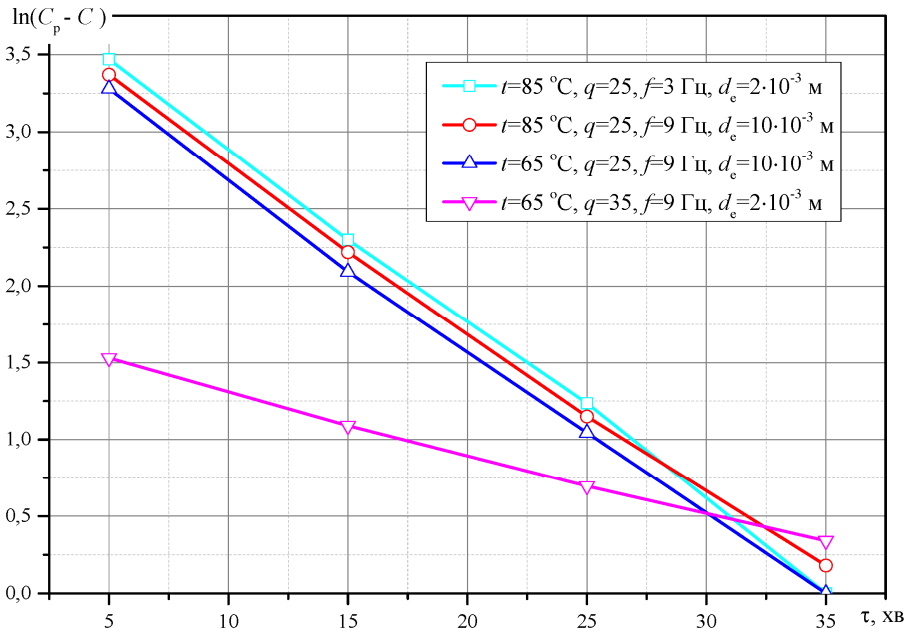


Рис.8. Залежність для визначення часу релаксації при екстрагуванні чайного листа в екстракторі з вібруючим контейнером

З цією метою у напівлогарифмічних координатах встановлювалась зміна в часі відхилення поточної концентрації насичення екстрагенту екстрактивними речовинами C від його рівноважного стану C_p .

Для порівняння впливу вібраційного ефекту при екстрагуванні із листової чайної сировини з іншими способами перемішування розраховувався час релаксації та об'ємний коефіцієнт масопередачі K_v .

Такий підхід до узагальнення результатів є можливим варіантом вирішення проблеми масштабування екстракційної апаратури, з врахуванням того, що величина, яка обернена до часу релаксації може бути прийнята за об'ємний коефіцієнт масопередачі, що враховуватиме цей складний процес на всіх масштабних рівнях.

На рис.9 показані залежності для визначення об'ємного коефіцієнта масопередачі, що отримані за екстракційними кривими для екстракторів різних типів.

Конструювання екстракційної апаратури завжди

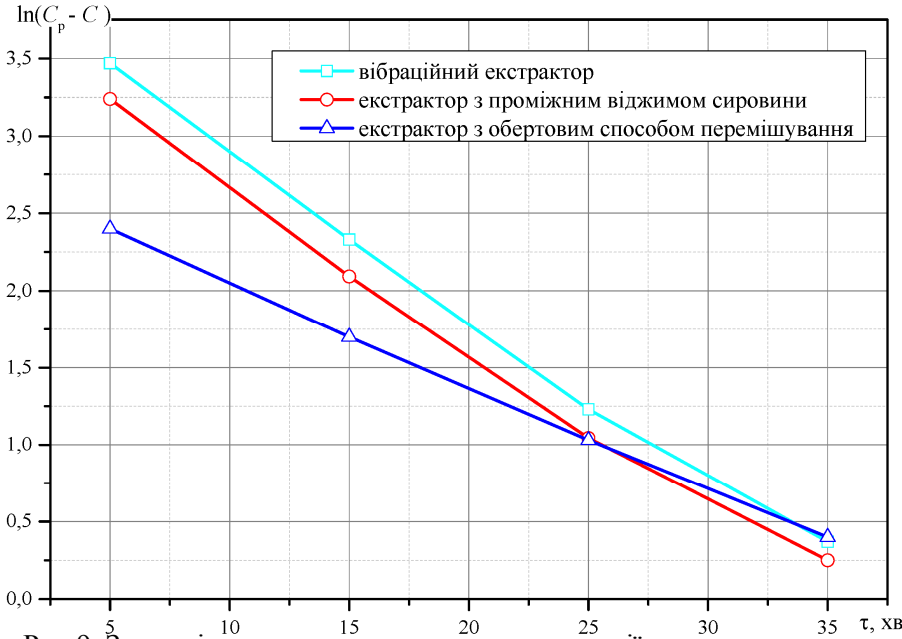


Рис. 9. Залежність для визначення часу релаксації екстрагування для екстракторів з різними системами перемішування робочого об'єму

було пов'язано з пошуком нових способів та форм визначення ефективної взаємодії фаз.

Використання для цих цілей традиційних способів, в основу яких покладено розгляд елементарних процесів для тіл найпростішої геометричної форми в умовах, коли конвекція за межами тіла постійна, надто спрощує установлення тотожності теоретичних та експериментальних даних. З іншого боку, врахування всіх чинників, що впливають на процес, ускладнює шлях ви-

значення найважливіших для екстрагування масообмінних характеристик.

З цією метою, згідно загальним підходам проф. Лободи П. П., для вивчення впливу механічних коливань на швидкість розчинення у воді модельних зразків кристалогідрату $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, розглянуто оцінення зовнішнього масообміну за величиною коефіцієнта розчинення для умов періодичного та безперервного віброекстрагування. Оскільки в даному випадку остання стадія розчинення є лімітуючою, то концентрація речовини на поверхні модельного зразка буде концентрацією насичення, і коефіцієнт масовіддачі практично дорівнюватиме коефіцієнту розчинення зразка K_m , який визначається з основного диференціального рівняння масопередачі:

$$dm = K_m F(t) (C_H - C(t)) dt, \quad (25)$$

де m — маса розчиненої речовини зразка; C_H , $C(t)$ — відповідно концентрація насичення речовини в межовому шарі зразка та поточне значення концентрації речовини в основній масі розчинника; $F(t)$ — поточна поверхня розчинення зразка; t — поточний час розчинення.

Розрахункове рівняння для визначення коефіцієнта масопередачі K_m для трьох підданих аналізу випадків (коли маса зразка: не перевищує концентрацію насичення системи речовиною: $G_0 < C^*V$, однакова: $G_0 = C^*V$, більше: $G_0 > C^*V$ такої в умовах рівноважного стану) співвідношення мас розчинюваної речовини:

$$K_m = \frac{V \sqrt{G_0}}{F(t)(t-t_0-\Delta t)} U(t), \quad (26)$$

$$\text{де } U(t) = \begin{cases} \frac{1}{P_0} \ln \left[\frac{(\sqrt{G_V(t)} + \theta/2 + P_0)(P_1 - P_0)}{(\sqrt{G_V(t)} + \theta/2 - P_0)(P_1 + P_0)} \right]; & (G_0 > C^*V). \\ \frac{2}{P} \left(\arctg \left[\frac{P_1}{P} \right] - \arctg \left[\frac{\sqrt{G_V(t)} + \theta/2}{P} \right] \right); & (G_0 < C^*V). \\ 2 \left(\frac{1}{\sqrt{G_V(t)} + \theta/2} - \frac{1}{P_1} \right); & (G_0 = C^*V). \end{cases} \quad (27)$$

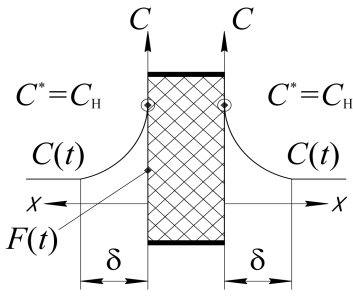


Рис. 10. Схема розподілення концентрації розчинюваної речовини біля поверхні дослідного зразка: $F(t)$ — змінна поверхня розчинення зразка; $C(t)$ — поточна концентрація речовини в основному (робочому) потоці екстрагента; C^* , C_H — відповідно рівноважна та концентрація насичення речовини на поверхні зразка; δ — товщина дифузійного шару.

Рівняння системи (26) містять: G_0 — початкова маса зразка до розчинення; $P_0 = \sqrt{G_0 - C^*V}$, $P_1 = \sqrt{G_0 - \theta/2}$, $F_0 = 2\pi hr(\tau_0)$, $P = \sqrt{C^*V - G_0}$ — перепозначення; $r(\tau_0)$ — радіус зразка до занурення в апарат; $G_V(t)$ — виміряна маса зразка після вилучення його з апарата; $\theta/2$ — сумарна змінна поправка на зміну маси зразка під час введення та виведення з точки вимірювання зони апарата; F_0 , h — відповідно, початкова поверхня зразка та його висота; τ_0 — час відліку вимірювань.

Отримана система рівнянь (26) — (27) може бути використана при фізичному або математичному моделюванні процесу періодичного або безперервного екстрагування для оцінювання зовнішнього масообміну у двофазовій системі тверде тіло — рідина за різних умов насичення дослідною речовиною робочого об'єму апарата.

В умовах періодичного і безперервного віброекстрагування коефіцієнти масопередачі K_m визначались за рівнянням отриманої математичної моделі (26), тобто для умов розчинення, коли маса зразка не перевищує його рівноважного значення ($G_0 < n^*$).

За отриманими дослідними даними встановлювалась залежність коефіцієнта масопередачі K_m від ефективного критерія Рейнольдса, що враховує гідродинамічний режим обтікання досліджуемого зразка розчинної речовини потоком екстрагента в об'ємі апарата: $K_m = f(\text{Re}_e)$.

Ефективний критерій Рейнольдса визначався за рівнянням:

$$\text{Re}_e = w_l d_e / \nu_n, \quad (28)$$

де $w_l = w_0 \bar{\eta}$ — середньоінтегральна по робочому об'ємі апарата швидкість пульсуючих потоків, що генеруються віброперемішувальним пристроєм; d_e — еквівалентний діаметр зразка розчинної речовини; ν_n — коефіцієнт кінематичної в'язкості розчинника біля поверхні розчинення; $w_0 = 2Af p/\varepsilon$ — початкова за період коливань швидкість пульсуючих потоків робочого середовища; ε — частка живого перерізу; $\bar{\eta} = 1/(\frac{1}{4} + L/D)^m$ — коефіцієнт затухання коливань пульсуючих потоків робочого середовища (розчинника) на відстані L від їх джерела для безперервнодіючого віброекстрактора; $\eta = 1/(\frac{1}{4} + R/D)^m$ — коефіцієнт затухання коливань пульсуючих потоків робочого середовища на відстані R від осі симетрії віброуючого пристрою (для періодичного процесу); D — діаметр апарата; $m = 2 + 0,5 \cdot 10^6 \mu^2 + gB$ — показник степеня, що враховує характер розповсюдження коливань в системі тверде тіло — рідина, де μ — коефіцієнт динамічної в'язкості екстрагента, B — питоме навантаження апарата по твердій фазі, $g=0,006$ — постійний множник.

Окремі результати виконаних нами дослідів у функціональних координатах $\text{Sh}/\text{Sc}^{0.5} = f(\text{Re}_e)$ узагальнені лінійними залежностями із змінним кутом нахилу наведено, як приклад, на рис. 11. В наведеній функції: $\text{Sh} = K_m d_e / D_d$ — критерій Шервуда, що характеризує співвідношення між інтенсивністю процесу екстрагування за рахунок конвекції та інтенсивністю екстрагування за рахунок дифузії (в умовах нерухомого середовища), тобто — вплив коливань на швидкість масовіддачі; $\text{Sc} = \nu_n / D_d$ — критерій Шмідта характеризує співвідношення інтенсивностей дифузії імпульсу (в'язкості) і дифузії речовини, тобто в даному випадку — відносну роль молекулярних процесів перенесення кількості руху і перенесення маси речовини дифузиею; ν_n — коефіцієнт кінематичної в'язкості розчину; D_d —

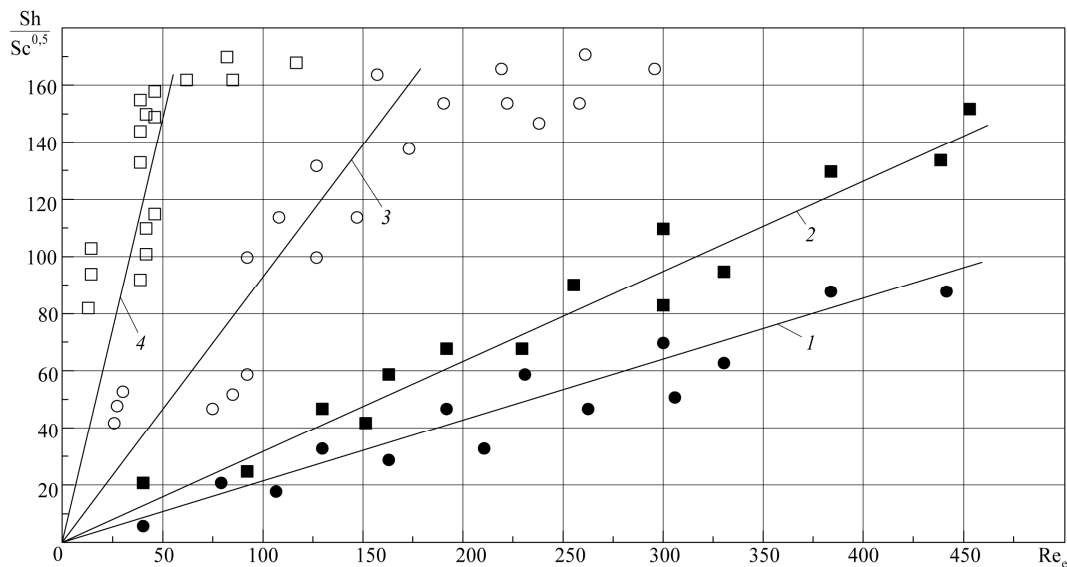


Рис. 11. Залежності для узагальнення результатів досліджень зовнішнього масообміну в умовах періодичного та безперервного віброекстрагування з використанням модельних зразків: 1 — ● — безперервне віброекстрагування з твердою фазою; 2 — ■ — безперервне віброекстрагування без твердої фази; 3 — ○ — періодичне віброекстрагування з твердою фазою; 4 — □ — періодичне віброекстрагування без твердої фази.

