

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

СИДОРЕНКО СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК [66.021.3+66.048.3] (043.3)

**ГІДРОДИНАМІКА ТА МАСООБМІН
В ДИСПЕРГУЮЧОМУ КОНТАКТНОМУ ПРИСТРОЇ
ВІДЦЕНТРОВОГО МАСООБМІННОГО АПАРАТА**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Суми.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
ЛАЗНЕНКО Дмитро Олексійович,
Сумський державний університет,
доцент кафедри прикладної екології.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ЯКУБА Олександр Родіонович,
Сумський національний аграрний університет,
професор кафедри інженерного
обладнання харчових виробництв;

кандидат технічних наук, професор
МОІСЕЄВ Віктор Федорович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри хімічної техніки
та промислової екології.

Захист відбудеться 15 квітня 2011 року о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано «___» березня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Л.Л. Гурець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процеси масообміну займають значне місце в структурі технологічних процесів різних виробництв, їх інтенсифікація є важливим завданням для вдосконалення виробництва, поліпшення якості продукції, зменшення її собівартості, раціонального використання природних ресурсів та охорони навколишнього середовища.

Перспективним напрямком підвищення ефективності масообмінних процесів є накладання на взаємодіючі фази поля зовнішніх сил, у тому числі використання відцентрового поля. Конструктивно застосування відцентрових сил у масообмінних процесах реалізується у відцентрових масообмінних апаратах (ВМА).

На сьогодні є різні підходи до створення таких апаратів, відома велика кількість конструкцій. У той же час значна частка існуючих апаратів цього класу недостатньо повно вивчені, мають значний потенціал для подальшого вдосконалення і розширення сфер застосування. Одним із шляхів подальшої інтенсифікації є розроблення, дослідження та застосування нових високоефективних контактних пристроїв для відцентрових масообмінних апаратів.

Таким чином, створення та дослідження нової конструкції контактного пристрою відцентрового масообмінного апарата (ВМА) з метою підвищення ефективності роботи обладнання є актуальним завданням, яке потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в Сумському державному університеті за планом науково-дослідних робіт кафедри прикладної екології, пов'язаних з тематиками: «Екологічні проблеми хімічної технології, розроблення прогресивних технологій та обладнання хімічних виробництв» (№ державної реєстрації 0105U002469) та «Розробка високоінтенсивного масообмінного обладнання для створення маловідходних технологій» (№ державної реєстрації 0106U013008).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження закономірностей гідродинаміки та масопереносу в відцентровому масообмінному апараті з контактним пристроєм у вигляді набору сітчастих кільцевих контактних елементів, установлених коаксіально з кроком один від одного, що забезпечує організацію взаємодії фаз у режимі багатостадійного диспергування рідини.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- отримання фізичної моделі взаємодії фаз в розробленому контактному пристрої;
- математичний опис гідродинамічних закономірностей взаємодії фаз у контактному пристрої ВМА;
- експериментальні дослідження гідродинаміки та масообміну в ВМА залежно від конструктивних параметрів контактного пристрою та режимних параметрів роботи апарата;

- перевірка й уточнення отриманих теоретичних залежностей експериментальним шляхом на модельних системах;
- створення інженерної методики розрахунку відцентрового масообмінного апарата та визначення основних вимог до ВМА під час його роботи;
- дослідно-промислова апробація та впровадження розробленого апарата в промисловість.

Об'єкт дослідження – гідродинаміка та масообмін у контактному пристрої ВМА.

Предмет дослідження – контактний пристрій для ВМА.

Методи дослідження. Математичне моделювання виконане на підставі класичних положень механіки суцільного середовища та технічної гідромеханіки з використанням систем комп'ютерної математики Maple 12 та MathCAD 11. Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень гідродинамічних та масообмінних характеристик на лабораторній моделі ВМА з контактним пристроєм досліджуваної конструкції. В процесі експериментальних досліджень використовувалися методи візуального спостереження та швидкісного фотографування поведінки рідини всередині контактної пристрою, визначення гідродинамічних характеристик газу методами інструментальних вимірювань, методи хімічного аналізу для одержання масообмінних показників роботи апарата. Обробка результатів експериментів, порівняння з теоретичними моделями та визначення похибок проведено за допомогою методів математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані наступні наукові результати:

- уперше розроблено фізичну та математичну модель гідродинаміки газової фази в контактному пристрої ВМА, в якій враховано вплив на гідродинаміку газу вхідної ділянки ротора та конструктивних характеристик контактної пристрою;
- на базі існуючих уявлень про механізми диспергування рідини вперше розроблена фізична та математична модель процесу утворення крапель у диспергуючому контактному пристрої ВМА з урахуванням особливостей формування крапель на сітчастій поверхні в полі відцентрових сил при протічній русі газу;
- уперше експериментально досліджено гідродинаміку фаз в ВМА з диспергуючим контактним пристроєм розробленої конструкції. Експериментально отримані залежності та коефіцієнти для розрахунку дисперсних характеристик рідкої фази, швидкості газу та перепаду тиску в апараті;
- уперше досліджені масообмінні характеристики у відцентровому апараті з диспергуючим контактним пристроєм та отримані залежності для визначення коефіцієнта масовіддачі в контактному пристрої ВМА. Визначена рекомендована величина кроку між елементами в контактному пристрої, при якій забезпечуються високі масообмінні показники роботи апарата.

