

*ЄРМАКОВ Петро Петрович*

**АВТОКОЛИВАЛЬНА МАСООБМІННА АПАРАТУРА  
ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Спеціальність 05.18.12 — процеси, машини та агрегати  
харчової промисловості

**АВТОРЕФЕРАТ ДИСЕРТАЦІЇ**  
на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Науковий консультант  
д.т.н., професор МАЛЕЖИК І. Ф.

AB 31.749  
ЛНБ України ім. В. Стефаника



00778517 (Z)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українському Державному хіміко-технологічному університеті.

Науковий консультант — д.т.н. професор **Малежик Іван Федорович**.

Офіційні опоненти — д.т.н., професор **Таран Віталій Михайлович**, д.х.н., професор **Гребенюк Володимир Дмитрович**, д.т.н., **Загородній Петро Павлович**.

Провідна організація — ДНВО «Спектр», Держхарчпрому України, м. Київ.

Захист відбудеться «22» *лютого* 1995 р.  
в *14* годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.068.17.04 в Українському Державному університеті харчових технологій за адресою: 252017, м. Київ, вул. Володимирська, 68, ауд. А-311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці університету.

Автореферат розісланий «19» *січня* 1995 р.

**Вчений секретар**  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук,  
доцент

**М. І. СОРОКОЛІТ**

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

AB - 31.11.75

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ, АКТУАЛЬНІСТЬ І СТУПІНЬ ДОСЛІДЖЕНОСТІ ТЕМАТИКИ ДИСЕРТАЦІЇ**

Вироблення в достатній кількості і високій якості продукції харчування, забезпечення екологічно чистого середовища, як передумови одержання екологічно чистих продуктів, мають забезпечити добробут народу. В харчовій промисловості широко використовується масообмінна апаратура, в якій здійснюються процеси ректифікації, абсорбції, десорбції, екстракції, розчинення і таке інше. Тому одним из основних напрямків рішення поставленої задачі постачання продукції харчування є удосконалення масообмінної апаратури, на яку припадає значна доля устаткування харчової промисловості і витрачається значна кількість матеріальних і енергетичних ресурсів. Розвиток харчової промисловості та суміжних галузей обумовлює збільшення кількості відходів забруднюючих навколишнє середовище. Значна частина екологічного обладнання для обеззаражування і утилізації відходів також припадає на масообмінну апаратуру. Тому широке розповсюдження масообмінних апаратів в харчових виробництвах та екологічній техніці обумовлює актуальність завдання подальшого підвищення ефективності масообмінних апаратів.

Фундаментальні дослідження гідродинаміки і масообміну, розглянуті в працях вітчизняних і іноземних вчених, покладені в основу створення сучасних конструкцій масообмінних апаратів. Для інтенсифікації масообмінних процесів знаходить застосування відомий метод накладення коливальних на контактуючі фази. В цьому випадку колювання сприяють турбулізації фази, відповідно, прискоренню масопереносу. Проте під впливом коливальних без оптимізації колювального процесу не завжди досягається значне прискорення масообмінного процесу і підвищення ефективності роботи обладнання. В більшості апаратура для створення коливальних при підводі зовнішньої енергії недов-

говічна, складна, енергоємна. Створення акустичних коливань в одному місці апарата не сприяє інтенсифікації процесу у всьому його об'ємі, тому що в гетерогенних середовищах з підвищенням частоти коливань відбувається їх швидке затухання.

Для підвищення ефективності роботи масообмінних апаратів доцільно використовувати автоколивання. Перспективність реалізації напрямку інтенсифікації масообмінного процесу за допомогою автоколивань полягає в наступному.

При використанні автоколивального обладнання можна створити численні центри генерації автоколивань в об'ємі контактуючих середовищ. Це дозволяє озвучити весь об'єм апарата. Організація процесу інтенсифікації досягається у всьому об'ємі апарата за допомогою довговічних, простих, нематеріалоемних і неенергоємних обладнань. Оптимізацію параметрів коливань можна проводити виходячи з принципу відповідності їх характеристикам лімітуючого рівня, визначаючого основний опір переносу маси речовини.

В літературі відсутні відомості про реалізацію напрямку інтенсифікації масообмінного процесу за допомогою автоколивань. Відповідно, постає задача створення методології застосування даного напрямку інтенсифікації. Тому комплексні теоретичні і експериментальні дослідження проблеми, розробка високоефективного автоколивального оснащення має актуальне наукове і народногосподарче значення. Вирішення поставлених задач виконувалось у відповідності з планом основних напрямків наукової діяльності на 1986—1994 роки кафедри хімічної та екологічної техніки УДХТУ, програми 0.21 ДКНТ СРСР з проблеми 0.10.08 етапу 29.02 і додаток № 70 до постанови № 555 від 30.10.1985 р.; постановою Президії АН УРСР від 11 червня 1986 р. № 243; тематичною карткою 0-666-89 на НД ОТР п/с Р-6761.

**Мета і основні завдання наукового дослідження.** Мета роботи полягає в розробці обладнання і створенні наукових методів його розрахунку, принципів конструювання та проектування високоефективної автоколивальної масообмінної апаратури, що забезпечує значну інтенсифікацію процесів, зниження матеріалоемності і енергоємності, збільшення продуктивності на якості продукції. В роботі вирішені такі задачі: обґрунтовано теоретично і підтверджено експериментально доцільність використання напрямку інтенсифікації масообмінних процесів за допомогою автоколивань; досліджені автоколивальні процеси в рідині і газі; теоретично і експериментально досліджені процеси перемішування в рідині та електрохімічні процеси; розроблені

методи розрахунку та конструювання нової автоколивальної апаратури для інтенсифікації масообмінних процесів.

**Теоретична і практична цінність дослідження та його наукова новизна.** Наукова новизна праці включає наступні позиції, котрі захищає автор. Обґрунтована методологія використання напрямку інтенсифікації і оптимізації масообмінного процесу за допомогою автоколивань і показана доцільність використання енергії потоку для створення автоколивань.

Розроблена дисипативна модель масопередачі і фізична модель, котра пояснює механізм впливу акустичних коливань на масопередачу. Вперше проведено системне теоретично-експериментальне дослідження впливу акустичних коливань на масопередачу; розроблена класифікація масообмінного обладнання з коливальними режимами взаємодії фаз. Проведені теоретичні і експериментальні дослідження конденсаційного способу створення автоколивань, а також виконаний аналіз бародинамічного кавітаційного процесу, бародинамічного об'ємного кипіння і розроблена методологія розрахунку кавітаційного пристрою.

Вперше виявлені основні закономірності протікання барботажного процесу при створенні автоколивань в газовому потоці за допомогою акустичних контактних пристроїв АКП.

Вперше досліджені особливості акустики і гідродинаміки АКП низького тиску; розроблена методика розрахунку АКП і фізична модель, пояснююча вперше виявлене явище зменшення гідравлічного опору при проходженні газу через АКП з кільцевою резонуючою порожниною. Розроблені параметрична модель перемішування, класифікація пристроїв для перемішування і методика досліджень процесу; обґрунтована оптимізація енергетичних витрат і геометричних параметрів змішувачів; виявлені основні закономірності процесу перемішування.

Розроблена математична модель процесу озонування води, алгоритмічне і програмне забезпечення розрахунку реактора озонування з АКП. Теоретично і експериментально досліджені масообмінні процеси електрохімічного очищення промислових середовищ в апаратах з автоколиваннями фаз.

На базі експериментально-теоретичних досліджень, розроблених методик і вирішення науково-прикладних задач здійснене теоретичне узагальнення і внесений вклад в вирішення народногосподарчої проблеми зі створення ефективних масообмінних пристроїв.

На основі одержаних результатів теоретичних та експериментальних досліджень закономірностей гідродинаміки та масопереносу в середовищах з автоколиваннями фаз запропоно-

вані розрахункові залежності з метою визначення режимних та конструктивних параметрів автоколивальної масообмінної апаратури харчових виробництв. Одержані співвідношення склали основу методів та методик розрахунку, котрі використані при удосконаленні та розробці нового технологічного обладнання харчової та суміжних галузей промисловості.

Розроблені і впроваджені конструкції з АКП на Дніпропетровському пивкомбінаті «Днепр» при насиченні безалкогольних напоїв диоксидом вуглецю. Продуктивність сатуратора була 6 м<sup>3</sup>/г. Для одержання харчової соди розроблена і впроваджена на Лисичанському содовому заводі бікарбонатна колона з дирчатими тарілками, в котрих розміщені нові АКП. Витрати газу в колоні — 4000 м<sup>3</sup>/г. Розроблена математична модель, методика і програма розрахунку, а також ряд нових конструкцій реакторів озонування питної води та промислових стоків продуктивністю від 0,5 до 3000 м<sup>3</sup>/г по воді. В конструкціях реакторів використані АКП. Реактори впроваджені на багатьох підприємствах України та Росії. Аналоги реакторів за кордоном відсутні. Для Губиницького цукрового заводу розроблені нові конструкції сатуратора і сульфідатора з автоколивальними режимами взаємодії фаз. Для електрообробки цукрового соку та промислової стічної води розроблені конструкції електрохімічних апаратів з автоколиваннями фаз. Розробки передані в НПО «Цукор», п/с М-5612 та на ряд інших заводів.