робочому об'ємі. Разом з тим, подальша інтенсифікація (зростання Re_e) не призводить до зростання зовнішнього масообміну: тут експериментальні точки починають стабільно розташовуватись горизонтально, тобто структура потоку наближається до структури ідеального перемішування.

Для безперервного процесу картина дещо інакша. Графіки (прямі 1, 2) змінюють кут нахилу не тільки залежно від інтенсивності коливань, або від віддалення дослідного зразка, але й від глибини взаємодії пульсуючих потоків, що генеруються одночасно транспортувальними та фільтрувальними елементами верхньої та нижньої вібрувальних тарілок.

В цій ситуації пульсуючий турбулентний струмінь, створений соплом вібруючої перегородки (тарілки), складається з наступних один за одним у просторі й у часі поодиноких нестационарних струменів у вигляді вихрових кілець, що генеруються протягом півперіоду коливань тарілки. Інтервали часу між послідовними поодинокими струменями, що рухаються в одному напрямку, становлять також половину періоду коливань, оскільки протягом цих інтервалів генеруються аналогічні струмені протилежного напрямку. Ці зустрічні потоки формують більш потужні, але меншого масштабу, турбулентні вихори, які сприяють оновленню поверхні контакту фаз з більшою швидкістю (пряма 2, рис.10). З іншого боку, такий режим роботи створює умови для виникнення поздовжнього перемішування, що впливатиме на порушення безперервності процесу, тому бажаним є режим, який не викликає порушення утвореного між тарілками шару твердої фази — засобу секціонування робочого об'єму апарата. Тобто доцільним і більш продуктивним для безперервного процесу буде режим, що апроксимований прямою 1.

Отримані результати та запропонована методика визначення рівня зовнішнього масообміну можуть бути використані для встановлення та обґрунтування режимів, за якими слід вести процес безперервного або періодичного віброекстрагування в промислових умовах, та для оцінювання досконалості конструкції екстрактора при оптимізації його роботи.

Враховуючи реалії процесу, в розділі також наведено аналітичне дослідження масоперенесення при безперервному віброекстрагуванні.

У цьому контексті нами запропоновано для опису його кінетики наступне рівняння конвективної дифузії, що враховує особливості масоперенесення речовини на всіх його

коефіцієнт дифузії зразка.

Як видно з рисунка, пульсуючі потоки (пряма 3) для періодичного процесу при незначних числах Re_e (до 80) мають дещо більшу ефективність дії ніж для безперервного, навіть без наявності твердої фази. На це, очевидно, впливає конструкція апарата, а також те, що турбулізація здійснюється у меншому

масштабних рівнях:

$$\frac{\partial m_1(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 m_1(x,t)}{\partial x^2} - v \frac{\partial m_1(x,t)}{\partial x} + F(x,t), \quad (29)$$

де $F(x,t)=k(m^*(x) - m^*(x,t))$, $m_1(x,t)$ — маса цільового компонента в екстрагенті, що змінюється в часі та по довжині апарата; t — поточний час процесу; x — поточна координата довжини L робочої частини апарата; v — швидкість потоку екстрагента в робочій зоні апарата; $m^*(x)$ — змінна рівноважна концентрація речовини в кожній комірці апарата; k — коефіцієнт масовіддачі; D — узагальнений коефіцієнт дифузії речовини.

З урахуванням крайових умов:

– для потоку речовини на вході в апарат (точка подачі екстрагента):

$$D \frac{\partial m_1(x,t)}{\partial x} = v(m_1(x,t) - \bar{m}_1(t)) \text{ при } x = 0, \quad (30)$$

де $m_1(x,t) - \bar{m}_1(t)$ — різниця відповідних концентрацій, що визначає потік речовини на вході в апарат; де $\bar{m}_1(t)$ — концентрація речовини, що надходить в апарат з вхідним потоком рідини (з екстрагентом);

– для потоку речовини на виході з апарата:

$$\frac{\partial m_1(x,t)}{\partial x} = 0 \text{ при } x = L, \quad (31)$$

оскільки на виході з апарата притік речовини в екстрагент відсутній (різниця концентрацій поточної та рівноважної стабілізується), тобто градієнт концентрації відсутній.

Початковий розподіл концентрації цільового компонента (початкова умова для крайової задачі (30) — (31) матиме вигляд:

$$m_1(x, t_0) = m_1^0(x), \quad 0 < x < L. \quad (32)$$

де $m_1^0(x)$ — початковий розподіл концентрації речовини в апараті.

Якщо на вхід апарату подається чистий екстрагент, то $\bar{m}_1(t) = 0$; якщо ж у початковий момент часу речовина в апараті відсутня, то $m_1^0(x) = 0$.

Густина розподілення концентрації речовини в екстракті в кожній комірці (в зоні перемішування апарата) можна вважати усталеною за певного встановленого режиму роботи апарата (рис.12). Щільність джерела речовини, що характеризує зміну концентрації цільового компонента або накопичення в екстрагенті екстрактивної речовини, може приймати різні значення в залежності від умов процесу і, в першу чергу, зміни параметрів коливальних вібротранспортувальної системи — амплітуди A та частоти f коливальних.

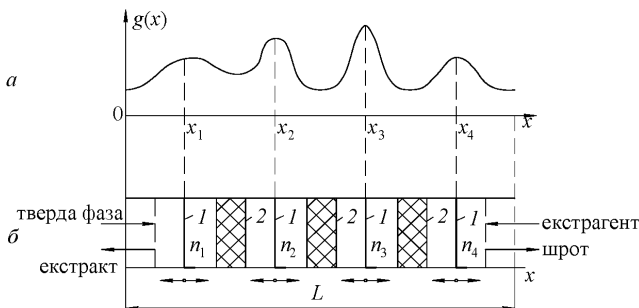


Рис.12. Ілюстрація щільності розподілення речовини по довжині апарата: 1 — транспортувальний пристрій (тарілка); 2 — шар сировини в міжтарілчастому просторі.

Враховуючи вплив на процес великої кількості інших технологічних факторів (гідромодуль, температура, властивості сировини, екстрагента, конструктивні параметри та ін.), в загальному випадку щільність зовнішніх джерел (накопичувальна складова) $F(x,t)$ може бути уточнена функцією, яка узагальнює вираз (29):

$$F(x,t) = \sum_{i=1}^n K_i e^{-\bar{\alpha}(x-x_i)^2} (m_i^*(x) - m_1(x,t)), \quad (33)$$

де n — кількість комірок; i — номер комірки.

Крім того, $m_1(x,t)$ можна умовно вважати випадковою величиною, яка згідно теорії статистичного аналізу підпорядковується певним законам розподілення, наприклад, нормальному (гаусовському).

Якщо в кожній i -комірці апарата рівноважна маса речовини $m^*(x)$ однакова, то функція (33) приймає вигляд:

$$F(x, t) = (m^*(x) - m_1(x, t)) \sum_{i=1}^n K_i e^{-\bar{\alpha}(x-x_i)^2}. \quad (34)$$

Якщо ввести в розгляд функцію $g(x) = \sum_{i=1}^n K_i e^{-\bar{\alpha}(x-x_i)^2}$, що пропорційна масоперенесенню речовини з твердої фази в рідку вздовж апарату, де $\alpha = \alpha(f, A)$ — параметр, що відповідає за ступінь масоперенесення в i -й зоні (комірці); f, A — відповідно частота та амплітуда коливань вібротранспортувальної системи; n — кількість комірок; K_i — коефіцієнт масоперенесення для i -ї комірки; x_i — місце знаходження i -ї комірки, то функція (34) матиме вигляд:

$$F(x, t) = (m^*(x) - m_1(x, t)) g(x). \quad (35)$$

Враховуючи, що графік функції $g(x)$ має вигляд, зображений на рис.12а, дану функцію можна використати для опису інтенсивності масоперенесення в різних комірках апарата (рис.12б).

Якщо коефіцієнт масовіддачі K_i незмінний для кожної комірки і дорівнює K , то

$$g(x) = \sum_{i=1}^n K_i e^{-\bar{\alpha}(x-x_i)^2} = K \varphi(x), \quad (36)$$

$$\text{де } \varphi(x) = \sum_{i=1}^n e^{-\bar{\alpha}(x-x_i)^2}. \quad (37)$$

Функція $\varphi(x)$ може бути використана для ілюстрації накопичувальної складової моделі (29). У формулі (33) коефіцієнт $\bar{\alpha}$ залежить від частоти f та амплітуди A коливань вібротранспортувальної системи, тобто

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}(f, A). \quad (38)$$

В найпростішому випадку можливо запропонувати наступний вираз для коефіцієнта:

$$\bar{\alpha} = M A l f^m, \quad (39)$$

де M — коефіцієнт пропорційності; l, m — деякі дійсні числові показники даної степеневій залежності.

Зокрема, при $l = 1, m = 1$, маємо $\bar{\alpha} = M A f$.

Якщо ввести позначення $J = A f$ — інтенсивність коливань, то останню формулу можна подати у вигляді:

$$\bar{\alpha} = M J. \quad (40)$$

Отримані результати експериментальних та аналітичних досліджень конвективного масоперенесення в умовах твердофазового безперервного віброекстрагування на всіх його масштабних рівнях з урахуванням щільності зовнішніх джерел накопичення цільового компонента в екстрагенті в зоні віброперемішування можуть бути використані на стадії проектування віброекстракційної апаратури та при розв'язанні оптимізаційних задач.

Розділ також має результати математичного моделювання зовнішнього масообміну із рослинної сировини в умовах нестационарного масоперенесення.

Враховуючи реалії зовнішнього масообміну, в рівняння конвективної дифузії введено доданок, що враховує квадратичний ефект нерівномірності перенесення цільового компонента в екстрагент за аналогією з рівнянням регресії:

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = \beta(C^* - C) + \gamma(C^* - C)^2 \\ C(t_0) = C_0, \end{cases} \quad (41)$$

де γ — емпіричний коефіцієнт (коефіцієнт уточнення), що залежить від зовнішньої дифу-

зійної нерівномірності перенесення речовини.

Цей коефіцієнт має аналогічний зміст з коефіцієнта активності поверхні f_n для умов ідеального перемішування.

Для початку процесу масовіддачі, коли початковий час $t_0=0$ і концентрація речовини в екстрагенті $C_0=0$, отримано:

$$C(t) = C^* \left(1 - \frac{\beta}{e^{\beta t} (\beta + \gamma C^*) - \gamma C^*} \right) \quad (42)$$

Мінімальний час екстрагування буде визначено за умови

$$C^* - C(t) = E, \quad (43)$$

де $E > 0$ — відхилення поточної концентрації від рівноважної (задане мале число).

Тоді мінімальний час процесу для досягнення рівноважного стану системи:

$$t_{\min} = \frac{1}{\beta} \ln \frac{C^* (\beta + \gamma E)}{E (\beta + \gamma C^*)} \quad (44)$$

або

$$t_{\min} = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\gamma + \beta/E}{\gamma + \beta/C^*} \quad (45)$$

Мінімальний час — це момент часу, в який вперше відхилення від рівноважного стану буде дорівнювати E , а функція $C(E)$ монотонно зростає. Отже, при $t > t_{\max}$, рушійна сила процесу досягне заданого малого значення E , або, інакше, $C^* - C(t) < E$.

Цей момент часу дорівнюватиме мінімальному значенню t_{\min} і відповідає уявленням про час релаксації процесу t_p , тобто час, за який рушійна сила процесу зміниться у «е» разів («е» — основа натуральних логарифмів).

При використанні рівняння (42) для визначення поточного значення концентрації або побудови екстракційних кривих за заданих умов процесу важливо знайти коефіцієнт γ , що враховує дифузійну нерівномірність при вилученні цільових компонентів. Коефіцієнт активності поверхні може бути також інтерпретований як відношення активної її складової

$F_{\text{акт}}$ до повної геометричної поверхні частинки $F_{\text{геом}}$:
 $\gamma = F_{\text{акт}} / F_{\text{геом}}$.

На рис.13 показана екстракційна крива, що побудована за рівнянням (42) для умов вилучення сухих речовин із тканини цукрового буряка та нанесені експериментальні дані, що отримані при періодичному віброекстрагуванні.

При цьому, розрахований мінімальний час екстрагування, за заданими відхиленнями від рівноважного стану $E=1\%$, об'ємному коефіцієнті масовіддачі, рівноважній концентрації 6 %, складає 15 хв, що узгоджується з результатами експериментальних даних висвіт-

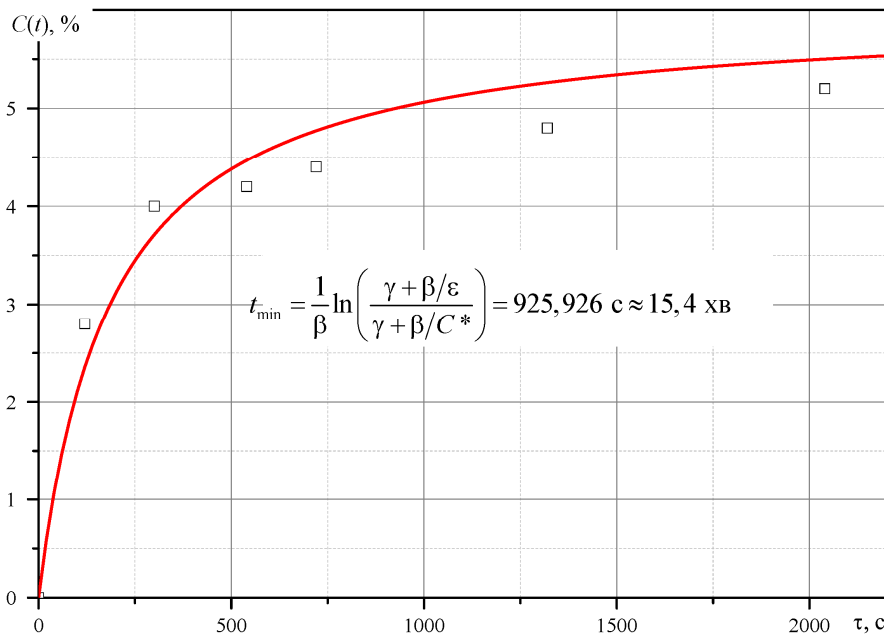


Рис.13. Графік зміни поточної концентрації насичення екстрагента в часі за рівнянням (42) та експериментальна інтерпретація мінімального часу досягнення рівноважного стану при твердофазовому екстрагуванні та розрахованого за рівнянням (45): 1 — крива за рівнянням (42); \square — експериментальні дані при вилученні водорозчинних речовин з цукрового буряка.