Практичне значення одержаних результатів:

- на базі отриманих залежностей для визначення гідродинамічних та масообмінних характеристик розроблена інженерна методика розрахунку ВМА з контактним пристроєм у вигляді набору сітчастих кільцевих контактних елементів, установлених коаксіально з кроком один від одного;
- розроблено високоефективний контактний пристрій для протитечійного відцентрового масообмінного апарата, що працює в режимі багатостадійного диспергування рідиним (отримано патент України на корисну модель);
- результати досліджень та отримана інженерна методика використані для розрахунку дослідно-промислової установки для утилізації відходу виробництва ацетату етиленгліколю на ТОВ «Шостка-Хімпродукт», м. Шостка Сумської області.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у розробці конструкції контактної пристрою, проведенні математичного моделювання гідродинаміки газу, умов формування та руху дисперсної фази в контактному пристрої ВМА, підборі й апробації методик експериментальних досліджень гідродинаміки та масообміну, проектуванні та монтажі експериментального стенда, обробці та узагальненні отриманих результатів. Здобувач брав участь на всіх етапах робіт з проектування та виготовлення дослідно-промислового зразка ВМА з контактним пристроєм розробленої конструкції, а також у виконанні монтажних-налагоджувальних робіт та виведенні на робочі режими апарата під час його дослідно-промислової експлуатації у якості відповідального виконавця.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геоєкології і раціонального природокористування Лівобережної України» в Сумському державному педагогічному університеті (м. Суми, 2006 рік), на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» в Кременчуцькому державному політехнічному університеті (м. Кременчук, 2006 рік), на IV та V Міжнародних науково-практичних конференціях «Екологія. Економіка. Енергозбереження» в Сумському державному університеті (м. Суми, 2007 та 2009 роки), на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов» (м. Щолкіне, АР Крим, 2008 рік), на Міжнародній науково-практичній конференції «Современные проблемы инновационных технологий в образовании и науке» в Академічному інноваційному університеті (м. Шимкент, Республіка Казахстан, 2009 рік), на Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы энергетической эффективности пищевых и химических производств» в Одеській національній академії харчових технологій (м. Одеса, 2009 рік), на XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків, 2009 рік), на науково-

технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Сумського державного університету (м. Суми, 2006, 2007, 2008 роки).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 11 наукових працях, в тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України, 2 статті в збірниках наукових праць. Отриманий 1 деклараційний патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 124 найменувань, додатків. Повний обсяг дисертації становить 179 сторінок, серед яких 128 сторінок основного тексту, 11 таблиць, 74 рисунки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, показано її зв'язок з науковими програмами, визначено завдання дослідження, сформульовано наукову новизну й практичну цінність роботи, надано інформацію про апробацію та публікації за темою дисертації.

У першому розділі проведено літературний огляд існуючого стану питання інтенсифікації процесів масообміну із застосуванням поля відцентрових сил. Показані напрямки розвитку конструкцій відцентрових масообмінних апаратів (ВМА), проведено їх аналіз з виявленням основних недоліків та визначені можливі напрямки подальшого удосконалення. На підставі аналізу особливостей масопереносу в дисперсних системах відзначений ефект різкого зростання ефективності масовіддачі в момент утворення та відриву краплі (кінцевий ефект), а також факт зростання масопереносу в краплях у нестационарних гідродинамічних режимах. Установлено, що існує потенціал підвищення інтенсивності масопереносу за рахунок використання нестационарних гідродинамічних режимів у дисперсному потоці рідини. Це було обрано як напрям подальших досліджень і створення нової конструкції контактної пристрою.

Проаналізовані існуючі способи отримання дисперсного потоку із застосуванням відцентрового поля, режими розпилення та гідродинамічні характеристики дисперсної фази, що при цьому утворюється. В результаті визначено, що для отримання монодисперсного потоку рідини в полі відцентрових сил рекомендовано використовувати матеріали з регулярною структурою утворюючих елементів.

На підставі огляду літератури сформульовані завдання дослідження.

У другому розділі викладені загальна методика та основні методи досліджень. В якості предмета дослідження обрана розроблена нами конструкція контактної пристрою для ВМА (рис.1), яка захищена патентом України. Пристрій являє собою набір вісесиметричних кільцевих контактних елементів. Елементи виготовлені з дрібночарункової металеві сітки та встановлені з кроком один від одного.

Вивчення гідродинамічних та масообмінних характеристик у розробленому контактному пристрої проводили на створеному лабораторному стенді (рис.2).

Основним елементом стенда є модель відцентрового масообмінного апарата 1 з контактним пристроєм, що встановлений всередині обертового ротора, який закріплений вертикально на валу. Ротор має розміри: внутрішній діаметр – 0,04 м, зовнішній – 0,2 м, ширина – 0,03 м.

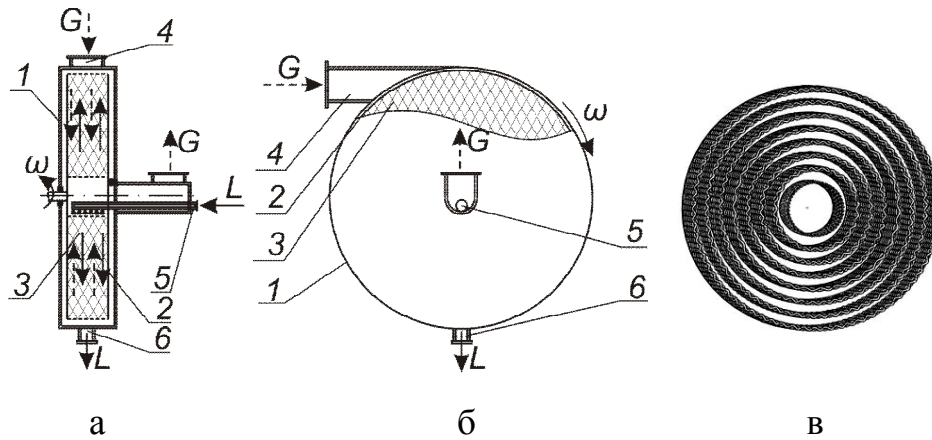


Рис. 1. Схема ВМА (а, б) та контактної пристрою (в): 1 – корпус, 2 – ротор, 3 – контактний пристрій, 4, 5 – патрубок подачі газу та рідини відповідно, 6 – патрубок відведення рідини; L – рідина, G – газ. Суцільними лініями показаний напрямок руху рідини, пунктирними – напрямок руху газу