Розрахунковий еколого-економічний ефект від практичної реалізації наукових розробок складає більш ніж 253 млрд карбованців.

Одержані в дисертації результати використані в начальному процесі при читанні курсів «мишини та апарати хімічних виробництв», «основи розрахунку та конструювання хімічного обладнання», «перемішування», «фізико-хімія гетерогених систем», «екологічна техніка».

Рівень реалізації впровадження наукових розробок підтверджується розробкою нової автоколивальної апаратури на яку одержано 29 авторських свідоцтв.

**Апробація та публікація результатів наукових досліджень.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на таких конференціях, семінарах, нарадах: III Всесоюзній конференції «Современные машины и аппараты химических производств», м. Ташкент, 1983 р.; II Всесоюзній нараді «Абсорбция газов», м. Гродно, 1983 р.; VII Всесоюзній конференції по тепломасообміну, м. Мінськ, 1984 р.; Всесоюзній науково-технічній нараді «Создание и внедрение

химического оборудования с использованием физических методов интенсификации технологических процессов», м. Полтава, 1984 р.; Всесоюзній науковій конференції «ПАХТ-85», м. Харків, 1985 р.; I, II та III Всесоюзних науково-технічних конференціях «Реахимтехника», м. Дніпропетровськ, 1982 р., 1985 р., 1989 р.; Всесоюзній конференції в м. Красноярську, 1986 р.; III Всесоюзній нараді «Абсорбция газов», м. Талін, 1987 р.; Всесоюзній нараді «Тепломассообменное оборудование-88», м. Москва, 1988 р.; II Всесоюзній науковій конференції «Основные направления совершенствования и создания нового оборудования для медицинской и микробиологической промышленности», м. Иркутськ, 1988 р.; VII Всесоюзній конференції по ПАВ в м. Шебекино, 1988 р.; Зональному семінарі в м. Пенза, 1988 р.; VII Республіканській конференції по процесам та апаратам в м. Львові, 1988 р.; конференції в м. Кірові, 1986 р.; науково-технічній конференції в м. Іжевську, 1988 р.; Республіканській і науково-технічній конференції в м. Дніпропетровську, 1987 р.; Республіканській науково-технічній конференції «Интенсификация технологии и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК», м. Київ, 1989 р.; Всесоюзній науково-технічній конференції в м. Тамбові, 1989 р.; у Міжнародному семінарі «Mieszanie», м. Лодзь, Польща, 1989 р.; зональній конференції по очістці води в м. Пенза, 1990 р.

Основний зміст дисертації опубліковано в 93 друкованих працях, в тому числі одержано 29 авторських свідоцтв. Розробки відмічені двома медалями ВДНГ СРСР та премією ВХО ім. Д. І. Менделєєва у Всесоюзному конкурсі.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, 9 глав, основних висновків, списку літератури і додатку. Робота викладена на 238 сторінках основного тексту, має 95 малюнків, 15 таблиць, 272 літературних джерел.

**Особистий внесок автора у розробку наукових результатів, що виносяться на захист** полягає в тому, що всі теоретичні дослідження проведені автором особисто. Результати досліджень, виконані в співавторстві, одержані за участю автора на всіх етапах роботи. Автору належать наукові ідеї та формулювання проблеми дослідження, формулювання та довід теоретичних положень, постановка задачі, інтерпретація результатів та розробка рекомендацій.

**Характеристика методології, методу дослідження предмету і об'єкта.** Вірогідність досліджень обумовлена коректністю постановки теоретичних задач, застосуванням для їх вирішення математично обґрунтованих методів, проведенням статистичної

обробки великих масивів результатів досліджень, відтворенням виявлених закономірностей на всіх досліджених об'єктах та в умовах промислового виробництва. Теоретичні положення, розроблені фізичні та математичні моделі процесів підтверджені експериментальними дослідженнями, які проводились з допомогою електрхімічних, хімічних та фізичних методів, а також лазерного сканування. Об'єктами досліджень були процеси масообміна, автоколивань в рідині та газі, перемішування, впливу автоколивань на масообмін, електрохімічного очищення рідини. Вивчались гідродинамічні характеристики процесів, проводилось математичне моделювання.

## ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Масообмінні апарати з коливальними режимами взаємодії фаз

Базуючись на аналізі відомих теоретичних та експериментальних дослідженнях масообмінного процесу, зроблений висновок про необхідність поглиблення уявлень про вплив коливань на масообмінний процес.

Коливальні режими взаємодії фаз сприяють суттєвій інтенсифікації процесу в масообмінних апаратах. Однак мала кількість експериментальних досліджень нових типів апаратів з коливальними режимами взаємодії фаз не дозволяє провести порівняльний аналіз ефективності та інтенсивності апаратів. Існуючі теорії масообміну тільки частково пояснюють фізичну суть впливу коливань на масообмін і не дозволяють розрахувати кінетичні характеристики масопередачі.

Для розрахунку оптимальних параметрів коливань, за допомогою яких інтенсифікується процес, доцільно слідувати принципу відповідності. В цьому разі основний опір масопереносу можна ефективно зменшити при одержанні, наприклад, коливань з амплітудою, порівняльно відносно розміру об'єкта впливу, на котрий припадає основний опір. В таких умовах період коливань, визначає швидкість протікання процесу. Для інтенсифікації процесу в тонкому шарі корисно одержувати коливання, які викликають малі, збудження в граничному шарі міжфазної поверхні.

На основі системного підходу розроблена класифікація та виконаний аналіз масообмінної апаратури з коливальними режимами взаємодії фаз. За класифікаційні ознаки взяті спосіб організації коливань, змінні параметри, частота коливань, масштаб рівня взаємодії, об'єкт дії. Розроблені нові конструк-

ції масообмінних апаратів, маючих знижений гідравлічний опір і забезпечуючих інтенсивну взаємодію фаз при коливальному режимі їх контактування. Розроблені нові статичні акустичні низьконапорні контактні пристрої для масообмінних процесів. Показано, що збільшення ефективності масообмінного процесу з використанням коливань доцільно проводити при створенні автоколивань за допомогою яких прискорюється процес при суттєвому його конструктивному спрощенні і зменшенні енергетичних затрат.

## 2. Аналітичні та експериментальні дослідження автоколивальних процесів

За допомогою автоколивальних пристроїв можна суттєво збільшити ефективність проведення масообмінного процесу за рахунок зменшення енерговитрат, збільшення інтенсивності процесу, спрощення та збільшення надійності і довговічності масообмінної апаратури. Фундаментальні основи автоколивальних процесів викладені в працях А. А. Андропова, Д. І. Блохінцева, А. С. Гіневського, Г. А. Дрейцера, Е. К. Калініна, А. Г. Муніна, Е. Я. Юдіна, Т. Кармана, М. Лайтхілла, Г. Ліллі, М. Міда, А. Пауела, П. Річардса, Н. Рубаха, Д. Релея, В. Струхала, О. Філіпса, М. Хоу та інших вчених.

Розроблена на основі аналізу дисіпації енергії та способів перетворення енергії класифікація способів утворення коливань і був зроблений аналіз їх практичного застосування при інтенсифікації масообмінних процесів. Досліджені акустичні параметри і гідравлічний опір нових акустичних випромінювачів з кільцевою резонуючою порожниною (мал. 1). Експериментально встановлено, що при резонансі інтенсивність коливань акустичних випромінювачів пропорціональна швидкості газу в отворі в четвертій степені (похибка не перевищувала  $\pm 4\%$ ). Одержана аналітична залежність для визначення коефіцієнта Струхала, що добре погоджується (похибка не перевищувала  $\pm 6\%$ ) з експериментальними результатами досліджень акустичних випромінювачів з кільцевою резонуючою порожниною. Вперше виявлено невідоме раніше явище істотного зменшення гідравлічного опору акустичного випромінювача при  $h_y(D_p = 0,5 \dots 2$ ) (мал. 2) і дано таке пояснення цьому явищу. Автоколивання в резонуючій порожнині сприяють локальній зміні вектора швидкості потоку на периферії струмені, що порушує порядок розположення вихорів по відношенню до напрямку руху основного потоку і, очевидно, порушує їх стійкість і сприяє

припиненню їх росту і, відповідно, зменшує затрати енергії на вихорестворення. Останнє сприяє зменшенню коефіцієнта гідравлічного опору випромінювача. Одержані формули для визначення коефіцієнта гідравлічного опору і частоти автоколивачів акустичних випромінювачів. Розроблена методика розрахунку акустичних випромінювачів, яку доцільно використовувати при конструюванні і розрахунку акустичних контактних пристроїв з автоколиваннями газового потоку.

Виконано аналітичне дослідження автоколивального процесу конденсації пару на поверхні сфери, котра коливається біля розділу фаз у края затопленої парової труби і одержана залежність для розрахунку максимального звукового тиску в рідині

$$P_{max} = \frac{\Delta(FK)_{max} \Delta TRTC_w}{(Z + C_{\Delta T}) VM} \sqrt{\frac{2\rho}{\mu \omega^3}} \quad , (1)$$

де  $\Delta T$  — різниця температур між паром і рідиною, К.