лених у підрозділі 4.3.

Таким чином, наведені результати математичного моделювання зовнішнього масообміну при екстрагуванні із рослинної сировини в умовах нестационарного перенесення речовини з урахуванням зовнішньої дифузійної нерівномірності можливо використовувати при конструюванні та оптимізації іншої екстракційної апаратури.

Результати перевірки на адекватність розроблених математичних моделей, наведених у третьому та четвертому розділах наведені у кінці відповідних підрозділів. Розв'язання математичних моделей, знаходження параметрів та статистичних характеристик здійснювалось за розробленим алгоритмом та програмою, реалізованою в системі MatLAB2011.

У п'ятому розділі представлені результати досліджень впливу електроіскрового оброблення рослинної сировини на процес віброекстрагування.

Ефективність використання віброекстракційної апаратури обумовлена створенням інтенсивних гідродинамічних режимів турбулентними пульсуючими струменями, генерованими вібрувальними елементами. Таким чином виникають сприятливі умови для зовнішнього масообміну. Але поряд з цим для рослинної сировини з низькою екстрактивною властивістю можуть існувати і лімітуючі обставини, пов'язані із зменшенням різниці концентрацій на поверхні частинки сировини і в її середині — настає гальмівна стадія внутрішньої дифузії. Отже, виникає необхідність підсилення виходу цільових компонентів із речовини до її поверхні.

Зміна структури хмельової сировини під час дії на неї низькочастотних механічних коливань та електроіскрових імпульсних розрядів протягом 60 хвилин здійснювалась за допомогою мікроскопа МБИ—15. Отримані знімки свідчать про повну руйнацію найбільш міцної морфологічної складової — зерен лупуліну. При цьому відбувся перехід у рідину та перетворення альфа-кислот у ізо-альфа-кислоти шляхом ізомеризації. Як результат, за рахунок руйнації клітини стає можливим скоротити час процесу майже втричі у порівнянні з настоюванням, крім того водноізомеризований екстракт може бути отриманий із високим виходом цілої гами цільових компонентів.

Такий результат досягається механічною дією на сировинну вібротранспортувальних пристроїв, турбулентних пульсуючих струменів, а також дією ударної хвилі, сформованої імпульсним високовольтним електричним розрядом, згенерованим у електророзрядній камері спеціального пристрою. При цьому відбувається перетворення енергії розряду в

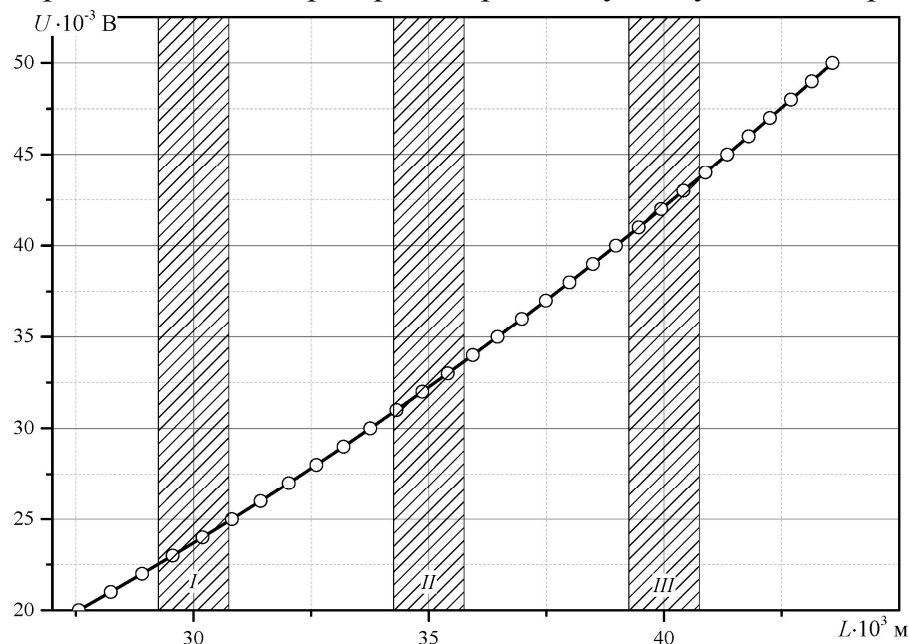


Рис. 14. Функціональна залежність напруги розрядного імпульсу від величини міжелектродного зазору в розрядній камері.

механічну роботу руху середовища. Таке високоенергійне електричне імпульсне явище призводить спочатку до утворення, розширення кавітаційної порожнини, її схлопування та пульсації парогазового пухирця. При чому тиск ударної хвилі, в районі вибуху, як відомо, досягає декількох тисяч атмосфер. Важливо зазначити, що такі електрогідродинамічні ефекти одночасно створюють і асептичні умови одержання екстрактів, що є надзвичайно важливим ефектом для подальшого

зберігання продукту.

Раціональні енергетичні витрати та необхідні технологічні показники обґрунтовуються вибором оптимальної відстані між електродами.

Графік рис.14 демонструє, що виникнення та утримання електричної дуги (сталій міжелектродний пробій) у всьому дослідному діапазоні настає при міжелектродній відстані (± 5 мм) на трьох ділянках: перша — 30 мм (початок, або найменша відстань) при напрузі 25—30 кВ; друга — 35 мм при напрузі 27—33 кВ; третя — 40 мм при напрузі 37 — 43 кВ. Більша відстань — енерговитратна.

Результати експериментів встановлення впливу параметрів електроіскрових розрядів

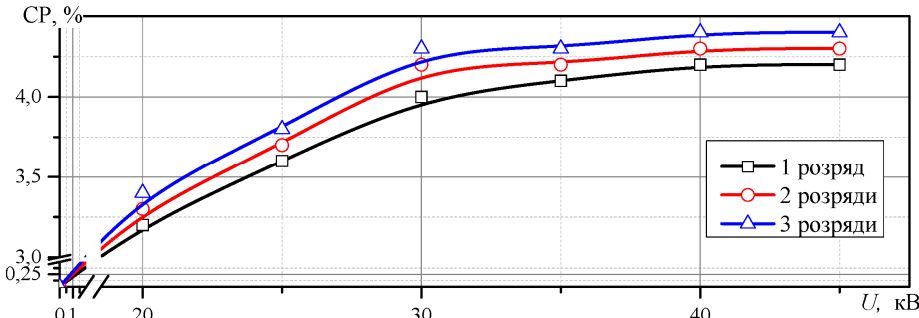


Рис.15. Залежність концентрації вилучених загальних сухих речовин з хмелевої сировини в екстрагенті від напруги електроіскрового розряду.

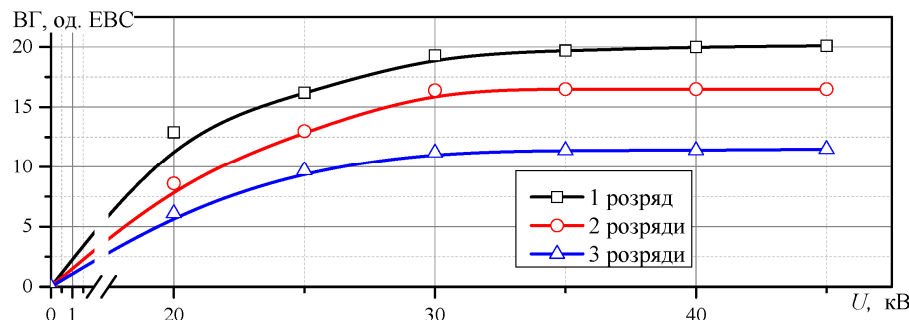


Рис.16. Залежність вмісту гірких речовин в хмелевому екстракті від напруги електроіскрового розряду.

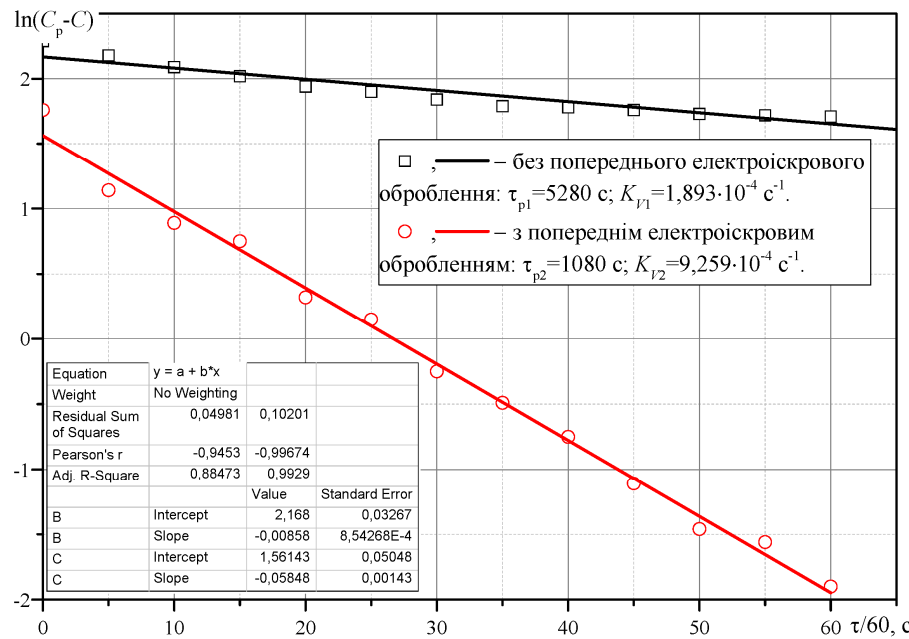


Рис.17. Залежність для визначення часу релаксації накопичення загальних сухих речовин в екстракті під час інтенсифікації процесу низькочастотними механічними коливаннями без та з попереднім електроіскровим обробленням хмелевої сировини ($q=20, f=3$ Гц, $C_p=9,86$ %)

на ступінь вилучення сухих речовин із хмелевої сировини та якість отриманого екстракту за величиною накопичення у ньому гірких речовин узагальнено на графіках рис.15 і рис.16.

За отриманими екстракційними кривими віброекстрагування з попередньою електроімпульсною обробкою сировини узагальнення результатів показано на графіку рис.17, за яким визначено час релаксації процесу τ_p та об'ємний коефіцієнт масопередачі K_V ($\tau_{p1} = 5280$ с, $K_{V1} = 1,893 \cdot 10^{-4}$ с $^{-1}$ та $\tau_{p2} = 1080$ с, $K_{V2} = 9,259 \cdot 10^{-4}$ с $^{-1}$), що підтверджує ефективність використання попереднього електроіскрового оброблення рослинної сировини при її віброекстрагуванні.

Шостий розділ присвячено дослідженню універсальних просторово-часових гідродинамічних характеристик пульсуючих потоків з метою інтенсифікації та масштабування віброекстракційної апаратури.

Багатоцільове застосування низькочастотних механічних коливань можливе лише при глибинному вивченні фізичної природи дії коливань на стадії їх генерації і розповсюдження в

робочому об'ємі апарата. Так, закономірності розповсюдження пульсуючих струменів у поздовжньому (транспортуючому) і поперечному (мікроперемішуючому) напрямку можуть бути визначені фундаментальними просторово-часовими залежностями, що дозволяють розрахувати інтенсивність дії коливань на різних відстанях від їх джерела.

Оперуючи конструкцією віброгенеруючих органів екстрактора, частотою і амплітудою їх коливань при відомих закономірностях розповсюдження створених ними пульсуючих потоків, віброекстрактори можуть бути налаштовані на різноманітні твердофазні системи з врахуванням складної специфіки впливу твердої фази при різних навантаженнях і режимах екстрагування. При цьому специфічність умов масштабного перенесення вимагає використання системного підходу та виявлення закономірностей зміни просторово-часових співвідношень у безрозмірних координатах, що надало б можливість розраховувати результуюче перенесення в єдиній системі функціонально зв'язаних координат.

У таких координатах функціональний час представлятиме собою проміжок часу на протязі якого властивість робочої системи (визначальний геометричний параметр, рН, концентрація тощо) зміниться в розмірі основи натуральних логарифмів, а просторова складова — відстань, на якій функціональний час буде змінений у тому ж ступені.

Сутність же загального системного підходу полягає в тому, що вся інформація, що отримана в лабораторних та виробничих умовах, узагальнюватиметься у вигляді окремих математичних моделей, кожна з яких буде описувати певне конкретне явище процесу — гідродинаміку, масоперенесення (внутрішнє та зовнішнє), або повної математичної моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь. При цьому безпосереднє перенесення результатів аналізу дослідних даних, отриманих для даної системи екстракційного процесу, з од-

ного апарата на інший може бути здійсненим у спосіб, алгоритм якого показано на рис.18.

Найбільш простим і вивченим випадком струминного руху є витікання рідини з рівномірним початковим полем швидкості ($w_0 = \text{const}$) у середовище, що рухається з постійною швидкістю ($w_L = \text{const}$), або затопленого у нерухомому середовищі. Розвиток струменя супроводжується захопленням оточуючих струмін часток рідини, поступовим гальмуванням струменя та збільшенням його поперечного перерізу. При рівномірному полі швидкостей у початковому перерізі, границі пограничного шару мають конічні поверхні, що перетинаються у кромки сопла. Зовнішня сторона цієї кромки дотикається до оточуючої рідини. Використовуючи спрощену схему затопленого струменя (рис.19), за Г. Шліхтінгом приймають довжину перехідної ділянки та швидкість



Рис.18. Схема алгоритму масштабного переходу при віброекстрагуванні турбулентних пульсуючих струменів, що створюються секціонуючими апарат поперечними віброуючими перегородками, або іншими пристроями спеціальної конструкції.