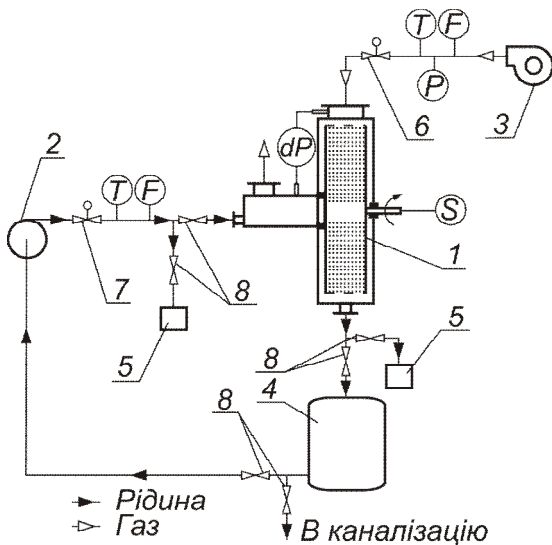


Рис. 2. Схема експериментального стенда: 1 – ВМА; 2 – насос; 3 – вентилятор; 4 – збірник; 5 – пробовідбірник; 6, 7 – засуви; 8 – кран

Вал ротора приводиться в обертання через пасову передачу від електродвигуна постійного струму. Лабораторний стенд дозволяє регулювати витрату фаз та частоту обертання ротора, контролювати витрату і температуру фаз, тиск газу після вентилятора, перепад тиску на вході та виході з ВМА, напругу та струм на електродвигуні, а також здійснювати відбори проб рідини на вході в апарат та виході з апарата.

Важливим конструктивним параметром, який впливає на характеристики роботи такого контактної пристрою, є крок (відстань) між кільцевими елементами. Для вивчення впливу кроку на гідродинаміку та масообмін була

виготовлена серія контактних пристроїв з різним кроком. Для більш коректного врахування впливу кроку на характеристики роботи і зменшення впливу вхідної та вихідної зон апарата величина кроку варіювалася на ділянці, розташованій між радіусами $r_1=0,05$ м та $r_2=0,07$ м ($\Delta r=0,02$ м). Зміна кроку досягалася шляхом зміни кількості кільцевих елементів на досліджуваній ділянці (рис.3).

Гідродинаміку газової фази досліджували за величиною перепаду тиску. Дослідження проводили залежно від швидкості обертання ротора, щільності зрошення, швидкості газу та кроку між контактними елементами.

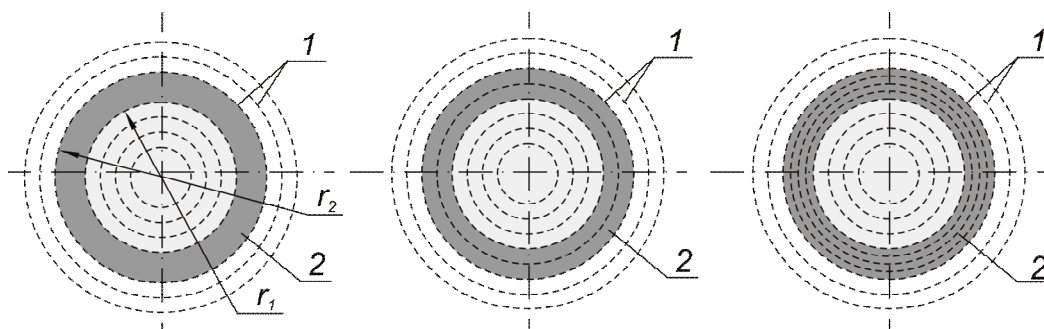


Рис. 3. Схема контактних пристроїв ВМА: 1 – контактні елементи; 2 – досліджувана ділянка зі змінним кроком між елементами

Для вивчення гідродинаміки рідини проводили дослідження характеристик дисперсного потоку методами візуального спостереження в стробоскопічному освітленні та швидкісної фотозйомки.

Дослідження масовіддачі в газовій фазі виконували на процесі десорбції аміаку з води в потік повітря, в рідині – на десорбції CO_2 з води в повітря. Концентрації аміаку та вуглекислоти визначалися методами хімічного аналізу. Обробка та узагальнення даних експериментів виконувалися з застосуванням методів математичної статистики.

У третьому розділі наведені результати теоретичних досліджень гідродинаміки фаз у контактному пристрої розробленої конструкції.

Розроблена фізична модель взаємодії фаз, на підставі якої отримана математична модель руху газу та рідини в контактному пристрої ВМА.

В апарат газова фаза надходить по тангенційно встановленому патрубку. В об'ємі апарата газ рухається по спіралеподібній траєкторії в напрямку від периферії до центра через ряд послідовно встановлених сітчастих елементів (рис.4). Сітки, при проходженні крізь них газового потоку, формують упорядковану мікрівихрову турбулентну структуру, яка за своїм характером близька до ізотропної. При цьому інтенсивність цієї турбулентності зростає на відстані від сітки до певного максимуму, далі вироджується і загасає. Відстань, що відповідає максимальній інтенсивності турбулентності, залежить від геометрії сітки (розміру прутка, чарунки та коефіцієнта вільного перерізу сітки). В цілому гідродинаміка газу має два рівні – в масштабі апарата (макрорівень) та в масштабі контактних елементів (мікрорівень), які відрізняються за своїм описом та впливом на гідродинамічні та масообмінні показники роботи ВМА.