Розроблена методика проведення і використання експериментального дослідження конденсаційного способу створення автоколивачів, котрі доказали адекватність математичного опису (1). Визначені оптимальні режими проведення процесу. Максимальна інтенсивність акустичних коливань відповідала частотам біля 1 кГц.

Виконаний аналіз автоколивального бародинамічного кавітаційного процесу та розроблена методологія розрахунку кавітаційних пристроїв. В статичному кавітаційному пристрої кавітаційний процес можливий при швидкості рідини більше

$$W > \sqrt{2(P_1 + 4\sigma/d - P_H)/\rho + W_1^2} \quad , (2)$$

де  $P_1$  — тиск рідини до кавітаційної зони, Па;  $d$  — розмір твердих частин або бульок рідини, м;  $P_H$  — тиск насиченої пари рідини в зоні кавітації, Па;  $W_1$  — швидкість рідини до кавітаційної зони, м/с.

Процес бародинамічного об'ємного кипіння проходить при різкому падінні тиску, що призводить до інтенсивного паротворення в усьому об'ємі рідини. Наведений аналіз бародинамічного об'ємного кипіння і загальні математичні залежності, що характеризують процес об'ємного кипіння. Одержана залежність для визначення об'єму парової фази, котра необхідна для розрахунку потужності коливань.

$$V_G = V_L \frac{\rho_L C_L}{\rho_{G2} z_2} \left( T_1 \left( 1 - \frac{\rho_{G1}}{\rho_{G2}} \right) + \frac{4G M}{\rho_{L2} R d} \right) \quad (2)$$

де індекси 1 і 2 характеризують систему в крайніх положеннях.

Одержані аналітичні залежності розрахунку режиму псевдорозрідження насадки, як автоколивального процесу, з урахуванням гідродинаміки процесу, властивостей середовища і форми насадки.

### 3. Аналіз процесу перемішування і удосконалення конструкцій автоколивальних перемішувачів

Швидкість масообмінного процесу безпосередньо залежить від швидкості процесу перемішування. Але за допомогою відомих характеристик процесу перемішування важко дати його повну картину в статичній і динамічній. З цією метою розроблена параметрична модель перемішування. Аналіз процесу зроблений шляхом вивчення зміни лінійного параметру  $l$  перемішування. Прийняті статичні і динамічні характеристики процесу.

$$J = 1 - \frac{l}{l_0} \quad (4) \quad \theta = \frac{dl}{d\tau} \quad (5) \quad \theta_v = \frac{dJ}{d\tau} \quad (6)$$

де  $J$  — ступінь перемішування;  $\theta$  — коефіцієнт перемішування, м/с;  $\theta_v$  — об'ємний коефіцієнт перемішування,  $s^{-1}$   $l_0$  — початкове значення параметра, м.

При рішенні рівняння нестационарної дифузії одержана залежність для визначення часу перемішування розчинених рідин

$$\tau = A \sqrt{\frac{M}{E}} \ln \left( 1 + \frac{l_0 - l}{l - l_{min} + 1,1 A (D \sqrt{M/E} / \alpha)^{0,5}} \right) \quad (7)$$

де  $l_{min}$  — мінімальне значення параметра перемішування, м;  $\alpha$ ,  $A$  — коефіцієнти.

Рішенням рівняння руху вільної поверхні рідини при акустичному опроміюванні одержана залежність товщини граничного рідинного шару повного перемішування від акустичних параметрів та фізичних властивостей рідини

$$\gamma = \frac{P_a}{\sqrt{2} \rho_L \mu \omega^3}, \quad (8)$$

де  $P_a$  — максимальна амплітуда звукового тиску. Па.

Формула (8) використана при виводі розрахункової залежності для визначення коефіцієнта масовідачі в рідинній фазі при дії на процес акустичних коливань.

Розроблена нова методика дослідження процесу перемішування в статичному змішувачі та апараті з мішалкою. При макроперемішуванні, коли нехтуємо молекулярною дифузією, за допомогою розробленої методики можна одержати чисельне значення коефіцієнта  $A$ .

На основі аналізу режиму роботи, об'єкта дії, виду енергії для перемішування та механізму змішування розроблена класифікація пристроїв для перемішування. Приведені розроблені нові конструкції автоколивальних пристроїв для перемішування.

В результаті аналізу наведених витрат одержана аналітична залежність для оптимізації енергетичних витрат в змішувачах. При оптимізації враховувались амортизаційні відшкодування, поточні та енергетичні витрати, заробітна платня, швидкість масообмінного процесу.

#### 4. Аналітичні і експериментальні дослідження гідродинамічних процесів в апаратах з автоколиваннями фаз

Показано, що автоколивання газового потоку АГП впливають на гідродинаміку барботажного шару. У результаті дослідження барботажу газу методом лазерного сканування підтверджене відоме положення про те, що при спливанні спостерігається деформування поверхні і розпад бульбашок, АГП сприяють зміненню щільності розподілу барботажних бульбашок і зростанню швидкості їх створювання, відтак не змінюють частоту відриву бульбашок. Підтверджено, що при проходженні газу крізь отвір діаметром до 5 мм зі швидкістю до 120 м/с, відсутня їх струминна течія.

Клапанні АКП сприяють виникненню АГП, інтенсивність

яких більше на 1—2 порядки перевищує фонову. Внаслідок зменшення витрат енергії на вихротоворення і її перерозподіл, АГП не проявляють суттєвого впливу на гідравлічний опір тарілок з АКП. АГП при швидкості газу по колоні менше 0,3 м/с сприяють збільшенню газоутримання на тарілці. Показано, що АГП несуттєво зменшують поздовжнє перемішування по висоті секцій колонного апарату з клапанами АКП.

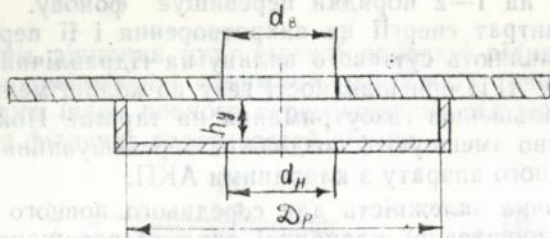
Математична залежність для середнього повного гідравлічного опору зрошуваної клапанної тарілки одержана з врахуванням пульсуючого проходження газу через отвори. З аналізу залежності випливає, що при пульсуючому проходженні газу місцевий гідравлічний опір контактного пристрою в 1,5 рази більше при барботажі, ніж без зрошення, коли газ проходить з постійною швидкістю.

Виявлені основні закономірності процесу перемішування в статичних змішувачах. Потверджені експериментально одержані аналітичні залежності. Параметр перемішування (мал. 3) і швидкість перемішування зменшуються з часом та по довжині змішувача по експонентній залежності. Визначені оптимальні співвідношення розмірів внутрішніх пристроїв статичних змішувачів з поперечними перфорованими перегородками. Розрахунок процесу перемішування можна виконувати по залежностях, одержаних з параметричної моделі перемішування. Отримані чисельні значення коефіцієнта А (мал. 4) для змішувачів, в котрих діаметр отвору в перегородках змінюється в межах  $d=1...20$  мм, а відстань між перегородками  $a=0,04...0,2$  м. Установлено, що для отримання високої швидкості процесу перемішування треба зменшувати розмір вихротоворень по ходу потоку, тобто збільшувати дисипацію енергії.

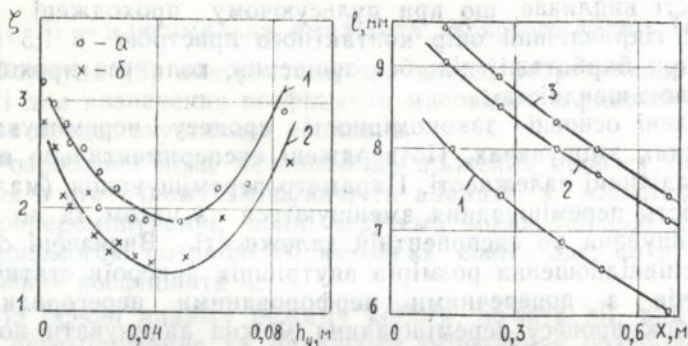
При аналізі енергетичних витрат одержана математична залежність для розрахунку діаметра крапель емульсії і зроблена її експериментальна перевірка. Ефективність процесу одержання тонкодисперсної емульсії можливо збільшити шляхом утворення режиму послідовного збільшення дисипації енергії по ходу потоку.

## 5. Аналітичні дослідження процесу масопередачі з автоколиваннями фаз

До автоколивальних процесів відноситься барботажний процес, при якому на тарілці утворюються низькочастотні коливання, обумовлені проходженням газу через отвори тарілки в пульсуючій режимі.



Малюнок 1. Поздовжній розріз акустичного випромінювача.