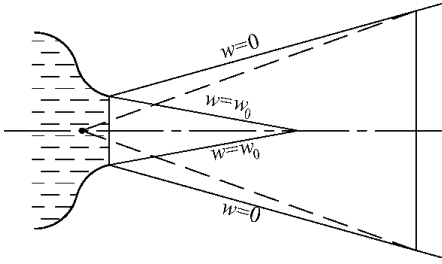


Рис.19. Схема затопленого осесиметричного плоского струменя

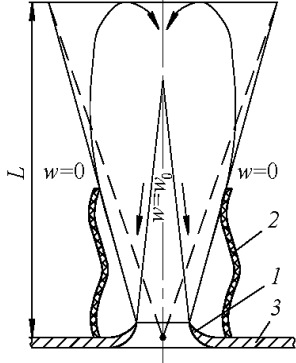


Рис.20. Схема затопленого пульсуючого струменя напівперіоду коливань при віброекстрагуванні: 1 — сопло; 2 — патрубок; 3 — вібрвальна тарілка.

на границі пограничного шару рівними нулю.

Причому, поперечна складова швидкості має незначні зміни, а сам швидкісний профіль струменя має неперервні деформації. Чим на більшій відстані від крайки (устя) сопла вибрано перетин, тим «нижче» та «ширше» профіль струменя. Грунтуючись на візуальних спостереженнях за пульсуючим поодиноким струменем (трасованим бульбашками повітря), генерованим вібротранспортувальним пристроєм із відкритого сопла, або обмеженого перепонуою

(наприклад, гнучким патрубком) з боку його більшого гідравлічного опору (рис.20) можна припустити, що рух такого струменя також відповідатиме, в певних межах, його розвитку згідно з масштабом турбулентності, закону руху затопленого асиметричного струменя. Ці обставини уточнені за експериментальними даними співставленням полів поздовжніх складових відносних швидкостей в основній ділянці затопленого та пульсуючого струменя — побудовою універсального гідродинамічного профілю.

Отже, сучасні теорії турбулентних струменів розглядають лише стаціонарну задачу. Особливістю турбулентних пульсуючих струменів є їхній нестаціонарний характер. Поодинокий нестаціонарний струмінь являє собою деякий об'єм середовища, викинутий через сопло протягом напівперіоду коливань зі змінною швидкістю

$$w_0 = 2Af(1-\varepsilon)/\varepsilon, \quad (46)$$

де A і f — відповідно амплітуда та частота коливань віброуючої перегородки, а ε — її загальний живий переріз, що дорівнює відношенню площі отворів і зазору до площі поперечного перерізу апарата.

Такий самий об'єм повинен протягом наступного напівперіоду коливань повернутися через отвори віброуючої перегородки в складі нестаціонарних струменів протилежного напрямку. При віддаленні від перегородки швидкість струменя зменшується. На заданій відстані L від полюса середня інтегральна за період коливання й середня вздовж перерізу швидкість пульсуючого струменя w_L визначалась за допомогою трубки Піто-Прандтля за прийнятою методикою.

Досліджувались конструкції віброуючих перегородок з переточними елементами у вигляді сопел з діаметром $d_c=0,015$ м, що входять у закріплені на перегородці гнучкі патрубки діаметром 0,040 м і висотою 0,045 м. Порівняльні дослідження проведені при переточних пристроях у вигляді сопел діаметром $d_c=0,020$ м без патрубків.

Конструктивні та режимні параметри змінювали в наступних межах: $\varepsilon = 0,055—0,142$; $A = 0,01—0,015$ м; $f = 1—5$ Гц; діаметр апарата 0,3 м. Дослідження проводили у воді при температурі 20 °С.

Припускаючи афінність закономірностей розповсюдження стаціонарного затопленого та пульсуючого струменів, фізично обґрунтованим підтвердженням цього буде встановлення співвідношень визначальних просторово-часових характеристик у відносних величинах у вигляді профілю швидкостей в перетині плоского турбулентного сліду за теорією Прандтля-Шліхтінга. Тобто, якщо розподілення відносної швидкості у перерізі стаціонарного струменя на відносних відстанях від джерела має універсальний характер, тоді стає можливим сподіватися про відповідне співпадіння аналогічних характеристик для пульсуючого струменя, хоча б на деякій ділянці такої характеристики. Для перевірки цієї гіпотези визначалась залежність відносної швидкості $\varphi = w_L/w_0$ від відносної відстані заданої точки вимірювання швидкості від функціональної просторової характеристики $\eta_f = l/l_f$, де

$\ell = L/r_c$ — відносна відстань, а ℓ_f — таке її значення, при якому $w_L/w_0 = e^{-1}$, де e — основа натуральних логарифмів; r_c — радіус устя сопла.

На графіку рис.21 пунктирною лінією показано універсальний гідродинамічний профіль відносної швидкості стаціонарного плоского затопленого струменя, що побудований за рівнянням Г. Шліхтинга.

Дослідні дані в новій системі координат, що отримані для пульсуючого струменя, генерованого транспортувальним елементом віброперемішувального пристрою, групуються навколо кривої універсального гідродинамічного профілю турбулентного стаціонарного затопленого струменя. Точка «К» є тією межею, до якої спостерігається майже повне співпадіння з універсальним профілем, а після неї, тобто на значних віддаленнях від джерела генерації пульсуючого струменя, настає відхилення.

Являючись результатом усереднення швидкостей поодиноких струменів, що досягли відстані L і рухомих у часі один за одним із частотою коливань віброуючої перегородки f , швидкість w_L може бути представлена у вигляді

$$w_L = 2A_L f, \quad (47)$$

де A_L — амплітуда коливань пульсуючого струменя на відстані L .

Аналогічно початкова швидкість пульсуючого струменя дорівнює:

$$w_0 = 2A_0 f, \quad (48)$$

де $A_0 = A(1-\varepsilon)/\varepsilon$ — початкова амплітуда коливань. Відносна швидкість пульсуючого струменя на відстані L від її полюса при цьому дорівнюватиме

$$\frac{w_L}{w_0} = \frac{A_L f}{A_0 f} = \frac{A_L}{A_0}, \quad (49)$$

тобто перетворюється у відношення амплітуд.

З іншого боку, розглядаючи послідовне переміщення окремих поодиноких струменів, що представляють собою в дійсності вихрові кільця, які рухаються в напрямку поширення пульсуючого струменя, швидкість w_L можна записати в такому виді:

$$w_L = \omega_L R, \quad (50)$$

де R і ω_L — радіус поперечного перерізу вихрового кільця та кутова швидкість його обертання навколо вихрової нитки.

Специфіка генерації вихрових кілець віброуючим соплом, що рухається протилежно утвореному струменю у зоні розрідження, утвореної віброуючою перегородкою, сприяє остаточному формуванню кільця

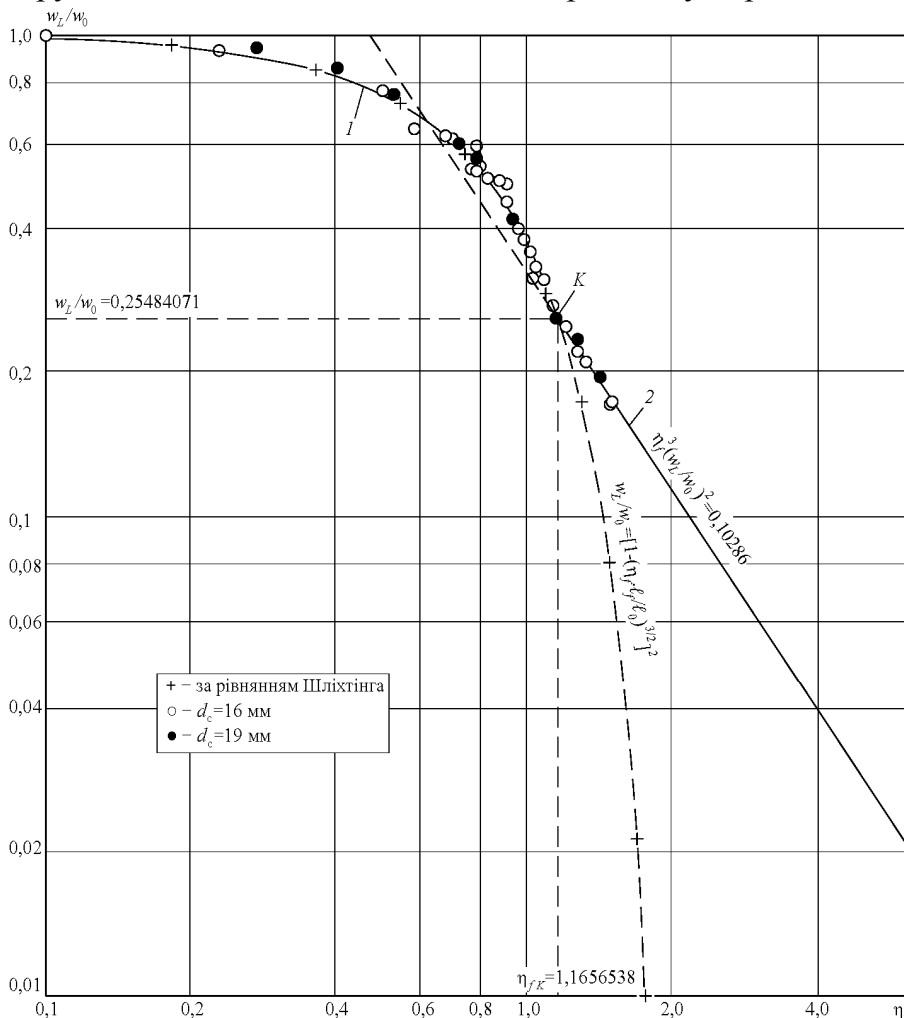


Рис.21. Узагальнення експериментальних даних з гідродинаміки турбулентних пульсуючих струменів безрозмірним профілем відносної швидкості пульсуючих струменів: 1 — за рівнянням Шліхтинга; 2 — за рівнянням (54)

радіусом R на початковій ділянці струменя.

Вважаючи R незмінним у процесі розвинення струменя, відносну його швидкість можна привести до виду:

$$\frac{w_L}{w_0} = \frac{\omega_L R}{\omega_0 R} = \frac{\omega_L}{\omega_0} \quad (51)$$

У цих функціональних просторово-часових координатах (рис.21) увесь масив даних узагальнився при η_f , меншої за критичне значення

$$(\eta_f)_k = 0, \text{ke} \ln 10 / (1 - e^{-0,5})^{2/3} = 1,1656538, \quad (52)$$

відомою формулою Шліхтінга для універсального профілю швидкостей у дальніх турбулентних слідах:

$$w_L / w_0 = \left[1 - (\eta_f \ell_f / \ell_0)^{3/2} \right]^2, \quad (53)$$

$$\text{а при } \eta_f > (\eta_f)_k \text{ залежністю } (\eta_f)^3 (w_L / w_0)^2 = C_T, \quad (54)$$

$$\text{де } C_T = (\eta_f)_k^3 \left[1 - (\eta_f)_k^{3/2} (1 - e^{-0,5}) \right]^4 = 0,10286 \quad (55)$$

являє собою фундаментальну константу; $\ell_0 = L_0 / r_c$ — відносна гранична відстань поширення турбулентного пульсуючого струменя, а L_0 — її абсолютне значення.

Запропоновані залежності узагальнюють експериментальні дані зі середньоквадратичним відхиленням $8,5 \cdot 10^{-3}$ у довірчому інтервалі 98%. Теоретичне значення $(\ell_f / \ell_0)_T$ дорівнює $(1 - e^{-0,5})^{2/3} = 0,53695838$.

Визначивши на основі залежності w_L / w_0 від ℓ експериментальне значення ℓ_f , можна розрахувати L_k і w_L , необхідні при конструюванні віброекстракторів.

У сьомому розділі, присвяченому визначенню енергетичних показників процесу віброекстрагування, наведено порядок розрахунку відповідних показників для періодичного та безперервного процесів.

Встановлення зв'язку між параметрами коливань робочих органів та витратою енергії на створення коливань, а також дослідження енерговитрат на турбулізацію робочого об'єму апарата періодичної дії віброперемішувальними пристроями різних конструкцій здійснювалось в системі чайна сировина — вода за коефіцієнтом розчинення модельних зразків сірчаноокислого алюмінію згідно методики, описаною у другому розділі.

Потужність на процес визначалась електричним методом за різницею потужностей робочого і холостого ходу (без робочого середовища) з урахуванням втрат на активний опір двигуна за рівнянням:

$$N = N_{\text{роб}} - N_x - (I_{\text{роб}}^2 - I_x^2) R, \quad (56)$$

де N — загальна потужність, що необхідна для виконання роботи при віброперемішуванні, Вт; $I_{\text{роб}}$, $N_{\text{роб}}$ — відповідно сила струму і потужність, що необхідна для виконання роботи під час робочого ходу, А, Вт; I_x , N_x — відповідно сила струму і потужність, що необхідна для виконання роботи холостого ходу, А, Вт; $R = 20$ Ом — активний опір електродвигуна привода установки. Результати дослідів узагальнювались у координатах $N/(nF\rho) = \varphi(Af)$ (рис.22), де n — кількість вібрувальних елементів (тарілок); F — площа поперечного перерізу апарата, м²; ρ — густина робочого середовища, кг/м³; Af — інтенсивність коливань віброперемішувальної системи, м/с.