Диспергування рідини в контактному пристрої розробленої конструкції відбувається на поверхні кільцевих сітчастих елементів під дією відцентрової сили. При відносно малих значеннях відцентрової сили на поверхні контактних елементів утворюється суцільна плівка рідини. З плівки витягуються струмені, під дією зовнішніх та внутрішніх сил струмені розпадаються, утворюючи краплі. Зі збільшенням відцентрової сили зменшуються довжина і діаметр

струменів та зменшується розмір утворених крапель. При збільшенні відцентрової сили суцільна плівка на поверхні кільцевих елементів руйнується і утворюється тонка плівка на поверхні прутків сітки. Формування та відрив крапель відбувається переважно в місцях перехресть прутків сітки. В цьому режимі диспергований потік за розміром крапель наближається до монодисперсного. Такий режим визначений як робочий режим диспергування рідини у ВМА.

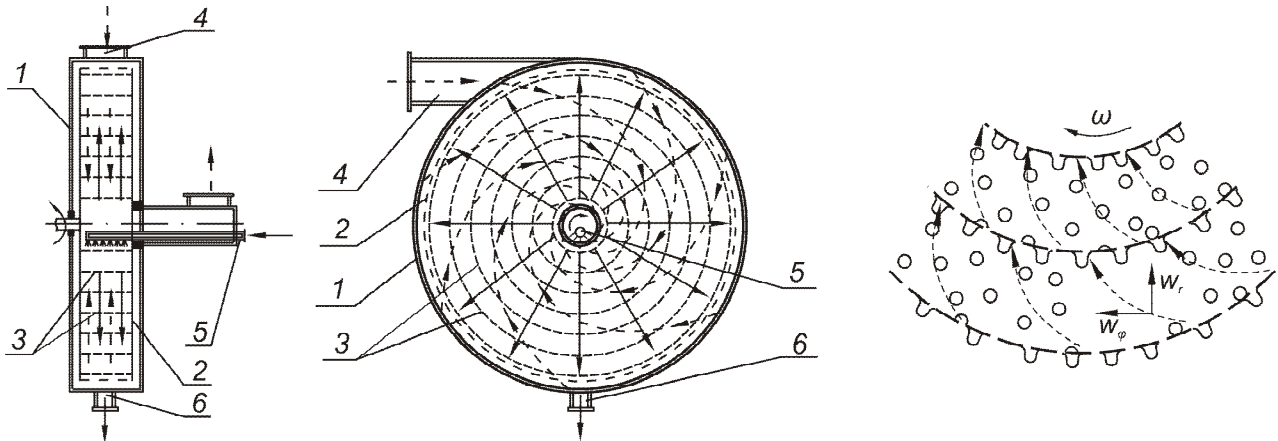


Рис. 4. Схема руху фаз у контактному пристрої ВМА: 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – кільцеві контактні елементи; 4 – патрубок подачі газу; 5 – патрубок подачі рідини; 6 – патрубок відведення рідини

У роботі розроблено математичний опис гідродинаміки газу в обертовому роторі без контактної пристрої. Для цього розглянута система рівнянь Нав'є-Стокса сумісно з рівнянням нерозривності, записаних у циліндричній системі координат. При цьому прийняті такі припущення:

- процес проходить у стаціонарному режимі $\frac{\partial}{\partial \tau} = 0$;
- течія газу в контактному пристрої відбувається у двовимірній площині (відсутність руху вздовж осі z) $\frac{\partial}{\partial z} = 0$, $w_z = 0$;
- рух потоку є вісесиметричним $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$.

З урахуванням припущень система рівнянь Нав'є-Стокса сумісно з рівнянням нерозривності запишеться у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} w_r \frac{\partial w_r}{\partial r} - \frac{w_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \\ w_r \frac{\partial w_\varphi}{\partial r} + \frac{w_r w_\varphi}{r} = \nu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial w_\varphi}{\partial r} + \frac{w_\varphi}{r} \right) \\ \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} = 0 \end{array} \right. , \quad (1)$$

де P – тиск, Па; w_r та w_φ – радіальна та колова швидкості, м/с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; r – поточний радіус, м.

Радіальна складова швидкості газу визначається з рівняння нерозривності при граничних умовах $r = R$, $w_r = w_R$:

$$w_r = w_R \frac{R}{r}, \quad (2)$$

де R – зовнішній радіус ротора, м.

Колова складова швидкості визначається розв'язанням другого рівняння системи (1) відносно w_φ . З урахуванням припущення $\nu(r) = const$ та залежності (2) після інтегрування отримуємо рівняння для w_φ . Константи інтегрування і відповідні розв'язання рівняння знаходимо, припустивши, що на вході в обертовий ротор газова фаза повністю захоплюється в обертальний рух. Відповідно колова швидкість руху газу на вході в ротор дорівнює швидкості обертання зовнішньої поверхні ротора. При граничних умовах $r = R$, $w_{\varphi R} = \omega R$,

$\frac{dw_\varphi}{dr} = \omega$ отримуємо розв'язання у вигляді

$$w_\varphi = \frac{w_{\varphi R}}{K + 2} \left(\frac{R}{r} K + 2 \left(\frac{r}{R} \right)^{K+1} \right), \quad (3)$$

де безрозмірний коефіцієнт $K = \frac{w_R R}{\nu}$.