Малюнок 2. Залежність коефіцієнта гідравлічного опору  $\zeta$  від  $h_y$  акустичного випромінювача при  $W_0$ , м/с: а—9,5; б—28,5. Суцільна лінія — розрахункова.

Малюнок 3. Залежність змінення параметра  $l$  по довжині статичного змішувача з сітчастими перегородками при швидкості рідини  $W$ , м/с: 1 — 0,25; 2 — 0,19; 3 — 0,13. Суцільна лінія — розрахункова.

Одержана аналітична залежність для визначення об'ємного коефіцієнту масовіддачі на непроточній барботажній тарілці

$$\beta a = 2,4 \Delta D^{0,5} g^{0,75} (\rho_L - \rho_G)^{0,75} \varphi^{0,5} \sigma^{-0,75} W_K^{0,5}, \quad (9)$$

де  $a$  — коефіцієнт.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при  $0,066 < h_0 < 0,132$  м величина  $a$  в формулі (9) визначається залежністю

$$a = \sqrt{1 - \frac{0,238}{h_0^{0,386}}} \quad (10)$$

Збільшити ефективність роботи барботажних тарільчатих апаратів можливо шляхом створення високочастотних автоколивань газового потоку в місці створення бульок. При розрахунку об'ємного коефіцієнту масовіддачі  $(\beta a)_a$  клапанних тарілок, в випадку з накладенням АГП, прийнято допущення про те, що переміщення одної акустичної хвилі збурення сприяє оновленню поверхні контакту фаз нижньої периферійної зони тороїдальної поверхні створеної бульки. Припускаючи, що інтенсивність АГП має значення вище порогового в другому і третьому періоді пульсуючого проходження газу під клапаном, одержимо

$$(\beta a)_a = 2,4 \sqrt[4]{\frac{\alpha^2 W_k^2 \alpha^2 g^3 (\rho_L - \rho_G)^3 \varphi_a^2}{\sigma^3}} \left[ 1 + 0,3 \frac{d_{\max}}{H} \sqrt{\frac{\varphi_a f d_k}{\alpha W_k}} \right], \quad (11)$$

де  $\varphi_a$  — газоутримання при накладенні АГП;  $d_{\max}$  — максимальний діаметр бульки, м;  $d_k$  — капілярна постійна, м;  $f$  — основна гармоніка АГП,  $c^{-1}$ .

Зростання об'ємного коефіцієнту масовіддачі на барботажних клапанних тарілках з накладенням АГП буде

$$\frac{(\beta a)_a}{\beta a} = \sqrt{\frac{\varphi_a}{\varphi}} + 0,3 \frac{d_{\max}}{H} \sqrt{\frac{\varphi_a^2 f d_k}{\alpha W_k \varphi}} \quad (12)$$

Розроблена дисипативна модель масопередачі. Модель розроблена на основі аналізу енергетичних витрат на перемішування потоку, що сприяють турбулізації вихорів, оновлюючих поверхню контакту фаз. Відповідно моделі коефіцієнт масовіддачі буде

$$\beta = \alpha \sqrt{D} \sqrt{\frac{E}{\mu}} \quad (13)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт.

В граничному шарі рідини глибиною  $Z$ , на яку припадає основний опір масопереносу, суттєве прискорення масовіддачі, очевидно, буде спостерігатись тільки на товщину  $u$ , де акустичні коливання сприяють оновленню поверхні контакту фаз частотою  $f_a$ , рівній частоті акустичних коливань. Товщину шару  $u$  можливо визначити для вільної поверхні рідини з (8). Коефіцієнт масовіддачі  $\beta a$  під впливом акустичних коливань буде

$$\beta_a = \beta \left[ 1 + \frac{\alpha \tau}{\alpha} \sqrt{f_a \sqrt{\frac{\mu}{E}} \cdot \frac{y}{Z}} \right], \quad (14)$$

де  $\alpha \tau$  — теоретичне значення коефіцієнта.

Так як основний опір масопереносу припадає на шар товщиною  $Z$ , то збільшення інтенсивності акустичних коливань для випадку  $y > Z$ , очевидно, не приведе до подальшого суттєвого росту  $\beta$ . З аналізу моделі випливає, що при заданій  $E$  оптимальне значення акустичних параметрів забезпечується умовою

$$y = Z \quad (15); \quad f_a = \frac{2}{\alpha \sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{\mu}} \quad (16)$$

Завдяки швидкому затуханню коливань в гетерогенному середовищі доцільно створювати багаточислені центри генерації акустичних коливань. З врахуванням жорстких умов роботи масообмінного обладнання в апараті акустичні коливання доцільно створювати з допомогою АКП, наприклад, з кільцевою резонуючою порожниною. Розроблені конструкції і методика розрахунку АКП, що призначені для інтенсифікації масопередачі при барботажі газу.

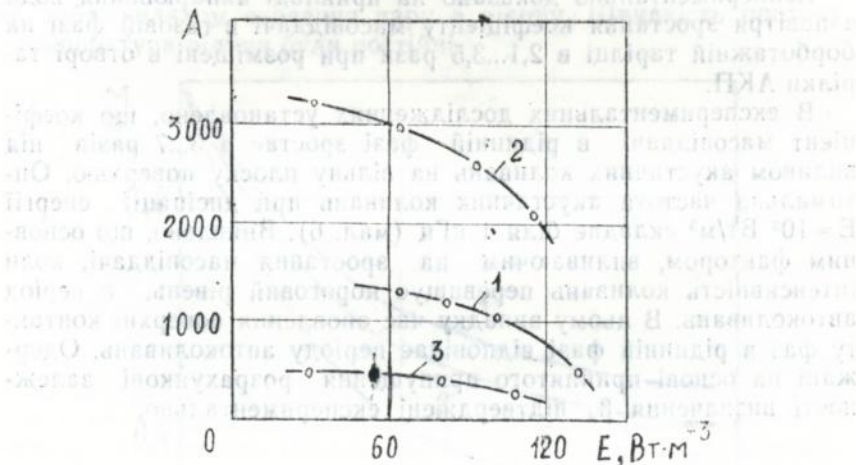
Виконана оптимізація енергетичних витрат. При аналізі наведених витрат одержана залежність для розрахунку оптимальної дисипації енергії при проведенні масообмінного процесу.

Наведені залежності для розрахунку параметрів акустичних коливань при інтенсифікації масообмінного процесу в системі рідина — тверде тіло.

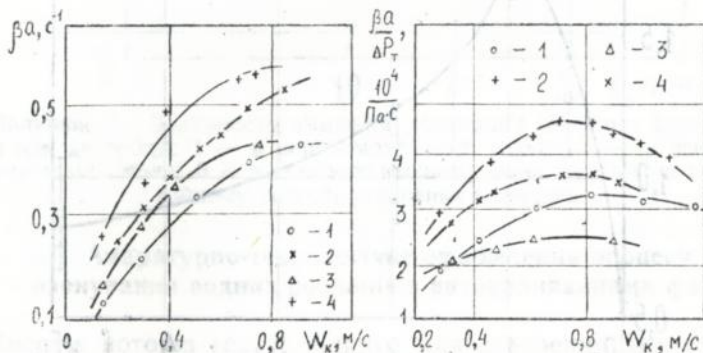
## 6. Експериментальні дослідження процесу масопередачі з автоколиваннями фаз

При проведенні експериментальних досліджень, коли основний опір припадає на рідинну фазу, встановлено, що АГП в місці входу газу в рідину при барботажі сприяє зростанню коефіцієнта масопередачі. Для всіх типів вивчених тарілок відношення  $(\beta_a)_a / \beta_a$  при зростанні швидкості газу по колоні від 0,2 до 1,6 м/с складало 1,6...1,2 (мал. 5а). Відхилення експериментальних значень  $\beta_a$  від розрахованих з формули 11 не перебільшувало  $\pm 15\%$ . Залежність  $\beta_a / \Delta P_T$  від швидкості газу  $W_k$

(мал. 56) для всіх типів тарілок мають чітко виражений максимум, відповідаючий швидкості  $W_K=0,5...1$  м/с. Так як АГП суттєво не змінюють гідравлічний опір тарілок, значення  $(\beta a)_a / \Delta P_T$  виявилось, відповідно, вище, ніж  $\beta a / \Delta P_T$  для однотипних тарілок. Установлено, що матеріал резонуючих порожнин не впливає суттєво на процес.



Малюнок 4. Залежність зміння коефіцієнта А від дисипації Е для статичних змішувачів: 1 —  $d=20$  мм,  $a=0,2$  м; 2 —  $d=1$  мм,  $a=0,15$  м; 3 —  $d=1$  мм,  $a=0,04$  м.