Встановлено, що потужність, необхідна для здійснення роботи при віброперемішуванні, суттєво залежить від параметрів коливань віброперемішувальної системи. Причому

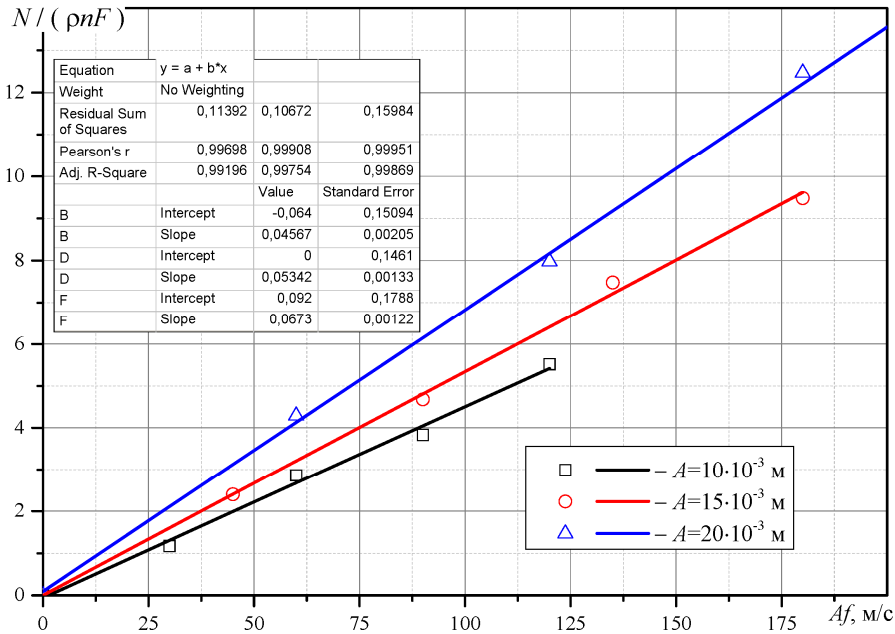


Рис.22. Залежність питомої потужності на періодичний процес віброекстрагування від інтенсивності коливань віброперемішувальної системи для різних амплітуд її коливань

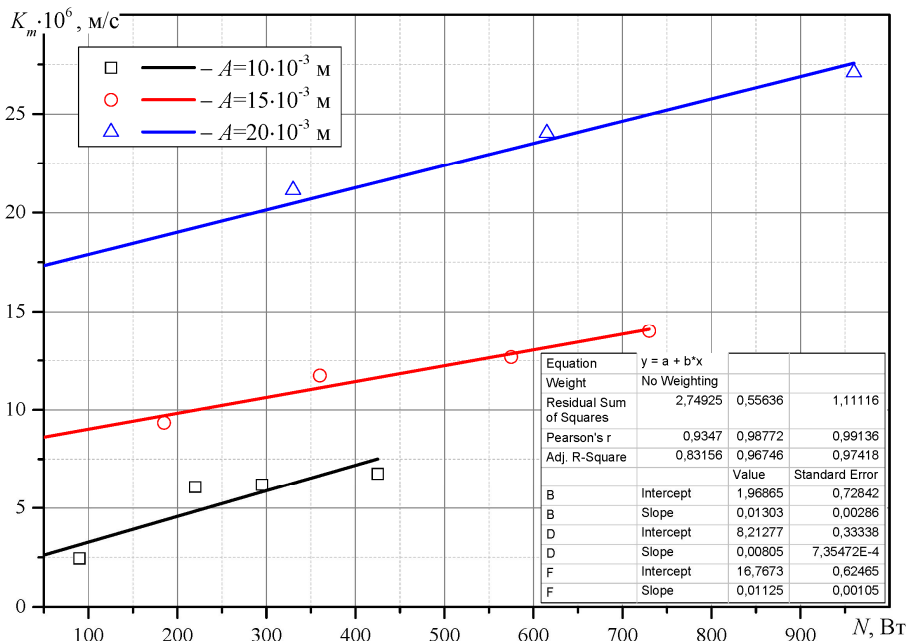


Рис.23. Залежність коефіцієнта розчинення (масовідачі) модельного зразку сірчаноокислого алюмінію від потужності на віброперемішування

амплітуда коливань більш впливає на енерговитрати ніж частота.

Залежність коефіцієнта розчинення модельних зразків від споживаної потужності при віброперемішуванні також підтверджує цей факт (рис.23).

Тому слід вважати частоту до 9 Гц рекомендованою при амплітудах віброперемішувальної системи до $20 \cdot 10^{-3}$ м.

Під час встановлення енерговитрат на безперервний процес припускалось, що вібротранспортувальна тарілка являє собою нерухому систему гідравлічних опорів, через яку почергово в одному та іншому напрямках (уверх-униз) рухається потік робочого середовища. Так, загальні витрати енергії на процес можуть бути визначені за виразом:

$$N = (N' + N'')n/2 + nN_3 + N_I, \quad (57)$$

де n — кількість вібротранспортувальних тарілок; N' , N'' — відповідно витрати енергії на подолання гідравлічних опорів при русі робочого середовища вверх-униз через транспортувальні та фільтрувальні елементи, боковий зазор між корпусом

апарата та тарілкою і на компенсацію дії сил інерції рухомих конструктивних елементів апарата. Разом з тим, розроблені конструкції апаратів мають спарені, рухомі у протифазі з однаковими масами вібротранспортувальної системи, що веде до мінімальних енерговитрат на переміщення цих мас.

Для розрахунку певної складової витрат енергії з урахуванням конструктивних і режимних параметрів роботи апарата можуть бути використані відповідні рівняння за кожною складовою і як результат, отримано:

$$N = \frac{w_0 \pi d^2 n}{8} \cdot \sum P_I^{(v)} + N_3 + \frac{m_t + m_b}{g \cdot \rho_t} (\rho_t - \rho_c) \cdot 2\pi^2 f^2 A \sin \beta, \quad (58)$$

де w_0 — початкова швидкість пульсуючих потоків, що забезпечує транспортування робочого середовища через елемент тарілки; d — еквівалентний діаметр елемента тарілки; n —

кількість елементів; $P_1^{(0)}$ — перепад тиску по обидві сторони тарілки; N_3 — витрати енергії на подолання гідравлічних опорів при русі робочого середовища уверх-униз через боковий зазор між корпусом апарата та тарілкою; m_T , m_B — відповідно маса тарілок і решти рухомої системи; β — кут ексцентрика привода; ρ_T , ρ_C — відповідно густини твердої фази та рідини.

Дослідження енерговитрати на безперервний процес в системі капронова дрібка — вода виконувалось на моделі вібраційного екстрактора за електровимірюваннями. При цьому співвідношення рідкої та твердої фаз при температурі 20 °С змінювалось від 0,25 до 0,85. Частота коливань вібротранспортувальної системи змінювалась у межах 1—10 Гц; амплітуда коливань фіксувалась на значеннях $(5, 10, 15) \cdot 10^{-3}$ м.

Результати дослідів узагальнювались у вигляді залежностей питомої витрати споживаної електроенергії на процес для різних режимних параметрів роботи апарата від інтенсивності коливань вібротранспортувальної системи (рис.24).

Графічні залежності свідчать, що суттєвий вплив на енерговитрати має амплітуда коливань вібросистеми. Характер кривих свідчить, що із трьох амплітуд коливань найбільш вигідною залишається амплітуда $10 \cdot 10^{-3}$ м. Крім того, мінімальні енерговитрати за всіма трьома графіками визначають оптимальні частоти коливань. Так, для амплітуди $5 \cdot 10^{-3}$ оптимальна інтенсивність коливань складає 40 м/с, що відповідає частоті 8 Гц; для амплітуди $10 \cdot 10^{-3}$ м оптимальна інтенсивність коливань — 30 м/с при частоті — 3 Гц; для амплітуди $15 \cdot 10^{-3}$ м — інтенсивність 43 м/с при частоті — 2,7 Гц.

Отримані оптимальні параметри коливань системи цілком узгоджуються та відповідають таким самим оптимальним, що отримані під час досліджень транспортувальної здатності вібросистеми, які наведено у третьому розділі.

Результати дослідів підтверджують, що протитечійне вібраційне розділення фаз забезпечує збільшення кількості енергії, що вкладається в одиницю робочого об'єму апарата, за рахунок рівномірного її розподілення у поперечному перерізі. Саме цей ефект дає підстави зробити висновок про можливість розроблення віброекстракторів великої одиничної потужності.

Результати дослідів підтверджують, що протитечійне вібраційне розділення фаз забезпечує збільшення кількості енергії, що вкладається в одиницю робочого об'єму апарата, за рахунок рівномірного її розподілення у поперечному перерізі. Саме цей ефект дає підстави зробити висновок про можливість розроблення віброекстракторів великої одиничної потужності.

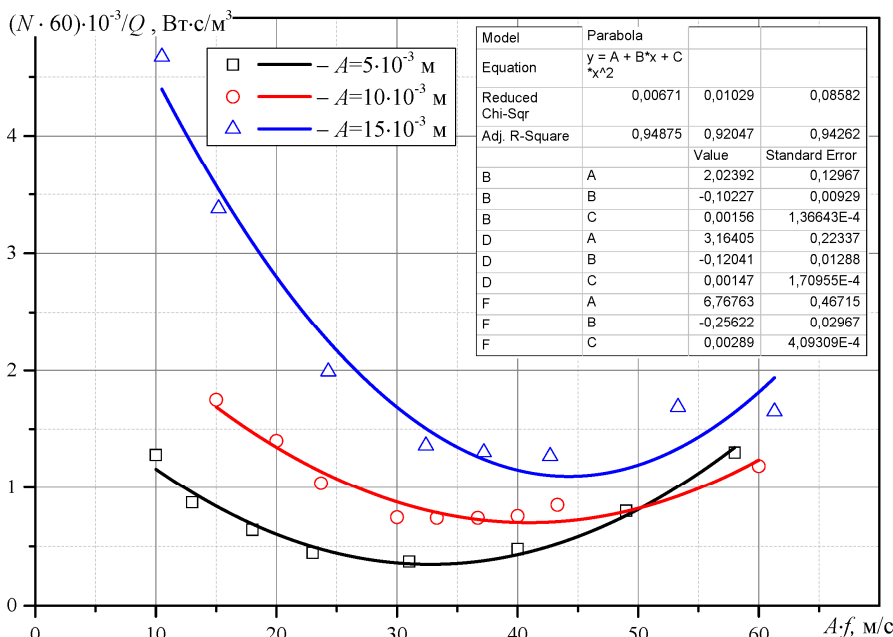


Рис.24. Залежність питомої споживаної електроенергії від інтенсивності коливань вібротранспортувальної системи при безперервному процесі

Восьмий розділ присвячений розробленню високоефективної екстракційної апаратури та її промислового використанню. Зосереджено увагу на тому, що всі конструктивні рішення розробленої віброекстракційної апаратури можуть бути використані майже в усіх галузях промисловості для отримання екстрактів в системі тверде тіло – рідина з малою різницею густин фаз, тобто для безвідходного та поглибленого перероблення рослинної сировини кореневого, трав'яного, плодово-ягідного і овочевого походження та її відходів. Доцільність використання апаратів періодичної або безперервної дії визначатимуть лише масштаби виробництва відповідної продукції. Так, наприклад, в пивоварній — для більш

повного вилучення гірких речовин при охмільованні сусла і переробці солодових ростків, у виноробній та консервній — для екстрагування барвних речовин з плодів та ягід, а також для перероблення пряно-ароматичної рослинної сировини при виробництві напоїв, в цукровій — для перероблення некондиційної бурякомаси (бою і хвостів буряка), у фармацевтичній — для екстрагування біологічно активних речовин із рослин лікарського призначення, та інше. Всі нові технічні рішення розробленої віброекстракційної апаратури та принципові апаратурно-технологічні схеми підтверджені одинадцятьма патентами України на винахід.

Результати роботи рекомендовано для використання проектними організаціями, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців у ВНЗ з напрямів: "Харчові технології та інженерія", "Біотехнологія біологічно активних речовин", "Хімічна технологія та інженерія".

ВИСНОВКИ

Результати теоретичних та експериментальних досліджень надали можливість сформулювати основні принципи і методи інтенсифікації масообміну в умовах віброекстрагування цільових компонентів із рослинної сировини в харчовій промисловості. Наукове обґрунтування та реалізовані в лабораторних умовах найбільш ефективні режими роботи періодичного та безперервного віброекстрагування надали можливість створити нові промислові апарати періодичної та безперервної дії для ефективного та поглибленого перероблення рослинної сировини з високим ступенем її подрібнення в різних галузях промисловості. Виконані дослідження дають підґрунтя зробити наступні висновки та рекомендації:

1. Аналіз основних гідродинамічних та масообмінних характеристик розроблених віброекстракторів показує, що покладені в основу їх роботи ефекти створення спрямованої пульсуючої дії струменів на взаємодіючі фази, генеровані елементами віброперемішувальних пристроїв, сприяють організації інтенсивних гідродинамічних режимів взаємодії фаз, збільшуючи активну поверхню до 100%.

2. Встановлено, що турбулентні пульсуючі струмені, що генеруються транспортувальними елементами віброуючих насадок, створюють оптимальні гідродинамічні умови для інтенсивного мікроперемішування та, як наслідок, умови оновлення великої міжфазової поверхні в поперечних перерізах двофазового потоку в усьому робочому об'ємі апарата, що обумовлює безперервний інтенсивний протитечійний масообмін.

Одержані дані дозволяють визначати відстань дії пульсуючих струменів, яка може бути взята як масштабний фактор при моделюванні процесу.

3. Розроблено математичні моделі структури реальних потоків у віброекстракторі безперервної дії колонного типу.

4. Встановлена залежність рівня поздовжнього перемішування та транспортувальної здатності віброекстрактора безперервної дії від геометрії транспортувальних елементів віброперемішувальних пристроїв.

Рекомендовані межі відповідних геометричних співвідношень складають: відношення висоти патрубку до його діаметра, а також діаметра патрубка до діаметра сопла від 2,0 до 3,0.

5. Встановлена афінність закономірностей гідродинаміки стаціонарного затопленого струменя, визначені основні критерії масштабування віброекстракторів (модифікований критерій гомохронності; кількість комірок із зонами ідеального перемішування; час релаксації та тривалість екстрагування; симплекси геометричної подібності транспортувальних елементів; коефіцієнт швидкості протитечійного розділення фаз; функціональна просторова характеристика поширення турбулентного пульсуючого струменя; питома витрата енергії на процес).

6. Виконано у функціональних просторово-часових координатах фундаментальний

опис закономірностей зміни швидкостей пульсуючих потоків, які разом із запропонованими розрахунковими рівняннями, що встановлюють зв'язок основних конструктивних і режимних параметрів, необхідні для конструювання і розрахунку віброекстракційних апаратів.

7. Встановлено, що збільшення інтенсивності коливань, починаючи з 15...20 м/с, призводить до стрімкого зростання зовнішнього масообміну, стабілізуючись на певному рівні, що у свою чергу означає перехід сировини у псевдозріджений стан.

8. Розроблено математичну модель конвективного масоперенесення із врахуванням накопичувальної складової речовини, що враховує масовіддачу в зоні віброперемішування та розкрито зміст цієї складової.

9. Для визначення масообмінних характеристик екстракційної апаратури різних модифікацій запропоновано новий експериментальний експрес-метод, заснований на розчиненні за дифузійним типом.

10. Встановлено функціональну залежність насичення екстрактивними речовинами екстракта в часі від об'ємного коефіцієнта масопередачі, що надає можливість визначати мінімальний час досягнення рівноважного стану системи не тільки екстракційних процесів, але й тих, що супроводжуються масообміном в апаратах з перемішувальними пристроями.