Проведений аналіз рівняння (3) показав, що при нехтуванні складовими надто малого порядку рівняння стає близьким до закону збереження моменту імпульсу, тобто

$$w_{\varphi r} = w_{\varphi R} \frac{R}{r}. \quad (4)$$

Зіставлення результатів розрахунків за (3) та (4) показує, що розбіжність результатів у робочому діапазоні ВМА не перебільшує 1%. Тобто для практичних розрахунків можна з достатньою точністю використовувати залежність (4).

Підставляючи (4) до першого рівняння системи (1) після інтегрування отримуємо залежність для визначення гідравлічного опору між i -м та $(i+1)$ -м контактним елементом сухого апарата у вигляді

$$\Delta P_i = P(r_{i+1}) - P(r_i) = \left(\frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right) \frac{\rho_e}{2} (w_{r_{i+1}}^2 + w_{\varphi_{i+1}}^2). \quad (6)$$

Комплекс $\left(\frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right)$, по суті, є коефіцієнтом гідравлічного опору ξ_i за

своєю формою близький до відомого рівняння Карно-Борда, яке визначає коефіцієнт гідравлічного опору для конфузоров. Але залежність (6) отримана з рядом наближень і припущень, приведених по ходу розв'язання системи Нав'є-

Стокса. Для урахування впливу цих наближень на величину ΔP_i в (6) уведений коефіцієнт λ . Крім того, вплив вхідної ділянки ротора на швидкість газу враховано введенням у (6) коефіцієнта k_{ex} . Таким чином, отримане рівняння для ΔP_i у вигляді

$$\Delta P_i = P(r_{i+1}) - P(r_i) = k_{ex} \lambda \xi \frac{\rho_z}{2} (w_{r_{i+1}}^2 + w_{\varphi_{i+1}}^2). \quad (7)$$

Рівняння (7) визначає гідравлічний опір порожнього ротора або ділянки контактної пристрою між кільцевими елементами.

Контактний пристрій включає ряд ділянок, загальний гідравлічний опір яких визначається як адитивність відповідних опорів. За залежністю (7) можна визначити опір першої (від периферії) ділянки. Для розрахунку гідравлічного опору наступних ділянок необхідно задавання граничних умов, а саме колової швидкості w_φ , яка змінюється внаслідок обтікання газом перешкоди (сітки). Корегування колової швидкості w_φ виконуємо за допомогою коефіцієнта k_φ . Причому k_φ визначається у відносних швидкостях (відносно швидкості обертання контактної елемента) як

$$k_\varphi = (w'_\varphi - \omega r) / (w_\varphi - \omega r), \quad (8)$$

де w'_φ – колова складова швидкості газу до проходження крізь сітку, м/с;

w_φ – колова складова швидкості газу після проходження крізь сітку, м/с.

Гідравлічний опір контактних елементів ΔP_c визначається за стандартними залежностями для опору металевих сіток, наведеними в довідковій літературі.

Рівняння (7), по суті, виражає суму двох складових гідравлічного опору:

опір нерухомого апарата $\Delta P_0 = \lambda \xi \frac{\rho_z}{2} w_R^2$, та опір, викликаний дією відцентрової

сили $\Delta P_{\varphi c} = \lambda \xi \frac{\rho_z}{2} w_{\varphi R}^2$. Таким чином, гідравлічний опір сухого апарата запишеться у вигляді

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_{\varphi c} + \Delta P_c. \quad (9)$$

Коефіцієнти k_{ex} , λ та k_φ потребують експериментального визначення.

Вплив рідини на гідравлічний опір враховано через введення в рівняння (9) величини фактора зрощення f_L . Повний гідравлічний опір запишеться так:

$$\Delta P = (\Delta P_0 + \Delta P_{\varphi c} + \Delta P_c) f_L. \quad (10)$$

Величина f_L визначається експериментальним шляхом.

Для робочого режиму диспергування рівняння балансу діючих сил має вигляд (рис.5)

$$F_\sigma^2 = F_{\varphi c}^2 + F_2^2 - 2F_{\varphi c}F_2 \cos \alpha, \quad (11)$$

де $F_{\varphi c} = \frac{\pi d_{екв}^3}{6} \rho_p \cdot \omega^2 r$ – відцентрова сила, Н; $F_\sigma = \pi d_0 \sigma$ – сила поверхневого

натягу, Н; $F_2 = \xi \cdot S_k \cdot \frac{\rho_z w^2}{2}$ – сила опору газу, Н;

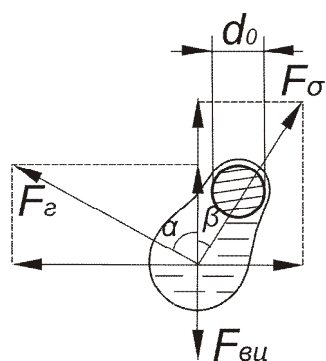


Рис. 5. Схема розподілу сил при відриві краплі

Із залежності (11) отримане рівняння для визначення розміру краплі. При наближеному аналізі його складових виявлено, що максимальний опір газу становить не більше 10% від мінімальної відцентрової сили. Враховуючи відносно незначний вплив газу на розмір краплі, в подальшому цим впливом нехтуємо. З урахуванням цього з (11) отримана залежність для розміру краплі у вигляді

$$d_k = k_V \sqrt[3]{\frac{6d_0 \sigma}{(\rho_p - \rho_g) \omega^2 r}}, \quad (12)$$

де k_V – коефіцієнт, що враховує вплив локальних умов утворення краплі; σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м; ρ_p , ρ_g – густина рідини та газу відповідно, кг/м³.