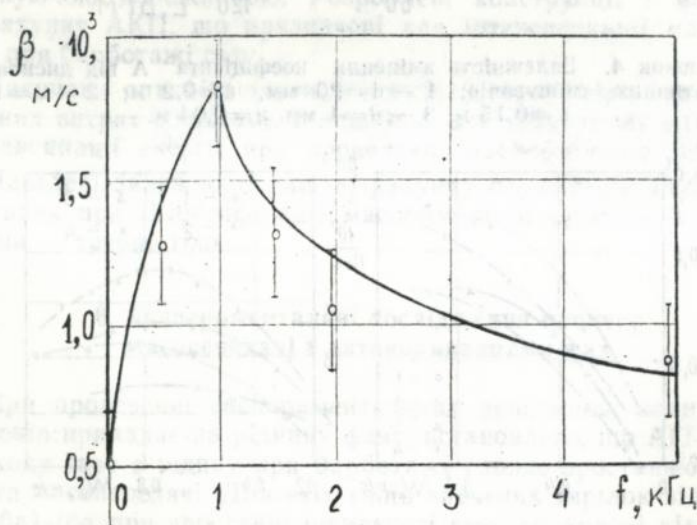


Малюнок 5. Залежність: а —  $\beta a$  від  $W_K$ ; б —  $\beta a / \Delta P_T$  від  $W_K$ ; 1,2 —  $h_0=0,066$  м; 3,4 —  $h_0=0,132$  м; 1,3 — клапанні тарілки без АКП; 2,4 — 3 АКП.

Показано, що зі зростанням швидкості газу по колоні відношення  $(\beta_a)_a/\beta_a$  зменшується, тому що на об'ємний коефіцієнт масовіддачі впливає зменшення  $\varphi_a/\varphi$ . Об'ємний коефіцієнт масовіддачі зростає в більшій степені при розміщенні резонуючої порожнини в тарільці, ніж в клапані через який проходить тільки частина газового потоку.

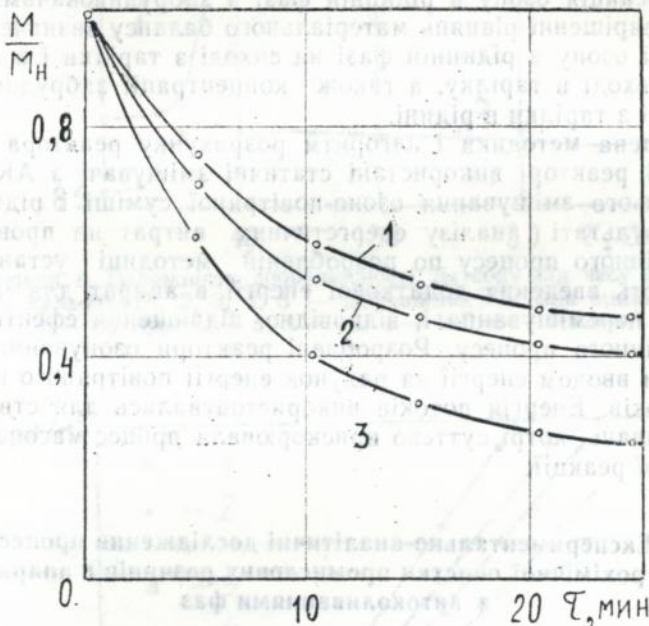
Експериментально доказано на прикладі випарювання води в повітря зростання коефіцієнту масовіддачі в газовій фазі на борботажній тарільці в 2,1...3,5 рази при розміщенні в отворі тарілки АКП.

В експериментальних дослідженнях установлено, що коефіцієнт масовіддачі в рідинній фазі зростає в 3...7 разів під впливом акустичних коливань на вільну плоску поверхню. Оптимальна частота акустичних коливань при дисіпації енергії  $E = 10^3$  Вт/м<sup>3</sup> складає біля 1 кГц (мал. 6). Виявлено, що основним фактором, впливаючим на зростання масовіддачі, коли інтенсивність коливань перевищує пороговий рівень, є період автоколивань. В цьому випадку час оновлення поверхні контакту фаз в рідинній фазі відповідає періоду автоколивань. Одержані на основі прийнятого припущення розрахункові залежності визначення  $\beta_a$  підтверджені експериментально.



Малюнок 6. Залежність  $\beta$  в рідинній фазі від частоти акустичних коливань при їх постійній інтенсивності в апараті з мішалкою. Суцільна лінія — залежність розрахована по (14).

Акустичні коливання суттєво впливають на масоперенос в системі рідина — тверде тіло. Виявлено, що десорбція нікелю з поверхні іонообмінної смоли КУ-2-8 змінюється і ступінь очистки смоли складала (мал. 7): при стаціонарному режимі — 54%, при псевдозрідженні смоли — 62%, при псевдозрідженні смоли і накладення акустичних коливань — 76%. Акустичні коливання створювались за допомогою конденсаційного способу, тобто шляхом введення пару в рідину. Швидкість потоку і температура рідини були постійні.



Малюнок 7. Залежність змінення утримання нікелю в іонообмінній смоли при десорбції: 1 — в нерухомому шарі смоли; 2 — в псевдооживленому шарі смоли; 3 — в псевдооживленому шарі смоли при конденсаційному способі утворення коливань.

### 7. Апаратно-технологічне оформлення процесу озонування водних розчинів з автоколиваннями фаз

Енергія потоків газу і рідини для створення автоколивань в системі використана при проведенні процесу озонування стічних вод та питної води. При вивченні літературних даних і проведенні експериментальних досліджень визначені особливості озонування водних розчинів і показана доцільність використан-

ня озонування для вирішення екологічних проблем питної і сточної води.

Розроблені більше десятка конструкцій реакторів озонування з АКП, котрі можуть працювати в широкому діапазоні зміни навантаження по газу і рідині. Конструкції реакторів озонування виконані блочного типу і являють собою колонні апарати, секціоновані тарілками.

Запропонована математична модель процесу озонування, в якій враховується процес розпаду озону в газовій і рідинній фазах, реакція озону в рідинній фазі з забруднювачами.

При вирішенні рівнянь матеріального балансу визначені концентрації озону в рідинній фазі на виході з тарілки і в газовій фазі на вході в тарілку, а також концентрації забруднювачів на виході з тарілки в рідині.

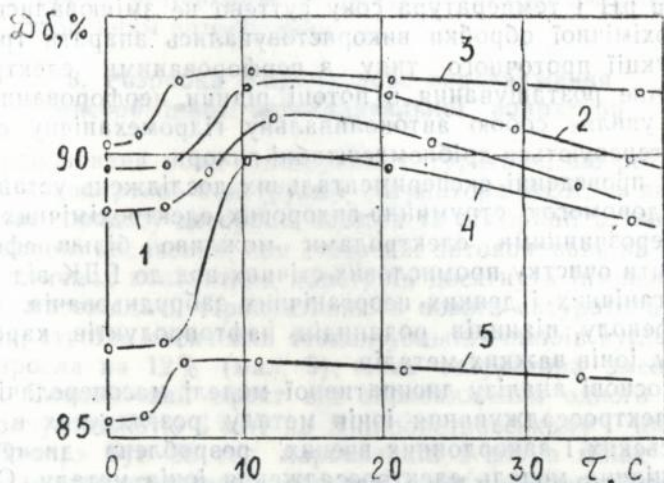
Наведена методика і алгоритм розрахунку реактора озонування. В реакторі використані статичні змішувачі з АКП для попереднього змішування озono-повітряної суміші і рідини.

В результаті аналізу енергетичних витрат на проведення масообмінного процесу по розробленій методиці встановлена доцільність введення додаткової енергії в апарат для інтенсифікації перемішування і, відповідно, підвищення ефективності масообмінного процесу. Розроблені реактори озонування з додатковим вводом енергії за рахунок енергії повітряного і рідинних потоків. Енергія потоків використовувалась для створення автоколівань, котрі суттєво прискорювали процес масопереносу і хімічної реакції.

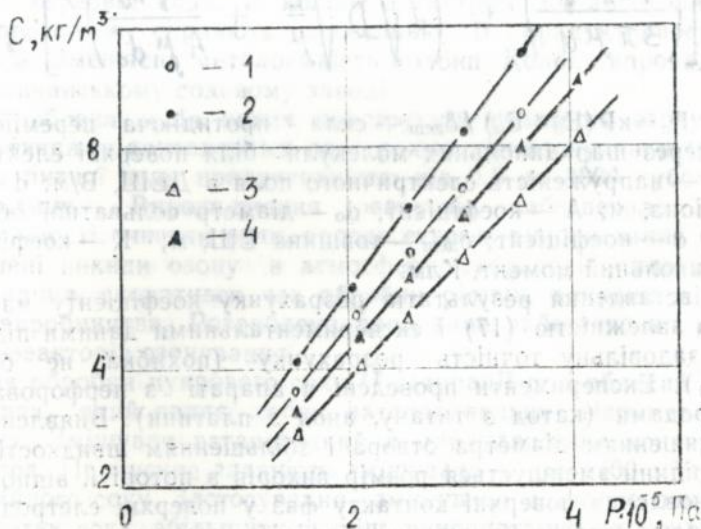
## **8. Експериментально-аналітичні дослідження процесу електрохімічної очистки промислових розчинів в апаратах з автоколіваннями фаз**

Електрохімічна очистка розчинів, в тому числі цукрових, суттєво залежить від перемішування рідини у поверхні електрода. Показана доцільність інтенсифікації процесу перемішування у поверхні електрода шляхом створення дрібномасштабних вихорів в потоці рідини. З цією метою розроблені ряд нових конструкцій електрохімічних апаратів з автоколіваннями фаз.