11. Визначено вплив сумісної дії електроіскрових розрядів та низькочастотних механічних коливань на ступінь вилучення сухих речовин із хмельової сировини.

12. Встановлено, що при інтенсифікації зовнішнього масоперенесення для періодичного процесу слід вважати оптимальною частоту коливань до 9 Гц при амплітудах віброперемішувальної системи до $20 \cdot 10^{-3}$ м. Для безперервного процесу цей показник складає відповідно до 4 Гц та до $15 \cdot 10^{-3}$ м.

13. Розроблено методики розрахунку віброекстракторів періодичної та безперервної дії з урахуванням конструктивних, енергетичних та кінетичних характеристик процесу та нові апаратурно-технологічні схеми періодичної та безперервної дії промислової реалізації поглибленого вилучення цільових компонентів із рослинної сировини та її відходів, де як інтенсифікуючий фактор використовуються низькочастотні механічні коливання без та з використанням електророзрядної імпульсної дії на рослину сировину, або з її проміжним віджимом.

14. Матеріали досліджень використані Яготинським і Ніжинським машинобудівними заводами при сумісному розробленні з НУХТ технічної документації на віброекстрактори періодичної та безперервної дії.

Віброекстрактор періодичної дії успішно пройшов випробування на Агропромислового виробництві в м. Берегово. Очікувана розрахункова сумарна дисконтована віддача проекту від впровадження у виробництво в 5,9 разів перевищить інвестиційні вкладання.

Розроблена технічна документація на промисловий зразок віброекстрактора періодичної дії, яка передана дослідному виробництву ТОВ «ЧОЙС» та Келерашському консервному заводу республіки Молдова.

Для промислових умов Бердичівського пивзаводу розроблено та впроваджено протитечійний віброекстрактор безперервної дії для отримання хмелевих екстрактів.

15. Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес підготовки фахівців напряму „Харчова технологія та інженерія” при вивченні дисциплін «Процеси і апарати харчових виробництв», «Процеси і апарати біотехнологічних виробництв», «Математичні моделі в розрахунках на ЕОМ», «Математико-статистичні методи досліджень»; використані в підручнику «Процеси і апарати харчових виробництв» і навчальних посібниках «Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум» та «Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування».

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ Наукові фахові видання

1. Зав'ялов В. Л. Исследование массообменных характеристик виброекстрактора при переработке растительного сырья и его отходов / В. Л. Зав'ялов, П. П. Лобода // Тепло- и массообменные процессы в пищевой промышленности: сборник научных трудов. — Киев, 1990. — С. 138—146.

Особистий внесок: Проведення дослідів. Узагальнення результатів.

2. Лобода П. П. Закономерности гидродинамики пульсирующих струй в виброекстракторах / П. П. Лобода, В. Л. Зав'ялов // Пищевая промышленность. — 1992. — Вып. 38. — С. 88—91.

Особистий внесок: Проведення дослідів, узагальнення результатів. Розроблення математичної моделі.

3. Зав'ялов В. Л. Витрати енергії і транспортувальна здатність віброекстракторів / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, А. Б. Вознесенський // Наукові праці НУХТ. — 2001. — № 10. — С. 122—123.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі. Узагальнення результатів. Розроблення методики визначення транспортувальної здатності апарата.

4. Зав'ялов В. Л. Механізм та особливості процесу віброекстрагування рослинної сировини / В. Л. Зав'ялов, П. П. Лобода, В. С. Бодров // Наукові праці УДУХТ. — 2002. — № 12. — С. 74—77.

Особистий внесок: Математичний опис гідродинаміки та масообміну. Узагальнення результатів.

5. Зав'ялов В. Л. Особливості віброекстрагування із рослинної сировини та перспективи його застосування у переробній промисловості / В. Л. Зав'ялов, Ю. В. Запорожець, Д. В. Барабась // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, 2003. — № 1 (27). — С. 42—43.

Особистий внесок: Розроблення експериментальної установки та моделі. Підготовка висновків і рекомендацій.

6. Зав'ялов В. Л. Апаратурно-технологічна схема віброекстрагування функціональних речовин із хмелю / В. Л. Зав'ялов, Ю. В. Запорожець, В. С. Бодров // Харчова промисловість. Додаток до журналу. — 2004. — № 3. — С. 117—118.

Особистий внесок: Розроблення апаратурно-технологічної схеми. Написання висновків.

7. Зав'ялов В. Л. Безвідходне енергозбережне виробництво чайного концентрату / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Н. В. Попова // Харчова промисловість. — 2005. — № 4. — С. 148—150.

Особистий внесок: Розроблення апаратурно-технологічної схеми. Підготовка висновків і рекомендацій.

8. Зав'ялов В. Л. Конструктивні та техніко-економічні особливості віброекстрактора періодичної дії / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Т. Г. Мисюра // Харчова промисловість. — 2005. — № 4. — С. 146—147.

Особистий внесок: Розроблення конструкції віброекстрактора. Підготовка висновків і рекомендацій.

9. Попова Н. В. Розробка технологічних режимів одержання екстракту з пряно-ароматичної рослинної сировини / Н. В. Попова, Л. О. Косоголова, В. Л. Зав'ялов, І. Ф. Малежик // Наукові праці ОНАХТ. — Одеса, 2006. — Т. 2. — № 28. — С. 350—353.

Особистий внесок: Участь у проведенні дослідів та опрацювання результатів експерименту. Підготовка висновків.

10. Зав'ялов В. Л. Визначення розмірів байпасних потоків у віброекстракторах з електромеханічним приводом в процесі екстрагування цінних компонентів з подрібненої рос-

линної сировини / В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, Б. В. Кузьменко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства : науково-виробничий журнал. — К., 2006. — № 4 (19). — С. 63—66.

Особистий внесок: Математичний опис процесу.

11. Зав'ялов В. Л. Визначення величин зворотніх потоків за екстрагентом та за твердою фазою в процесі екстрагування цінних компонентів з подрібненої рослинної сировини у віброекстракторах з електромеханічним приводом / В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, Б. В. Кузьменко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства: науково—виробничий журнал. — К., 2006. — № 3 (18). — С. 5—7.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі структури потоків.

12. Запорожець Ю. В. Дослідження дифузійних властивостей шишкового хмелю при виробництві екстрактів / Ю. В. Запорожець, В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров // Наукові праці Вінницького державного аграрного університету. — Вінниця, 2006. — Вип. 1. — С. 20—24.

Особистий внесок: Проведення дослідів. Узагальнення результатів експерименту.

13. Зав'ялов В. Л. Конструктивні та техніко-економічні особливості віброекстрактора періодичної дії / В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, В. С. Бодров // Наукові праці ВДАУ — Вінниця, 2006. — Вип. 1. — С. 19—20.

Особистий внесок: Розроблення конструкції апарата. Узагальнення висновків і рекомендацій.

14. Зав'ялов В. Л. Дослідження дифузійних властивостей листової чайної сировини / В. Л. Зав'ялов, Н. В. Попова // Наукові праці ВДАУ. — Вінниця, 2006. — Вип. 1. — С. 14—19.

Особистий внесок: Проведення дослідів. Узагальнення результатів експерименту.

15. Кузьменко Б. В. Визначення розмірів застійних зон у віброекстракторах з електричним приводом в процесі екстрагування цінних компонентів з подрібненої рослинної сировини / Б. В. Кузьменко, В. Л. Зав'ялов // Електрифікація та автоматизація сільського господарства : науково-виробничий журнал. — К., 2007. — № 1 (20). — С. 71—74.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі структури потоків.

16. Зав'ялов В. Л. Гідродинамічне моделювання процесу екстрагування цінних компонентів з подрібненої рослинної сировини у віброекстракторах з електромеханічним приводом / В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, Б. В. Кузьменко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства: науково—виробничий журнал. — К., 2007. — № 2 (21). — С. 40—44.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі структури потоків.

17. Попова Н. В. Дослідження екстрагування флавоноїдних сполук з лофанту і гісопу у віброекстракторі / Н. В. Попова, В. Л. Зав'ялов // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, 2007. — № 4 (49). — С. 13—17.

Особистий внесок: Розроблення методики проведення дослідів. Узагальнення результатів експерименту.

18. Зав'ялов В. Л. Дослідження кінетики процесу екстрагування з листової чайної сировини в апаратах періодичної дії із різними вібраційними системами перемішування / В. Л. Зав'ялов, Н. В. Попова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. — 2007. — Вип. 58. — С. 102—112.

Особистий внесок: Участь у проведенні дослідів. Узагальнення експериментальних даних. Формування висновків.

19. Паламарчук І. П. Обґрунтування основних робочих параметрів механічного віброприводу машини з гнучким контейнером для механічної обробки харчової сировини / І. П. Паламарчук, В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра // Наукові праці НУХТ. — 2007. — № 22. — С. 47—50.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі.

20. Зав'ялов В. Л. Математична модель зовнішнього масообміну періодичного віброекстрагування із рослинної сировини / В. Л. Зав'ялов, О. П. Лобок, Н. В. Попова, В. С. Бо-

дров // Наукові праці НУХТ. — 2008. — № 24. — С. 50—54.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі.

21. Зав'ялов В. Л. Вібоекстрактори з гнучкими еластичними пластинками—пелюстками та стулками / В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, В. С. Бодров // Наукові праці ОНАХТ. — Одеса, 2008. — Вип. 32. — С. 131—133.

Особистий внесок: Розроблення конструкції вібоекстрактора.

22. Зав'ялов В. Л. Дослідження структури реальних потоків в екстракторі колонного типу з вібруючою системою розділення фаз / В. Л. Зав'ялов, Ю. В. Запорожець, О. П. Лобок // Наукові праці ОНАХТ. — Одеса, 2008. — Вип. 32. — С. 93—97.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі структури потоків. Формулювання висновків.

23. Зав'ялов В. Л. Математична модель зовнішнього масообміну періодичного вібоекстрагування з рослинної сировини / В. Л. Зав'ялов, О. П. Лобок, Н. В. Попова, В. С. Бодров // Наукові праці ОНАХТ. — Одеса, 2008. — Вип. 32. — С. 88—93.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі. Формулювання висновків.

24. Зав'ялов В. Л. Дослідження структури реальних потоків в екстракторі колонного типу з вібруючою системою розділення фаз / В. Л. Зав'ялов, Ю. В. Запорожець, В. С. Бодров, О. П. Лобок // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, 2008. — № 1 (50). — С. 59—63.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі структури потоків.

25. Попова Н. В. Періодичне вібоекстрагування харчового барвника із темних сортів винограду / Н. В. Попова, В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, О. І. Ключко // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, 2009. — Вип. 4. — С. 137—140.

Особистий внесок: Участь у проведенні дослідів. Формування висновків.

26. Мисюра Т. Г. Ієрархічна структурна схема процесно-апаратних ефектів у робочому об'ємі колонного вібоекстрактора безперервної дії / Т. Г. Мисюра, В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Н. В. Попова // Збірник наукових праць «Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі». — Харків, 2009. — Вип. 2. — С. 313—318.

Особистий внесок: Розроблення структурної схеми.

27. Попова Н. В. Розроблення технології виробництва натурального харчового барвника з виноградних вичавок при використанні вібоекстрагування / Н. В. Попова, П. М. Немирович, В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра // Харчова промисловість. — 2010. — № 9. — С. 102—104.

Особистий внесок: Участь у розробленні технології виробництва харчового барвника. Формування висновків.

28. Мисюра Т. Г. Розроблення алгоритму визначення типу моделі гідродинамічної структури двофазного потоку в робочому об'ємі колонного вібоекстрактора безперервної дії / Т. Г. Мисюра, В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Н. В. Попова // Наукові праці НУХТ. — 2010. — № 33. — С. 63—68.

Особистий внесок: Розроблення алгоритму структури потоків та формування висновків.

29. Мисюра Т. Г. Дослідження кінетичних характеристик процесу вібоекстрагування в системі рослинна сировина — екстрагент / Т. Г. Мисюра, В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Н. В. Попова // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, 2010. — № 1 (57) — С. 113—118.

Особистий внесок: Узагальнення результатів дослідів. Формування висновків.

30. Мисюра Т. Г. Узагальнений алгоритм розроблення математичної моделі процесу вібоекстрагування в колонних апаратах безперервної дії / Т. Г. Мисюра, В. Л. Зав'ялов, В.

С. Бодров, Н. В. Попова // Обладнання та технології харчових виробництв: Тематичний збірник наукових праць. ДОННУЕТ ім. М. Туган-Барановського — Донецьк, 2010. — Вип. 23. — С. 250—256.

Особистий внесок: Розроблення узагальненого алгоритму.

31. Зав'ялов В. Л. Дослідження ефективності зовнішнього масообміну при віброекстрагуванні з рослинної сировини / В. Л. Зав'ялов, Ю. В. Запорожець, В. С. Бодров, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукраїнський науково—технічний журнал. — 2010. — № 4 (60). — С. 101—105.

Особистий внесок: Проведення дослідів. Узагальнення результатів експерименту

32. Запорожець Ю. В. Дослідження процесу електроіскрового оброблення рослинної сировини при віброекстрагуванні / Ю. В. Запорожець, В. Л. Зав'ялов, Ю. О. Дашковський // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, 2011. — № 1 (61). — С. 121—125.

Особистий внесок: Розроблення методики досліджень та узагальнення результатів. Формулювання висновків.

33. Зав'ялов В. Л. Математична модель зовнішнього масообміну при віброекстрагуванні / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». Вінницький національний аграрний університет. — Вінниця, 2011. — № 2 (62) — С. 120—125.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі. Формулювання висновків.

34. Зав'ялов В. Л. Математичний опис процесу протитечійного транспортування твердої фази при неперервному віброекстрагуванні / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, 2011. — № 3 (63) — С. 102—107.

Особистий внесок: Розроблення математичного опису. Формулювання висновків.

35. Зав'ялов В. Л. Дослідження процесу віброекстрагування із рослинної сировини та перспективи його використання в промисловості / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Ю. В. Запорожець, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, В. Є. Деканський // Харчова промисловість. Випуск присвячено 60—річчю кафедри процесів і апаратів харчових виробництв НУХТ. — 2012. — С. 260—268.

Особистий внесок: Узагальнення результатів та формулювання висновків і рекомендацій.

36. Zavalov V. Extractors with vibratory mixing devices and prospects of their use in the food industry / V. Zavalov, I. Malejic, T. Misyura, N. Popova, Y. Zaporozhets, V. Dekanskiy, V. Bodrov // Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies. Plovdiv, 2012. — № 1. — P. 89 — 92.