Отримана залежність для визначення швидкості руху краплі у вільному проміжку між кільцевими елементами:

$$w_p = \frac{1}{k_1 + 1} \left((k_2 k_1 + k_2 - k_1 w_g)^{0.5} - k_1 w_g \right), \quad (13)$$

де $k_1 = 4\xi \frac{1}{d_{кр}} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_p} \Delta r$; $k_2 = 2\omega^2 r \cdot \Delta r$.

На підставі отриманих рівнянь для розміру краплі та швидкості її руху побудована модель для розрахунку кількості утримуваної в апараті рідини (КУР) та відповідної поверхні контакту фаз (ПКФ). При цьому врахована ймовірність захоплення крапель поверхнею сітки контактного елемента залежно від співвідношення розміру краплі та геометричних параметрів сітки (розміру чарунки та прутка).

У результаті розрахунків отримані залежності величин КУР та ПКФ від кроку між контактними елементами.

У четвертому розділі наведені результати експериментальних досліджень гідродинамічних та масообмінних характеристик відцентрового масообмінного апарата із запропонованою конструкцією контактної пристрою.

У результаті досліджень перепаду тиску в ВМА виявлена певна особливість (рис.6). При швидкостях обертання більше 150 рад/с величина ΔP для зрошеного апарата дещо менша, ніж для сухого. Такий факт відмічається в роботах інших авторів, така гідродинамічна особливість потребує окремого розгляду та дослідження, що не було завданням даної роботи і в подальшому не розглядається.

Втрати тиску сухого апарата зростають зі зростанням швидкості обертання, що є наслідком збільшення діючої на газ відцентрової сили.

В умовах зрошення при збільшенні швидкості обертання на першому етапі величина ΔP зменшується, потім зростає.

Зі зростанням відцентрової сили зростає швидкість руху рідини, зменшуються товщина плівки і розміри крапель, зменшується кількість

утримуваної в контактному пристрої рідини. Відповідно зменшується перекриття вільного перерізу рідиною. При цьому зростає відцентрова сила. Але вплив першого фактора більш вагомий і в результаті перепад тиску на першому етапі знижується.

У подальшому, при зростанні відцентрової сили (як буде показано нижче), розмір краплі залишається практично сталим, відповідно не змінюється вільний переріз. У цьому діапазоні переважний вплив на величину ΔP відіграє зростаюча відцентрова сила, збільшення якої призводить до росту перепаду тиску.

Залежність ΔP контактної пристрою від кроку між елементами наведена на рис.7.

Максимум у діапазоні $(0 - 5) \cdot 10^{-3}$ м обумовлений виникненням та виродженням власної турбулентності сітки. В діапазоні $\Delta r = (10 - 20) \cdot 10^{-3}$ м величина ΔP залишається практично незмінною при більших швидкостях обертання (точки «в» та «г»), а при менших (точки «а» та «б») – дещо зменшується, що є наслідком дії відцентрової сили.

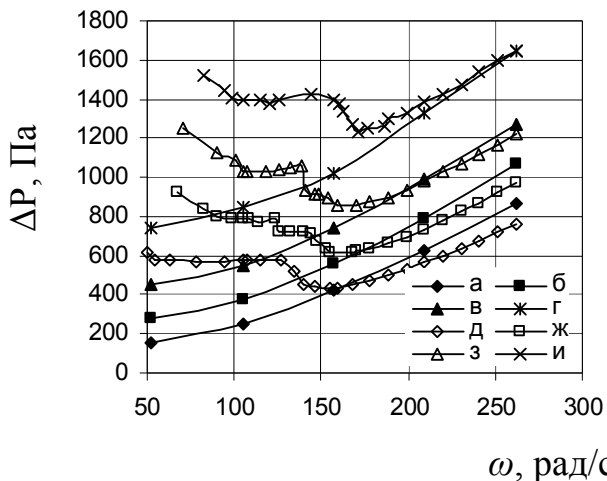


Рис. 6. Залежність перепаду тиску від швидкості обертання при швидкостях газу: а, б, в, г – 1,74, 2,46, 3,25, 4,28 м/с для сухого ротору відповідно та: д, ж, з, и – 1,74, 2,46, 3,25, 4,28 м/с для зрошеного ротору відповідно. Щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

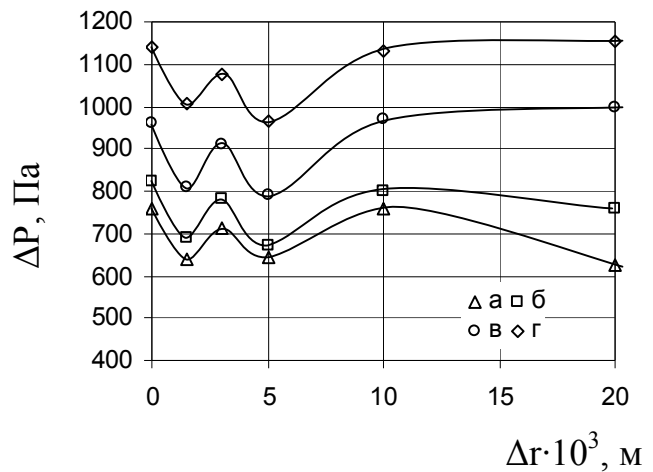


Рис. 7. Залежність перепаду тиску від кроку між елементами при швидкостях обертання: а – 157 рад/с, б – 188 рад/с, в – 209 рад/с; г – 262 рад/с. Швидкість газу 2,94 м/с, щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