Досліджений вплив електрохімічної обробки на властивості бурякоцукрового соку (мал. 8) Губиннихського цукрозаводу. Визначені оптимальні параметри електрохімічної очистки. Показано, що витрати електричної енергії і час обробки бурякоцукрового соку в апаратах запропонованої конструкції на порядок менше, ніж в апаратах відомих конструкцій. Під час



Малюнок 8. Залежність доброякісності  $D_6$  соку від часу ЕХО: 1 — сік після сульфатації; 2, 3, 4, 5 — дифузійний сік; при щільності тока: 1 — 60 А/м<sup>2</sup>; 2 — 5; 3 — 18; 4 — 190; 5 — 70 А/м<sup>2</sup>.



Малюнок 9. Залежність концентрації  $C$  діоксида вуглецю на виході з сатуратору від тиску  $P$ : 1,2 — при температурі 5°C; 3,4 — 10°C; 1,3 — в сатураторі АСК; 2,4 — в сатураторі з АКП.

обробки рН і температура соку суттєво не змінювались. Для електрохімічної обробки використовувались апарати трубчатої конструкції проточного типу з перфорованими електродами. Поперечне розташування в потоці рідини перфорованих електродів уявляє собою автоколивальну гідромеханічну систему, в якій генеруються дрібномасштабні вихори.

При проведенні експериментальних досліджень установлено, що за допомогою струмінно-вихорових електрохімічних апаратів з нерозчинними електродами можливо більш ефективно проводити очистку промислових стічних вод до ГДК від розчинних органічних і деяких неорганічних забруднювачів, в тому числі фенолу, ціанідів, роданидів, нафтопродуктів, карбамиду, аніліну, іонів важких металів.

На основі аналізу дисипативної моделі масопередачі і процесу електроосадження іонів металу, розглянутих в працях українських і закордонних вчених, розроблена дисипативно-адсорбційна модель електроосадження іонів металу. Одержана аналітична залежність для розрахунку коефіцієнта масовіддачі  $\beta$  осаждения іонів на поверхні електроду.

$$\beta = \left[ \left( \frac{q E_n - F_n}{3\pi \mu d} \right)^{-1} + \left( \alpha \sqrt{D} \sqrt{\frac{E}{\mu}} + \frac{q E_v}{A \mu d_0} \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (17)$$

де  $F_n = kP(E_n - E_u) / \delta_{деш}$  — сила протидіюча переміщенню іона через шар дипольних молекул біля поверхні електроду, Н;  $E_n$  — напруженість електричного поля в ДЕШ, В/м;  $d$  — діаметр іона, м;  $A$  — коефіцієнт;  $d_0$  — діаметр сольватної оболонки, м;  $\alpha$  — коефіцієнт;  $\delta_{деш}$  — товщина ЕШ, м;  $K$  — коефіцієнт;  $P$  — дипольний момент, Клм.

Співставлення результатів розрахунку коефіцієнту масовіддачі з залежністю (17) і експериментальними даними підтвердило задовільну точність розрахунку (похибка не більше  $\pm 11\%$ ). Експерименти проведені в апараті з перфорованими електродами (катод з титану, анод з платини). Виявлено, що зі зменшенням діаметра отвора і збільшенням швидкості потоку рідини зменшується розмір вихорів в потоці і, відповідно, час оновлення поверхні контакту фаз у поверхні електроду, що обумовлює суттєве збільшення коефіцієнта масовіддачі.

Запропонована технологічна схема маловідходної технології промивки деталей гальванічних виробництв. Розроблена математична модель і алгоритм процесу промивку по безсточній

схеми, а також методологія розрахунку електрохімічного апарату зі створенням автоколивань.

## **9. Розробка і промислове впровадження масообмінної автоколивальної апаратури**

Запропонована нова конструкція сатуратора, що розроблена на базі стандартної конструкції сатуратора АСК, в якій, при поєднанні процесу десорбції повітря та абсорбції вуглекислого газу в колоні насичення, при створенні автоколивань за допомогою акустичних контактних пристроїв досягнута інтенсифікація процесу масовіддачі. Продуктивність нового сатуратора зросла в 2 рази, ступінь насичення безалкогольних напоїв вуглекислим газом зросла на 12% (мал. 9), маса сатуратора зменшена в 4 рази. Економічний ефект від впровадження одного сатуратора продуктивністю 6 м<sup>3</sup>/г на Дніпропетровському пивкомбінаті «Днепр» був 86 тис. карбованців в рік в цінах 1990 р. По показниках потужності, вартості і маси запропонована конструкція сатуратора переважає всі конструкції сатураторів, які серійно випускаються.

Розроблені акустичні контактні пристрої для перфорованих тарілок бікарбонатної колони содового виробництва при виробництві харчової соди. В колоні діаметром 2,4 автоколивання газового потоку сприяють зростанню її продуктивності на 12...15%. Зменшена металоємкість колони. Колона впроваджена на Лисичанському содовому заводі.

Розроблена серія нових конструкцій реакторів озонування з акустичними контактними пристроями для озонування стічних вод та питної води продуктивністю від 0,5 до 3000 кубометрів на годину. Впровадження реакторів забезпечило підвищення якості очистки води, зросла ступінь використання озону, зменшені викиди озону в атмосферу, скороченні площі під обладнання, скоротився час обробки рідини, покращена культура виробництва. Розроблено програмне забезпечення розрахунку реакторів озонування.

Для обробки цукрового соку II сатурації розроблений новий змішувач, який являє собою автоколивальну гідромеханічну систему. Змішувач встановлений в циркуляційній контурі сатуратора. Пропускна здатність змішувача — до 1400 м<sup>3</sup>/годину дифузійного соку. Застосування змішувача дозволяє покращати очистку соку, збільшити ступінь використання диоксиду вуглецю, відповідно, зменшити викиди його в атмосферу.

Розроблена нова конструкція сульфідатора для обробки сиропу, яка складається з багатосоплового ежектора і змішу-

вача. Продуктивність сульфитатора складає 100 м<sup>3</sup>/годину. Інтенсифікація процесу в сульфитаторі досягається за рахунок створення автоколивань в потоці і покращення перемішування. Використання нових конструкцій автоколивальної техніки для сатурації і сульфитації соку і сиропу дозволяє зменшити викиди шкідливих газів в атмосферу, покращити очистку соку і сиропу, зменшити втрати цукру.

Розроблені нові конструкції електрохімічних апаратів, змішувачів, контактних пристроїв, реакторів та іншого обладнання з автоколивальними пристроями і впроваджені в виробництво. Розрахунковий сумарний річний еколого-економічний ефект від впровадження цього обладнання складає більше 253 млрд карбованців в цінах 1994 року.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Розвинуті і обґрунтовані теоретичні основи інтенсифікації масообмінних процесів при впливу автоколивань на контактуючі фази. В основу розрахунку параметрів автоколивань покладений принцип відповідності параметрів коливань характеристикам лімітуючого рівня, обумовлюючого основний опір процесу об'єкта впливу.

2. Проведене комплексне дослідження автоколивальних процесів і вивчений вплив автоколивань на швидкість масообмінного процесу.

3. Одержані аналітичні залежності для розрахунку гідродинамічних параметрів при конденсаційному способі створення коливань, бародинамічному об'ємному кипінні, псевдорозрідженні насадки.

4. Показана можливість створення автоколивань в газовому потоці, який проходить через низьконапірні акустичні контактні пристрої. Запропонована фізична модель, пояснююча причини вперше виявленого явища зменшення гідравлічного опору при проходженні газу через акустичний випромінювач з кільцевою резонуючою порожниною. Визначена аналітична залежність частоти автоколивань акустичних випромінювачів від конструктивних параметрів випромінювача і властивостей газового середовища.

5. Виявлено, що автоклинавання газового потоку сприяють зміні щільності розподілу діаметра барботажних бульбок і збільшують швидкість їх створення. Показано, що при проходженні газу через отвір з швидкістю до 120 м/с, відсутнє його витікання струминою.

6. Одержана аналітична залежність розрахунку гідравлічного опору зрошуваних клапаних тарілок з урахуванням пульсуючого проходження газу через отвори тарілок. Показано, що автоколивання газового потоку чинять незначний вплив на зміни гідравлічного опору незрошуваної і зрошуваної клапаних тарілок, перемішування.

7. Розроблена параметрична модель перемішування і запропоновані універсальні характеристики для оцінки статичної і динамічної процесу. Розроблена методика дослідження процесу перемішування. Одержані аналітичні залежності для розрахунку часу і основних параметрів процесу. Розроблена класифікація пристроїв для перемішування і аналітична залежність для оптимізації енергетичних витрат в змішувачах. Визначені оптимальні співвідношення розмірів статичних змішувачів. Показано, що для підтримки високої швидкості процесу перемішування доцільно зменшити розмір вихороутворювань з плином часу перемішування.