Особистий внесок: Узагальнення результатів. Формулювання висновків.

37. Зав'ялов В. Л. Систематизація класифікаційних ознак екстракторів для системи тверде тіло — рідина / В. Л. Зав'ялов, В. Є. Деканський, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець, В. С. Бодров // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, 2012. — № 4 (68). — С. 109—111.

Особистий внесок: Розроблення класифікаційних ознак екстракторів. Підготовка висновків та рекомендацій.

38. Зав'ялов В. Л. Дослідження процесу віброекстрагування із рослинної сировини та перспективи його використання в промисловості / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Ю. В. Запорожець, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, В. Є. Деканський // Харчова промисловість, НУХТ. — 2012. — № 12. — С. 260—268.

Особистий внесок: Узагальнення експериментальних даних. Підготовка висновків та рекомендацій.

39. Зав'ялов В. Л. Математичне моделювання структури потоків в віброекстракторах

безперервної дії колонного типу з вібруючою системою розділення фаз / В. Л. Зав'ялов, О. П. Лобок, Т. Г. Мисюра, Ю. В. Запорожець, Н. В. Попова, В. С. Бодров // Наукові праці ОНАХТ. — Одеса, 2013. — № 43. — Том 2. — С. 26—29.

Особистий внесок: Розроблення математичної моделі структури потоків.

40. Зав'ялов В. Л. Класифікаційні ознаки збуджувачів коливальних ефектів та пристроїв для їх реалізації при екстрагуванні / В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, 2013. — № 1 (69). — С. 121—124.

Особистий внесок: Розроблення класифікаційних ознак збуджувачів. Формулювання висновків.

41. Зав'ялов В. Л. Математичний опис зовнішнього масообміну при екстрагуванні із рослинної сировини в умовах нестационарного масоперенесення / В. Л. Зав'ялов // Наукові праці НУХТ. — 2013. — № 51. — С. 64—70.

42. Зав'ялов В. Л. Аналітичне дослідження масоперенесення при безперервному віброекстрагуванні із рослинної сировини / В. Л. Зав'ялов // Наукові праці НУХТ. — 2013. — № 53. — С. 131—137.

43. Zavalov V. Mecanismul și particularitățile procesului continuu de vibroextractare a materiei prime vegetale / Zavalov V., Bodrov V., Zaporojecz J., Misyura T., Popova N., Decanschii V. // Meridian in jineresc. Publicație tehnico—științifică și aplicativă fondată. Editura “Tehnică” UTM. — 2014. — № 1. С. 26—30.

Особистий внесок: Розроблення методики досліджень та узагальнення результатів. Формулювання висновків.

44. Зав'ялов В. Л. Енергетичні показники процесу безперервного віброекстрагування / В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, В. С. Бодров, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець, В. С. Костюк // Наукові праці НУХТ. — 2014. — № 54. — С. 8—16.

Особистий внесок: Розроблення методики досліджень та узагальнення результатів. Формулювання висновків.

Тези доповідей на наукових конференціях

1. Зав'ялов В. Л. Гидродинамика пульсирующих струй в виброэкстракторах. / В. Л. Зав'ялов, П. П. Лобода // Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств: тез. докл. VII Республиканской научно-техн. конференции. — Львов, 1988. — Ч. 1. — С. 36—37.

Особистий внесок: Розроблення методики досліджень. Організація обчислювального експерименту. Узагальнення результатів.

2. Зав'ялов В. Л. Виброэкстракторы для переработки пищевого сырья и его отходов / В. Л. Зав'ялов, П. П. Лобода // Совершенствование технологических процессов производства новых видов пищевых продуктов и добавок: тез. докл. Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов. — Киев: ВНИИППД, 1989. — С. 66.

Особистий внесок: Узагальнення результатів дослідів. Формування висновків та рекомендацій.

3. Зав'ялов В. Л. Интенсификация массообмена в виброэкстракторах / В. Л. Зав'ялов, П. П. Лобода // Интенсификация технологии и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК: тез. докл. Республиканской научно-технической конференции. — Киев: КТИПП, 1989. — С. 18.

Особистий внесок: Постановка задачі, узагальнення результатів, формування висновків.

4. Зав'ялов В. Л. Гидродинамика пульсирующих струй при виброперемешивании / В. Л. Зав'ялов, П. П. Лобода // Теория и практика перемешивания в жидких средах: тез. докл. VI Всесоюзной конференции по теории и практики перемешивания в жидких средах.

— Ленинград, 1990. — С. 148—149.

Особистий внесок: Розроблення математичних моделей. Проведення обчислювальних експериментів.

5. Лобода П. П. Расчет гидродинамических характеристик и масштабирование виброэкстраторов для переработки некондиционной свекломассы / П. П. Лобода, В. Л. Завьялов // Разработка и внедрение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевой и перерабатывающей отрасли АПК: тез. докл. Республиканской научно-технической конференции. — Киев: КТИПП, 1991. — С. 46.

Особистий внесок: Постановка задачі. Узагальнення результатів, формулювання висновків і рекомендацій.

6. Завьялов В. Л. Исследование гидродинамики пульсирующих струй в виброэкстраторах / В. Л. Завьялов, П. П. Лобода // Обработка жидких сред электромагнитными полями. Тепломасообмен и гидродинамика в турбулентных течениях: тез. докл. на Межгосударственной конференции. — Алушта, 1992. — С. 52.

Особистий внесок: Проведення експерименту. Узагальнення результатів.

7. Лобода П. П. Перспективи застосування віброекстракційних установок для переробки некондиційної бурякомаси і відходів харчової сировини / П. П. Лобода, В. Л. Зав'ялов // Розробка та впровадження нових технологій і обладнання в харчову та переробні галузі АПК: Тез. доп. міжнародної науково-техн. конференції. — Київ: КТІХП, 1993. — С. 435—436.

Особистий внесок: Постановка задачі. Формування висновків і рекомендацій.

8. Зав'ялов В. Л. Дослідження протитечійного транспортування фаз під час віброекстрагування з рослинної сировини / В. Л. Зав'ялов // Розроблення та впровадження прогресивних ресурсощадних технологій та обладнання в харчову промисловість: Тез. доп. міжнародної науково-техн. конференції. — Київ: УДУХТ, 1997. — С. 102.

Особистий внесок: Розроблення методики досліджень. Організація експерименту. Узагальнення експериментальних даних.

9. Зав'ялов В. Л. Твердофазний екстрактор з протитечійним вібротранспортуванням фаз / В. Л. Зав'ялов, Ю. В. Карлаш, П. П. Лобода // Вібрації в техніці та технологіях: Зб. праць III міжнародної науково-технічної конференції. — Євпаторія, 1998. — С. 52—54.

Особистий внесок: Розроблення конструкції апарата. Узагальнення результатів та висновків.

10. Зав'ялов В. Л. Особливості протитечійного вібротранспортування фаз під час екстрагування із рослинної сировини / В. Л. Зав'ялов, Ю. В. Карлаш, П. П. Лобода // Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо— та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості: Матеріали доповідей VI міжнародної науково-техн. конференції (19—21 жовтня 1999 р.). — Київ: УДУХТ, 1999. — С. 36.

Особистий внесок: Розроблення методики досліджень. Організація експерименту. Узагальнення експериментальних даних.

11. Конструктивні та техніко—економічні особливості віброекстрактора періодичної дії / Т. Г. Мисюра, В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров // Матеріали IX міжнародної науково—технічної конференції «Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодні і перспективи» (17—19 жовтня 2005 р.). — Київ: НУХТ, 2005. — Ч. II — С. 20.

Особистий внесок: Розроблення конструкції апарата, її опис та формування висновків і рекомендацій.

12. Попова Н. В. Дослідження процесу екстрагування водорозчинних речовин із чайної сировини / Н. В. Попова, В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров // Нові технології та технічні

рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодення і перспективи: Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції (17—19 жовтня 2005 р.). — Київ: НУХТ, 2005. — С. 12—13.

Особистий внесок: Розроблення методики. Розроблення методики. Узагальнення результатів експерименту. Формування висновків.

13. Зав'ялов В. Л. Дослідження кінематичних характеристик процесу віброекстрагування в системі рослинна сировина — екстрагент / В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, В. С. Бодров, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець // Програма ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (5—8 жовтня 2009 р.). — Вінниця: ВДАУ, 2009. — С. 20.

Особистий внесок: Концепція розроблення математичної моделі. Проведення обчислювальних експериментів. Формування висновків.

14. Зав'ялов В. Л. Закономірності віброекстрагування та перспектива його застосування для перероблення рослинної сировини та її відходів / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець // Тези доповідей науково-практичної конференції «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи» (27—28 вересня 2010 р.). — Київ: НУХТ, 2010. — С. 64.

Особистий внесок: Постановка задачі, розроблення математичних моделей, узагальнення результатів досліджень.

15. Запорожець Ю. В. Моделювання зовнішнього масообміну при віброекстрагуванні із рослинної сировини / Ю. В. Запорожець, В. Л. Зав'ялов // Тези доповідей науково—практичної конференції «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи» (27—28 вересня 2010 р.). — Київ: НУХТ, 2010. — С. 64.

Особистий внесок: Концепція та розроблення математичної моделі. Узагальнення результатів та формування висновків.

16. Попова Н. В. Періодичне віброекстрагування харчового барвника із червоного буряка / Н. В. Попова, П. М. Немирович, В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра // Тези доповідей науково-практичної конференції «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи» (27—28 вересня 2010 р.). — Київ: НУХТ, 2010. — С. 64.

Особистий внесок: Участь у проведенні експериментів. Узагальнення результатів експериментів.

17. Зав'ялов В. Л. Закономерности и перспективы применения виброэкстрагирования для переработки растительного сырья / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець // Материали IV Международной конференции «Экстракция органических соединений» (20—24 сентябрь 2010 г.). — Воронеж: ВГТА, 2010. — С. 51.

Особистий внесок: Узагальнення результатів експерименту, підготовка матеріалу до доповіді.

18. Зав'ялов В. Л. Дослідження процесу електроіскрового оброблення рослинної сировини при віброекстрагуванні / В. Л. Зав'ялов, Ю. В. Запорожець, Ю. О. Дашковський // Тези доповідей II міжнародної науково-технічної конференції «Земля України — потенціал енергетичної та екологічної безпеки держави» (23—26 березня 2011 р.). — Вінниця: ВНАУ, 2011. — С. 121—125.

Особистий внесок: Організація обчислювального експерименту, узагальнення результатів досліджень. Формування висновків.

19. Зав'ялов В. Л. Моделювання ефективності зовнішнього масообміну при екстрагуванні в системі рослинна сировина—рідина / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець // Тези доповідей Міжнародної науково—технічної конференції «Сучасні технології та обладнання харчових виробництв» (29—30 вересня 2011

р.). — Тернопіль, ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2011. — С. 208—209.

Особистий внесок: Розробка математичної моделі. Формування висновків і рекомендацій.

20. Зав'ялов В. Л. Дослідження масообміну при віброекстрагуванні / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Т. Г. Мисюра, Ю. В. Запорожець, Н. В. Попова, В. Є. Деканський // Міжнародна науково-практична конференція «Удосконалення процесів і обладнання — запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (10—11 квітня 2012 р.). — Київ: НУХТ, 2012. — С. 28—29.

Особистий внесок: Узагальнення результатів експерименту. Формування висновків і рекомендацій.

21. Зав'ялов В. Л. Вібраційні екстрактори для переробки рослинної сировини та її відходів / В. Л. Зав'ялов, В. С. Бодров, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець, В. Є. Деканський // Тези доповідей Міжнародного науково—практичного форуму «НАУКА І БІЗНЕС — ОСНОВА РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ». Союз науки і бізнесу — Україні XXI сторіччя (11 — 12 жовтня 2012 р.). — Дніпропетровськ, 2012. — С.26 — 29.

Особистий внесок: Узагальнення результатів дослідів. Формування висновків і рекомендацій.

22. Misyura T. Mathematical description of the process of counterflow transportation of a solid phase in continuous vibroextraction / T. Misyura, V. Zavialov, V. Bodrov, N. Popova, Y. Zaporozhets // The second north and east European congress on food (May 26, 2013). — Kiev: NUFT, 2013. — P. 165.

Особистий внесок: Розроблення віброекстракторів. Узагальнення результатів дослідів. Формування висновків і рекомендацій.

23. Popova N. Investigation of the extraction of flavoid compounds from high mountain Herbage / N. Popova, V. Zavialov, V. Bodrov, T. Misyura, Y. Zaporozhets // The second north and east European congress on food (May 26, 2013). — Kiev: NUFT, 2013. — P. 165.

Особистий внесок: Узагальнення результатів дослідів. Формування висновків і рекомендацій.

24. Zaporozhets Y. Characteristic features of electric—spark treatment of vegetable hop Raw value of bitterness in the composition materials in vibroextraction / Y. Zaporozhets, V. Zavialov, V. Bodrov, T. Misyura, N. Popova // The second north and east European congress on food (May 26, 2013). — Kiev: NUFT, 2013. — P. 165.

Особистий внесок: Узагальнення результатів дослідів. Формування висновків і рекомендацій.

25. Zavialov V. Scientific justification of the vibroextraction process and its use in the Agroindustrial complex / V. Zavialov, I. Malejic, V. Bodrov, T. Misyura, N. Popova, Y. Zaporozhets // The second north and east European congress on food (May 26, 2013). — Kiev: NUFT, 2013. — P. 166.

Особистий внесок: Узагальнення результатів дослідів. Формування висновків і рекомендацій.

26. Zavialov V. Vibratory extraction and prospects of its using rational processing of vegetable raw materials and their processing waste / V. Zavialov, I. Malejic, V. Bodrov, T. Misyura, N. Popova, Y. Zaporozhets // The second north and east European congress on food (May 26, 2013). — Kiev: NUFT, 2013. — P. 167.

Особистий внесок: Узагальнення результатів дослідів. Формування висновків і рекомендацій.

27. Зав'ялов В. Л. Дослідження протитечійного розділення фаз при твердофазовому віброекстрагуванні/ В. Л. Зав'ялов, О. П. Лобок, Т. Г. Мисюра, Ю. В. Запорожець, Н. В. Попова, В. С. Бодров // Матеріали II Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції «Ресурсо—та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової про-

дукції — основні засади її конкурентноздатності» (11 вересня 2013 р.). — Київ, 2013. — С. 68—70.