Експериментально отримані коефіцієнти рівняння (7) k_{ex} , λ та k_{ϕ} :

$$k_{ex} = 3,52 \left(\frac{w_R}{\omega R} \right)^{0,6} \quad \text{при} \quad \left(\frac{w_R}{\omega R} \right) < 0,178, \quad (14)$$

$$k_{ex} = 7,7 \left(\frac{w_R}{\omega R} \right)^{1,06} \quad \text{при} \quad \left(\frac{w_R}{\omega R} \right) > 0,178, \quad (15)$$

$$k_{\varphi} = 109 \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right)^{2,34} \quad \text{при} \quad \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right) < 0,11, \quad (16)$$

$$k_{\varphi} = 1,77 \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right)^{0,51} \quad \text{при} \quad 0,11 < \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right) < 0,2, \quad (17)$$

$$k_{\varphi} = \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right)^{0,05} \quad \text{при} \quad 0,2 < \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right) < 1,11, \quad (18)$$

$$k_{\varphi} = 1 \quad \text{при} \quad \left(\frac{w_r}{w_{\varphi} - \omega r} \cdot \frac{r}{R} \right) > 1,11, \quad (19)$$

$$\lambda = 3,4 \left(\frac{w_R}{\omega R} \right) + 1,12. \quad (20)$$

За результатами обробки експериментальних даних отримана залежність для визначення фактора зрошення f_L :

$$f_L = 1,97 \cdot \text{Re}^{0,14} Fr_{\text{вц}}^{0,12}, \quad (21)$$

де $Fr_{\text{вц}} = a_{\text{вц}} / g$ – відцентровий критерій Фруда.

Швидкість газу в критерії Re визначається як середньоінтегральна від r_0 до R за формулою

$$w_z = w_0 \frac{r_0}{R - r_0} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (22)$$

Результати розрахунків перепаду тиску за отриманою моделлю достатньо точно збігаються з даними експерименту, відхилення не перевищує $\pm 10\%$.

Гідродинаміка рідкої фази експериментально досліджувалася методами візуального спостереження та швидкісної фотозйомки. При цьому визначалися механізми утворення крапель у контактному пристрої ВМА. При обробці отриманих даних визначений розподіл дисперсної фази за розмірами в кожному з режимів. В результаті визначено, що мінімальні відхилення параметрів потоку від середніх значень (мінімальний ступінь полідисперсності) спостерігається в режимі утворення крапель при відриві від прутка сітки. Розмір крапель у цьому режимі також є мінімальним. Суттєва перевага утворення крапель при відриві від поверхні прутків (перехресть прутків) на усіх досліджених типах сітки починається за межею відцентрового прискорення більше 1000 м/с^2 .

Результати обробки даних дисперсних характеристик виконані за моделями усереднення через величину модального ($d_{\text{мод}}$) та об'ємно-поверхневого діаметрів (d_{32}).

Залежність $d_{\text{мод}}$ та d_{32} від відцентрового прискорення показує, що при значеннях більше 1000 м/с^2 розмір крапель у потоці практично не змінюється. Для робочого режиму величина $d_{\text{мод}} = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $d_{32} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

У результаті обробки експериментальних даних отримані залежності, що пов'язують усереднені параметри дисперсного потоку з режимними величинами та властивостями рідини:

$$d_{\text{mod}} = 0,79 \sqrt[3]{\frac{6 d_0 \sigma}{\rho_p \omega^2 r}}, \quad (23)$$

$$d_{32} = 1,07 \cdot d_{\text{mod}} = 0,845 \sqrt[3]{\frac{6 d_0 \sigma}{\rho_p \omega^2 r}}, \quad (24)$$

де d_0 – характерний геометричний розмір сітки (діаметр прутка), м.

Зіставлення розрахункових даних з результатами експерименту показали, що відхилення не перевищує $\pm 8\%$.

Залежність коефіцієнта масовіддачі в газі від швидкості обертання ротора показує його зростання до значення $\omega \approx 100$ рад/с, далі залишається практично сталими (рис.8) для контактних пристроїв з різним кроком між елементами. Збільшення швидкості обертання спричиняє додаткову турбулізацію газу. Одночасно з цим зростання швидкості обертання призводить до зменшення розміру крапель рідини, зростання монодисперсності потоку, збільшення швидкості та кінетичної енергії крапель. При швидкостях обертання ротору $\omega > 100$ рад/с відбувається вихід на сталий режим масовіддачі, подальше збільшення швидкості обертання практично не впливає на β_{yV} .

Збільшення швидкості, і відповідно витрати газу, призводить до практично лінійного зростання коефіцієнта масовіддачі. При цьому відбувається зростання об'єму фази, що проходить через об'єм апарата за одиницю часу. Як наслідок, збільшується кількість речовини, що передається між фазами.

При дослідженні впливу кроку між контактними елементами на коефіцієнт масовіддачі в газовій фазі виявлено наявність максимуму при значенні $\Delta r = 3 \cdot 10^{-3}$ м (рис.9).