8. Запропонована фізична модель механізму впливу автоколивань газового потоку і акустичних коливань в рідині на масовіддачу в рідинній фазі систем газ—рідина і рідина — тверде тіло. Одержані залежності для розрахунку оптимальних акустичних параметрів коливань і коефіцієнт масовіддачі під впливом акустичних коливань. Розроблена дисипативна модель масопередачі. Виконаний аналіз дозволяє оптимізувати умови проведення масообмінного процесу з урахуванням енерговитрат і параметрів автоколивань.

9. Експериментально визначені основні закономірності впливу акустичних коливань на масовіддачу в газовій і рідинній фазах при масопереносі в системі газ—рідина. Установлене суттєве прискорення процесу масопереносу в системі рідина—тверде тіло при створенні акустичних коливань конденсаційним способом в процесі десорбції нікеля з іонообмінної смоли.

10. Розроблена класифікація масообмінної апаратури з коливальними режимами взаємодії фаз і запропонований ряд нових конструкцій тепломасообмінних апаратів і контактних пристроїв.

11. Розроблені нові конструкції апаратів з АКП, математична модель процесу, методика, алгоритмічне і програмне забезпечення розрахунку реакторів озонування.

12. Визначені основні закономірності електрохімічного очищення бурякоцукрового соку, промислових стічних вод, електроосадження іонів важких металів. Розроблені дисипативно-адсорбційна модель електроосадження іонів металу, технологіч-

на схема маловідходної технології промивки деталей, математична модель промивки деталей, ряд нових конструкцій електрохімічних апаратів з автоколиваннями фаз.

13. Розроблений і впроваджений ряд нових конструкцій масообмінної автоколивальної апаратури на підприємствах харчової, хімічної промисловості і машинобудування. Використання нових апаратів забезпечує зниження енерго- і матеріалоемкості обладнання, зменшення площі під обладнання, збільшення продуктивності апаратури, зменшення забруднення оточуючого середовища, підвищення культури виробництва. Розрахунковий еколого-економічний ефект від впровадження результатів розробки складає більше 253 млрд карбованців.

14. На базі виконаних досліджень і розробок здійснене рішення наукової проблеми, що сприяє рішенню важливої народногосподарської задачі — удосконалення енерго- і ресурсосберігаючих технологій і масообмінної автоколивальної апаратури.

#### УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$K$  — коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $T$  — температура,  $\text{К}$ ;  $\rho_L$  — густина рідини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\eta$  — коефіцієнт динамічної вязкості,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $\omega$  — кругова частота,  $\text{рад}/\text{с}$ ;  $V$  — об'єм,  $\text{м}^3$ ;  $M$  — молярна маса,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;  $R$  — газова стала,  $\text{Дж}/\text{К} \cdot \text{моль}$ ;  $F$  — площа поверхні,  $\text{м}^2$ ;  $C_L$  — швидкість звука в рідині,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $C$  — теплоємність,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ ;  $r$  — питома теплота паротворення,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $\tau$  — час,  $\text{с}$ ;  $E$  — швидкість дисипації енергії,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $D$  — коефіцієнт молекулярної дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_G$  — густина газу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\phi$  — газоутримання;  $\sigma$  — коефіцієнт поверхневого натягу,  $\text{Н}/\text{м}$ ;  $w_k$  — швидкість газу, приведена до перерізу колони  $\text{м}/\text{с}$ ;  $g$  — пришвидчення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $h_0$  — висота світлого шару рідини,  $\text{м}$ ;  $H$  — висота газорідного шару,  $\text{м}$ ;  $\Delta P_T$  — гідравлічний опір тарілок, які зрошуються,  $\text{Па}$ ;  $q$  — заряд іону,  $\text{Кл}$ ;  $E$  — напруженість електричного поля,  $\text{В}/\text{м}$ .

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних роботах

1. Тищенко Г. П., Ермаков П. П., Хоменко Н. Д. Применение новых материалов и конструктивных решений в пищевой промышленности / серия 13. Обзорная информация, ЦНИИТЭИПИЩЕПРОМ. — М., 1985. — вып. 2. — 20 с.

2. Ермаков П. П., Сафаров А. Г., Журавлев В. С. Математическая модель процесса и расчет реактора озонирования воды // Обзорн. инф. Сер. Актуальные вопросы химической науки и технологии и охраны окружающей среды. НИИТЭХИМ. — М., 1990. — Вып. 3. — 23 с.

3. Задорский В. М., Ермаков П. П., Мартынов В. Н., Исследование влияния колебаний на продольное перемешивание в барботажном секционированном реакторе // Процессы и аппараты производств химических реактивов и особо чистых веществ: Сб. научн. трудов ИРЕА. — М., 1984. — С. 57—64.

4. Исследование влияния барботажа пара на интенсификацию десорбции никеля из ионообменной смолы // Ермаков П. П., Бахарев А. В., Журавлен В. С. и др. // НИИТЭХИМ. — М. — 1989. — Вып. 1. — С. 1—5.

5. Ермаков П. П., Тищенко Г. П. Методика расчета акустических контактных устройств для барботажных аппаратов / Эксплуатация, ремонт, защита от коррозии оборудования и сооружений. НИИТЭХИМ. — М., 1989. — Вып. 4. — С. 33—36.

6. Ермаков П. П. Параметрическая модель перемешивания // У Ogólnopolskie Seminarium nt «Mieszanie». Lodz, 1989. — С. 49—53.

7. Ермаков П. П., Ермаков Н. П., Тищенко Г. П. Расчет диаметра капель эмульсии // Эксплуатация, ремонт, защита от коррозии оборудования и сооружения. НИИТЭХИМ. — М., 1990. — Вып. 1. — С. 35—39.

8. Ермаков П. П., Задорский В. М. Теплообменные контактные устройства с автоколебаниями газового потока // Материалы VII Всесоюзн. конф. по тепломассообмену. — Минск, 1984. — т. 8. — С. 59—64.

9. Ермаков П. П., Задорский В. М. Экспериментальные исследования акустических и массообменных характеристик газожидкостных систем с автоколебаниями газового потока // ИФЖ. — 1984. — Т. 47. — № 3. — С. 450—453.

10. Ермаков П. П., Задорский В. М., Пушкин А. Г. Экспериментальное исследование акустических излучателей с кольцевой резонирующей полостью // ИФЖ. — 1986. — Т. 50. — № 2. — С. 338.

11. Ермаков П. П. Смешивать, не перемешивая // ИР.—1985.— № 10. — С. 18—19.

12. Тищенко Г. П., Ермаков П. П., Ярьсько В. П. Рациональное конструирование и модернизация против коррозионного и механического износа оборудования // Ферментная и спиртовая промышленность. — 1987. — № 1. — С. 28—31.

13. Ермаков П. П., Тищенко Г. П., Литвиненко Н. В. Интенсификация процесса сатурации воды // Пищевая промышленность. — Киев. — 1988. — № 1. — С. 44—46.

14. Ермаков П. П., Тищенко Г. П. Реактор для обработки воды озоном // Пищевая промышленность, М. — 1988. — № 8. — С. 39—41.

15. Значно вигідніший спосіб. Електрохімічне очищення цукровмісних рідин / Ермаков П. П., Бахарев А. В., Тищенко Г. П. та інш. // АПК: Наука, техніка, практика. К. — 1989. — № 12. — С. 30.

16. Ермаков П. П., Сафаров А. Г. Оптимизация энергетических затрат в смесителях // Известия вузов. Машиностроение. — М., 1990. — № 5. — С. 159—160.

17. Ермаков П. П., Тищенко Г. П. Расчет времени перемешивания // Пищевая промышленность. — М., 1990. — № 9. — С. 42.

18. Ермаков П. П. Диссипативно-адсорбционная модель электроосаждения ионов металла // Известия вузов. Химия и химическая технология, Иваново. — 1990. — Вып. 4. — Т. 33. — С. 66—70.