Особистий внесок: Виконання обчислювального експерименту. Розроблення математичної моделі. Формулювання висновків.

Патенти України

1. Пат. 84641 Україна, МПК С 11 В 9/02. Лінія виробництва концентрату екстракту чаю / Зав'ялов В. Л., Попова Н. В., Мисюра Т. Г. — № U 2007 03026; заявл. 22.03.07; опубл. 10.11.08, Бюл. № 21.

Особистий внесок: Обґрунтування схеми винаходу та теоретичних положень.

2. Пат. 85436 Україна, МПК В 01 D 11/02. Екстрактор / Зав'ялов В. Л., Попова Н. В. — № а 2007 03027; заявл. 22.03.07; опубл. 26.01.09, Бюл. № 2.

Особистий внесок: Формулювання ідеї патенту. Розроблення схеми апарата.

3. Пат. 85435 Україна, МПК В 01 D 11/02. Екстрактор / Зав'ялов В. Л., Попова Н. В. — №а 2007 03023; заявл. 22.03.07; опубл. 26.01.09, Бюл. № 2.

Особистий внесок: Формулювання ідеї патенту. Розроблення схеми апарата.

4. Пат. 86485 Україна, МПК В 01 D 11/02. Вібраційний екстрактор / Зав'ялов В. Л., Запорожець Ю. В., Бодров В. С. — № а 2007 07563; заявл. 05.07.07; опубл. 27.04.09, Бюл. №8.

Особистий внесок: Формулювання ідеї патенту. Розроблення схеми апарата.

5. Пат. 90802 України, МПК В 01 D 11/02. Вібраційний екстрактор / Зав'ялов В. Л., Бодров В. С., Мисюра Т. Г., Попова Н. В., — № U 2008 12893; заявл. 05.11.08; опубл. 25.05.10, Бюл. № 10.

Особистий внесок: Формулювання ідеї патенту. Розроблення схеми апарата.

6. Пат. 92560 України, МПК В 01 D 11/02. Вібраційний екстрактор / Запорожець Ю. В., Зав'ялов В. Л., Ардинський О. В. — № а 2009 06928; заявл. 02.07.09; опубл. 26.10.09, Бюл. № 20.

Особистий внесок: Формулювання ідеї патенту. Розроблення схеми апарата.

7. Пат. 92851 України, МПК В 01 D 11/02. Віброекстракційна лінія виробництва хмельових екстрактів / Зав'ялов В. Л., Бодров В. С., Мисюра Т. Г., Попова Н. В. — № а 2009 07181; заявл. 09.11.07; опубл. 10.12.10, Бюл. № 23.

Особистий внесок: Обґрунтування схеми винаходу та теоретичних положень.

8. Пат. 96202 України, МПК В 01 D 11/02. (2006.01). Лінія виробництва екстрактів із рослинної сировини та її відходів / Запорожець Ю. В., Зав'ялов В. Л.; заявл. 20.01.10; опубл. 10.10.11, Бюл. № 19.

Особистий внесок: Обґрунтування схеми винаходу та теоретичних положень.

9. Пат. 96234 України, МПК В 01 D 11/02. (2006.01). Лінія виробництва екстрактів із рослинної сировини та її відходів / Запорожець Ю. В., Зав'ялов В. Л., Дашковський Ю. О.; заявл. 03.09.10; опубл. 10.10.11, Бюл. № 19

Особистий внесок: Обґрунтування схеми винаходу та теоретичних положень.

10. Пат. 99991 України МПК В01D 11/02 (2006.01). Вібраційний екстрактор / Зав'ялов В. Л., Бодров В. С., Попова Н. В., Мисюра Т. Г., Варганова І. В., Мілютін О. І. № а 2011 12896; опубл. 25.10.12, Бюл. № 20.

Особистий внесок: Формулювання ідеї патенту. Розроблення схеми апарата.

11. Пат. 103838 Україна, МПК В 01 D 11/02 (2006.01). Вібраційний екстрактор періодичної дії з комбінованим енергопідведенням / Зав'ялов В. Л., Деканський В. Є., Попова Н. В., Мисюра Т. Г., Бодров В. С., Запорожець Ю. В. — № а 2012 08141; заявл. 03.07.12; опубл. 25.11.13, Бюл. № 22.

Особистий внесок: Формулювання ідеї патенту. Розроблення схеми апарата.

Патенти України на корисну модель

1. Пат. 45865 України на корисну модель, МПК В 01 D 11/02. Спосіб виробництва барвника харчового з червоного буряка / Ключко О. І., Попова Н. В., Бандуренко Г. М., Зав'ялов В. Л., Мисюра Т. Г. — № U 2009 06934; заявл. 02.07.09; опубл. 25.11.09, Бюл. № 22.

Особистий внесок: Обґрунтування схеми винаходу та теоретичних положень.

2. Пат. 14515 України на корисну модель, МПК В 01 D 11/02. Вібраційний екстрактор / Зав'ялов В. Л., Бодров В. С., Попова Н. В., Мисюра Т. Г. — № U 2005 11361; заявл. 30.11.05; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.

Особистий внесок: Формулювання ідеї патенту. Розроблення схеми апарата.

АНОТАЦІЯ

Зав'ялов В. Л. Наукове обґрунтування та апаратурне оформлення процесу віброекстрагування в харчовій промисловості. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 — процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. — Національний університет харчових технологій, Київ, 2014.

У дисертації вирішено науково-технічну проблему створення наукової бази проектування та вдосконалення віброекстракційних процесів та їх апаратурного оформлення у харчовій промисловості, яка забезпечує можливість визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів віброекстракторів та режимів їх експлуатації.

Обґрунтовано актуальність розроблення наукових основ для створення методів розрахунку раціональних режимних та конструктивних параметрів процесів періодичного та безперервного віброекстрагування із рослинної сировини в харчовій та інших галузях промисловості. Розроблено методологічну систему математичного моделювання процесу віброекстрагування, методи експериментального оцінювання ефективності масообміну та структури гідродинамічних потоків, заснованих на явищах нестационарного масообміну та гідродинаміки. Сформульовано результати досліджень закономірностей розповсюдження пульсуючих струменів, що генеруються елементами віброперемішувальних пристроїв, виконано їх масштабування на основі просторово-часових співвідношень.

Виконано аналіз структури потоків, протитечійного розділення фаз безперервного процесу, особливостей масоперенесення в умовах періодичного та безперервного процесів на всіх масштабних рівнях, з узагальненням кожного етапу досліджень у вигляді математичних моделей. Реалізація отриманих результатів дозволила розробити методіку інженерного розрахунку віброекстрагування в харчовій промисловості, високопродуктивні енергоощадні віброекстрактори періодичної та безперервної дії для системи тверде тіло-рідина з малою різницею густин фаз і на їх основі розробити апаратурно — технологічні схеми раціональної поглибленої переробки рослинної сировини для ряду галузей промисловості з їх економічним обґрунтуванням.

Ключові слова: віброекстрагування, математична модель, масштабування, гідродинаміка, структура потоків, масоперенесення, міжфазова взаємодія, конвективна дифузія, турбулентність, пульсуючий потік, розділення фаз, проектування.

АННОТАЦИЯ

Завьялов В.Л. Научное обоснование и аппаратурное оформление процесса виброэкстрагирования в пищевой промышленности. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 — процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. — Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2014.

В диссертации решена научно-техническая проблема создания научной базы проектирования и совершенствования виброэкстракционных процессов и их аппаратного оформления в пищевой промышленности, которая обеспечивает возможность определения рациональных конструктивно-технологических параметров виброэкстракторов и режимов их эксплуатации. Обоснована актуальность разработки научных основ периодического и непрерывного виброэкстрагирования из растительного сырья, широкое промышленное использование которого сдерживается сложностью и недостаточной изученностью гидродинамики и массообменных характеристик.

Обращая внимание на отсутствие глубоких теоретических и экспериментальных работ в области гидродинамики твердофазного виброэкстрагирования, дан анализ результатов исследований закономерностей распространения пульсирующих турбулентных потоков, генерируемых транспортировочными элементами виброэкстрактора в непроточной жидкой среде, и структуры рабочих потоков.

Результаты эксперимента во всем исследованном диапазоне гидродинамических режимов работы аппарата обобщены зависимостью, по которой становится возможным определять расстояние между виброперемешивающими устройствами, габариты аппарата, высоты установки разгрузочного устройства для отвода шрота, выбирать конструкцию транспортирующего открытого элемента тарелки и оптимизировать процесс твердофазного виброэкстрагирования, а также масштабировать процес.

С целью масштабирования виброэкстракционной аппаратуры выполнено исследование универсальных пространственно-временных гидродинамических характеристик пульсирующих потоков, генерируемых транспортирующими элементами вибротранспортирующих устройств. Установлена закономерность распространения стационарной затопленной и пульсирующей струй, а также установлено соотношение определяющих пространственно-временных характеристик в относительных величинах в виде профиля скоростей в сечении плоского турбулентного следа в соответствии с теорией Прандтля-Шлихтинга. Получены зависимости скоростных характеристик процесса от пространственных, необходимые при конструировании виброэкстракторов.

Выполнен анализ и разработана математическая модель структуры реальных потоков в виброэкстракторах непрерывного действия колонного типа на основе комбинированной модели для условий импульсного возмущения гидродинамической системы аппарата, а также комбинированных моделей. Математическое описание может быть взято за основу при решении оптимизационных задач с целью определения рациональных режимов работы виброэкстракторов, имеющих комбинированную структуру гидродинамических потоков и обеспечивающих необходимую производительность с минимальным эффектом продольного перемешивания. Установлено, что механические колебания транспортировочной системы с частотой до 4 Гц не создают существенного продольного перемешивания, а при малых амплитудах колебаний даже снижают его. Это позволяет эффективно использовать энергию механических колебаний для интенсификации массообмена и противоточного разделения фаз рабочей смеси. Установлена взаимосвязь определяющих геометрических параметров транспортировочных элементов с производительностью аппарата и уровнем продольного перемешивания.

Описан сложный механизм виброперемешивания в рабочем объеме аппарата с одновременной реализацией таких эффектов, как непрерывное интенсивное обновление поверхности контакта фаз во всех его сечениях по высоте аппарата и, как следствие, создание и поддержание длительного во времени максимального значения движущих сил массообмена. Для непрерывного процесса описан механизм противоточного разделения фаз, основанный на эффектах разницы гидравлического сопротивления при локализации факела суспензии на определенном расстоянии от источника колебаний, седиментации на поверх-

ности тарелки и фильтровании экстрагента через фильтрующие элементы.

Для обобщения результатов экспериментов предложена система функционально связанных координат, где в качестве функционального принимается время, в течение которого концентрация экстрагента изменится в e (основание натуральных логарифмов) раз, а в качестве пространственной единицы — расстояние, на котором функциональное время изменится в той же степени, то есть на порядок натуральных логарифмов. В таких координатах становится возможным быстро оценить уровень массообмена при экстрагировании.

Результаты математического моделирования внешнего массообмена при экстрагировании из растительного сырья в условиях нестационарного переноса вещества с учетом внешней диффузионной неравномерности можно использовать при конструировании и оптимизации другой экстракционной аппаратуры.

Для оценки эффективности конвективной диффузии экстракционной аппаратуры предложен новый экспериментальный экспресс-метод на основе растворения по диффузионному типу солей в жидкой среде, результаты которого учитывают только внешний массообмен. По полученным опытным данным установлена зависимость коэффициента массопередачи от эффективного критерия Рейнольдса, влияние на внешний массообмен турбулентных пульсирующих струй, генерируемых переточными элементами вибротранспортирующих устройств при непрерывном и периодическом экстрагировании.

Реализация полученных результатов позволила разработать методику инженерного расчета виброэкстрагирования в пищевой промышленности, высокопроизводительные энергосберегающие виброэкстракторы периодического и непрерывного действия для системы твердое тело — жидкость с малой разницей плотностей фаз и на их основе разработать аппаратурно-технологические схемы рациональной углубленной переработки растительного сырья для ряда отраслей промышленности с их экономическим обоснованием.

Ключевые слова: виброэкстрагирование, математическая модель, масштабирование, гидродинамика, структура потоков, массоперенос, межфазное взаимодействие, конвективная диффузия, турбулентность, пульсирующий поток, разделение фаз, проектирование.

ABSTRACT

Zavialov V. L. Scientific substantiation and apparatus design of vibroextraction process in the food industry. – A manuscript.

Thesis for Doctor of sciences (engineering) degree on a speciality 05.18.12 — Processes and the equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions. — National university of food technologies, Kiev, 2014.

The dissertation solves an important scientific and technical problem, namely – the development of scientific foundations for designing and improvements of vibroextraction processes and their technological implementation particularly in food industry. These scientific foundations allow to determine the optimal designing and technological parameters of vibroextracting units along with the optimal regimes of their operation. The importance of the development of such scientific methodology which helps to substantiate and implement the most rational calculation methods of operating and design parameters, applicable for the processes of periodic and continuous vibroextraction of herbal and plant raw materials in food and other adjacent industries, has been substantiated. Within the dissertation, the methodology of the mathematic modeling of vibroextraction processes along with the methodology of experimental evaluation of mass transfer efficiency, and evaluation of hydrodynamic structure have been developed. The proposed methodology has been designed based upon the phenomenon of unsteady mass transfer and hydrodynamics. The research results of spreading of flow patterns of pulsating jets that are generated by vibromixing elements within the volume of vibroextractor have been formulated. Scaling of the

formulated results based upon the spatiotemporal correlation has been analyzed: the structure of multiphase flows, countercurrent phase separation within a continuous process, mass transfer modes within the periodic and continuous processes within the whole scale. For each parameter a generalization has been carried out and thus included within the proposed mathematical model. Realized research results have formed the bases for the developed engineering calculation methods which is intended for carrying out design calculation vibroextraction applicable in food industry. The methodology allows creating highly productive energy saving vibroextractor of periodic and continuous action to be used for solid-liquid systems with insignificant difference of phase densities. Based upon the results above, the efficient technological equipment and schematics for food and adjacent industries have been created and their feasibility has been substantiated.

Keywords: vibroextraction, mathematical model, scaling, hydrodynamics structure flows, mass transfer, interfacial interaction convective diffusion, turbulence, pulsating flow, phase separation, design.