19. Ермаков П. П. Интенсификация процесса массопередачи в системе жидкость — твердое // Известия вузов. Химия и химическая технология, Иваново. — 1990. — Вып. 5, т. 33. — С. 122—124.
20. Ермаков П. П., Тищенко Г. П. Интенсификация массопередачи при воздействии акустических колебаний // Пищевая промышленность. — М., 1991. — № 6. — С. 43—44.
21. Ермаков П. П. Влияние воздействия акустических колебаний на процесс массопередачи // ТОХТ. — М., 1991. — Т. 25. — С. 198 — 203.
22. А. с. 423481 СССР, МКИ ВОІ ДЗ/30. Клапанная тарелка / П. П. Ермаков. — № 17475331/23-26; Заявлено 14.02.72; Оpubл. 15.04.74, Бюл. № 14. — 2 с.
23. А. с. 429825 СССР, МКИ ВОІД 3/30. Аппарат для процессов теплообмена / П. П. Ермаков. — № 1778225/23; Заявлено 27.04.72; Оpubл. 30.05.74, Бюл. № 20. — 2 с.
24. А. с. 626786 СССР, МКИ ВОІД 3/32. Теплообменный аппарат / П. П. Ермаков. — № 2351699/23-26; Заявлено 27.04.76; Оpubл. 05.10.78, Бюл. № 37. — 2 с.
25. А. с. 671826 СССР, МКИ ВОІД 3/30. Контактное устройство для теплообменных аппаратов / П. П. Ермаков. — № 2352843/23-26; Заявлено 27.04.76; Оpubл. 05.07.79, Бюл. № 25. — 2 с.
26. А. с. 709107 СССР, МКИ ВОІД 3/30. Теплообменный аппарат / П. П. Ермаков. — № 2345009/23-26; Заявлено 06.04.76; Оpubл. 15.01.80, Бюл. № 2. — 3 с.
27. А. с. 816483 СССР, МКИ ВОІД 3/30. Клапанная тарелка / П. П. Ермаков, В. А. Аннстратенко. — № 2782139/23-26; Заявлено 20.06.79; Оpubл. 30.03.81, Бюл. № 12. — 3 с.
28. А. с. 1005811 СССР, МКИ ВОІД 3/32. Клапанная тарелка / П. П. Ермаков. № 3357588/23-26; Заявлено 27.11.81; Оpubл. 23.03.83, Бюл. № 11. — 2 с.
29. А. с. 1005814 СССР, МКИ ВОІД 3/32. Контактное устройство для теплообменных аппаратов / П. П. Ермаков. — № 3365039/23-26; Заявлено 11.12.81; Оpubл. 23.03.83, Бюл. № 11. — 2 с.
30. А. с. 1015122 СССР, МКИ F04D 13/06. Электромагнитный насос / П. П. Ермаков. — № 3343991/25-06; Заявлено 08.10.81; Оpubл. 30.04.83, Бюл. № 16. — 2 с.
31. А. с. 1018665 СССР, МКИ ВОІД 3/30. Клапанная тарелка / П. П. Ермаков. — № 3353945/23-26; Заявлено 18.11.81; Оpubл. 23.05.83, Бюл. № 19. — 2 с.
32. А. с. 1018666 СССР, МКИ ВОІД 3/30. Клапанная тарелка / П. П. Ермаков. — № 3362481-23-26; Заявлено 10.12.81; Оpubл. 23.05.83, Бюл. № 19. — 2 с.
33. А. с. 1037927 СССР, МКИ ВОІД 3/30. Контактное устройство / П. П. Ермаков, В. М. Задорский. — № 3445168/23-26; Заявлено 28.05.82; Оpubл. 30.08.83, Бюл. № 32. — 2 с.
34. А. с. 1040313 СССР, МКИ F28F 1/10. Теплообменная труба / Г. А. Ткач, В. М. Задорский, П. П. Ермаков и др. — № 3447860/24-06; Заявл. 28.05.82; Оpubл. 07.09.83, Бюл. № 33. — 2 с.
35. А. с. 1057052 СССР, МКИ ВОІД 3/30. Клапанное контактное устройство / П. П. Ермаков, В. М. Задорский. — № 3445159/23-26; Заявлено 28.05.82; Оpubл. 30.11.83, Бюл. № 44. — 2 с.
36. А. с. 11114431 СССР, МКИ ВОІД 3/30. Клапанное контактное устройство / П. П. Ермаков, В. М. Задорский, В. С. Журавлев. —

№ 3464537 / 23-26; Заявлено 05.07.82; Оpubл. 23.09.84, Бюл. № 85. — 2 с.

37. А. с. 1125461 СССР, МКИ F28D 7/00. Кожухотрубный теплообменник / П. П. Ермаков, В. М. Задорский, В. М. Фрумин и др. — № 3607205/24—06; Заявлено 17.06.83; Оpubл. 23.11.84, Бюл. № 43. — 4 с.

38. А. с. 1134226 СССР, МКИ ВОIF 7/00. Перемешивающее устройство для жидких сред / П. П. Ермаков, В. М. Задорский. — № 3503499/23-26; Заявлено 22.10.82; Оpubл. 15.01.85, Бюл. № 2. — 2 с.

39. А. с. 1134212 СССР, МКИ ВОID 3/30. Клапанное контактное устройство для теплообменных аппаратов / П. П. Ермаков, В. М. Задорский. — № 3444481/23-26; Заявлено 28.05.82; Оpubл. 15.01.85, Бюл. № 2. — 2 с.

40. А. с. 1130391 СССР, МКИ ВОIF 7/18. Перемешивающее устройство / П. П. Ермаков, И. Ф. Степанец, В. М. Задорский и др. — № 3655659/23-26; Заявлено 26.10.83; Оpubл. 23.12.84, Бюл. № 47. — 2 с.

41. А. с. 1139934 СССР, МКИ F23D 11/34. Акустическая форсунка / П. П. Ермаков. — № 3267136/24-05; Заявлено 09.02.81; Оpubл. 15.02.85, Бюл. № 6. — 2 с.

42. А. с. 1143433 СССР, МКИ ВОID 3/30. Контактное устройство / П. П. Ермаков, В. М. Задорский. — № 3598386/23-26; Заявлено 27.05.83; Оpubл. 07.03.83, Бюл. № 9. — 3 с.

43. А. с. 1143432 СССР, МКИ ВОID 3/30. Клапанная тарелка / П. П. Ермаков. — № 3387627/23-26; Заявлено 05.07.82; Оpubл. 07.03.85, Бюл. № 9. — 3 с.

44. А. с. 1190180 СССР, МКИ F28F 9/00. Штуцер теплообменного аппарата / Г. А. Ткач, П. П. Ермаков, В. М. Фрумин и др. — № 3701152/24-06; Заявлено 17.02.84; Оpubл. 07.11.85, Бюл. № 41. — 2 с.

45. А. с. 1233925 СССР, МКИ ВОIF 3/08. Диспергатор / П. П. Ермаков, Л. П. Рева, Б. И. Куринский. — № 3813649/23-26; Заявлено 20.11.84; Оpubл. 30.05.86, Бюл. № 20. — 2 с.

46. А. с. 1171046 СССР, МКИ ВОID 3/30. Теплообменный аппарат / А. И. Соколенко, П. П. Ермаков, И. Ф. Степанец и др. — № 3663134/23-26; Заявл. 09.11.83; Оpubл. 07.08.85, Бюл. № 29. — 3 с.

47. А. с. 1301471 СССР, МКИ ВОID 53/20. Насадка. / П. П. Ермаков, В. М. Задорский, Г. П. Тищенко. — № 3885066/31-26; Заявлено 16.04.85; Оpubл. 07.04.87, Бюл. № 13. — 2 с.

48. А. с. 1326325 СССР, МКИ ВОIF 5/00. Перемешивающее устройство / П. П. Ермаков, Н. П. Ермаков, Б. И. Куринский. — № 3858851/31-26; Заявлено 21.02.85; Оpubл. 30.07.87, Бюл. № 28. — 2 с.

49. А. с. 1502483 СССР, МКИ С02F 1/78. Реактор озонирования / В. С. Журавлев, П. П. Ермаков, И. А. Белобров и др. — № 4228616/23-26; Заявлено 15.04.87; Оpubл. 4.08.89, Бюл. № 31. — 3 с.

Ермаков П. П. Автоколебательная массообменная аппаратура пищевой промышленности.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 — процессы, машины и агрегаты пищевой промышленности. Украинский государственный университет пищевых технологий, Киев, 1994.

Защищается 64 научные работы и 29 авторских свидетельств, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования интенсификации массообменных процессов при создании автоколебаний в газовой и жидкой средах с помощью статических акустических устройств.

Установлено существенные ускорения процесса массопереноса в системах газ—жидкость, жидкость — твердое тело при создании акустических колебаний, предложены физические и математические модели процессов массопередачи, перемешивания, создания акустических колебаний. Осуществлено промышленное внедрение аппаратов с предложенными акустическими устройствами, приводятся данные о их эффективности в процессе эксплуатации.

#### Ключові слова:

акустика, коливання, контактні пристрої, масоперенос, гідродинаміка.

Ermakov P. P. Autooscillaible massexchange apparatus of food industry.

Dissertation is on competiton for a doctor's degree of technical sciences by speciality 05. 18. 12 - processes, machines and aggregates of Food industry, Ukrainian state University of food technology, Kiev, 1994.

It is defend 64 scientific work's and 29 certificate of author, which contains theoretical and experimental research by intensification massexchange processes when createautooscillaible in gas and liquid whith the help of statical acoustic device.

Determine essential acceleration of process masstransfer in sistem's gas—liquid, liquid—solid when create acoustic oscillaible, offer physical and mathematical model's of processes masstransfer, mixture, creation acoustic oscillaible. Realize industrial inculcation of apparatuses with offer acoustic device, bring information about theirs efficiency in the process exploitation.



---

Н/К. Здано до друку 2.01.95 р. Підписано до друку 12.01.95 р. Формат 60×84<sup>1/8</sup>  
Папір газетний. Гарнітура літературна. Друк високий. Умовн. друк-арк. 1,62  
Умовн. кр.-відб. 1,62. Уч.-вид. арк. 1,2. Тираж 100. Зам. № 4-10701.  
Друкарня видавництва «Зоря», 320079, м. Дніпропетровськ, вул. Журналістів, 7.

456420

AB 31.749

**AB 31.749**