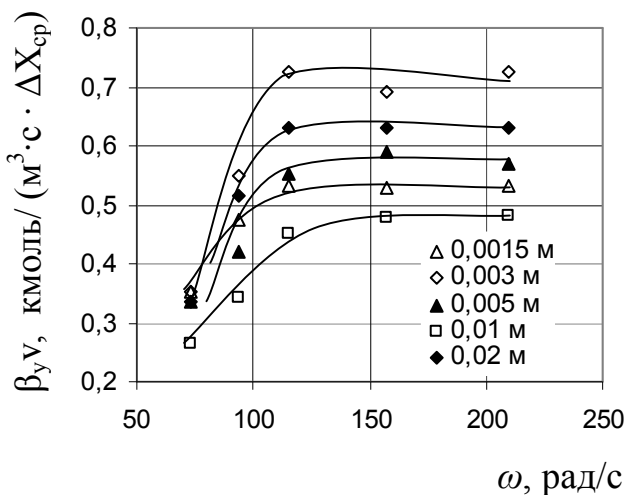


Рис. 8. Залежність об'ємного коефіцієнта масовіддачі в газі від швидкості обертання для контактних пристроїв з різним кроком між елементами. Швидкість газу – 1,74 м/с, щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

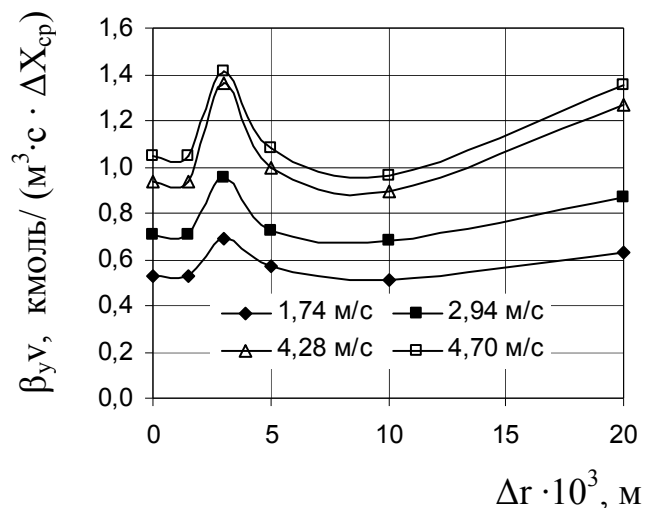


Рис. 9. Залежність об'ємного коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі від кроку між кільцевими елементами при різних швидкостях газу. Щільність зрошення $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, швидкість обертання – 157 рад/с

Збільшення кроку між контактними елементами до $3 \cdot 10^{-3}$ м супроводжується розвитком до максимального значення мікромасштабної турбулентності та відповідно, зростанням коефіцієнта масовіддачі. При подальшому збільшенні кроку між елементами контактного пристрою відбувається загасання турбулентності, що супроводжується зниженням ефективності масовіддачі на ділянці $(0 - 5) \cdot 10^{-3}$ м. В діапазоні $(10 - 20) \cdot 10^{-3}$ м зростання ефективності масовіддачі обумовлене збільшенням загальної швидкості руху газу в об'ємі ротора (через зменшення кількості контактних елементів) і відповідно росту внутрішньофазової турбулізації. Залежність коефіцієнта масовіддачі в рідині від швидкості обертання (рис.10) показує поступове його зростання в діапазоні $\omega = 70 - 150$ рад/с, далі ефективність масовіддачі залишається практично сталою. Зростання на першому етапі обумовлене зменшенням розміру краплі при збільшенні діючої відцентрової сили, відповідно збільшенням питомої поверхні контакту фаз. На другому етапі ($\omega > 150$ рад/с) залежність розміру крапель від $\omega^2 r$ менш виражена, і поверхня контакту фаз збільшується повільніше. Одночасно з цим при зменшенні діаметра краплі падає інтенсивність внутрішніх циркуляцій рідини в її середині. Таким чином, спільний вплив цих факторів призводить до практично сталого значення $\beta_x v$ при швидкостях обертання $\omega > 150$ рад/с.

При збільшенні швидкості газу ефективність масовіддачі в рідині зростає за характером, близьким до лінійного. Збільшення швидкості газу призводить до зростання міжфазного тертя і дотичних напруг, що діють на краплі в контактному пристрої. Це сприяє активізації внутрішньокраплинних циркуляцій і зростанню ефективності масовіддачі в рідині.

Збільшення витрати рідини призводить до росту ступеня масовіддачі через зростання кількості рідини в апараті й відповідно поверхні контакту фаз, що впливає на кількість перенесеної в одиниці об'єму маси.

Залежність коефіцієнту масовіддачі в рідині від кроку між елементами (рис. 11) показує, що максимальна ефективність спостерігається при $\Delta r = 1,5$ та $5 \cdot 10^{-3}$ м, при значеннях кроку більше $5 \cdot 10^{-3}$ м величина $\beta_x v$ падає. Падіння обумовлене виходом на стаціонарний режим масовіддачі, в якому ефективність процесів масопереносу нижча за нестаціонарні умови.

У результаті обробки експериментальних даних з масообміну в ВМА отримані залежності для розрахунку коефіцієнта масовіддачі в кожній з фаз. Для газової фази отримане рівняння

$$Nu_G = 0,038 Re^{1,09} \left(\frac{L}{G} \right)^{0,13} . \quad (25)$$

Для рідини залежність має вигляд

$$Nu_L = 720 Re^{0,92} \left(\frac{L}{G} \right)^{0,2} . \quad (26)$$

Розрахункові величини коефіцієнтів масовіддачі за отриманими залежностями збігаються з експериментальними значеннями з відхиленням не більше ніж $\pm 10\%$.

У п'ятому розділі наведені результати дослідно-промислової апробації ВМА із запропонованим контактним пристроєм. На базі дослідженої конструкції апарата побудована установка для ректифікації воднооцтової суміші у виробництві ацетату етиленгліколю. В результаті відбувається утилізація відходу виробництва з отриманням цільового продукту – концентрованої оцтової кислоти. Установка побудована на базі двох ВМА, кожен з яких виконує функцію відповідної частини ректифікаційної колони.

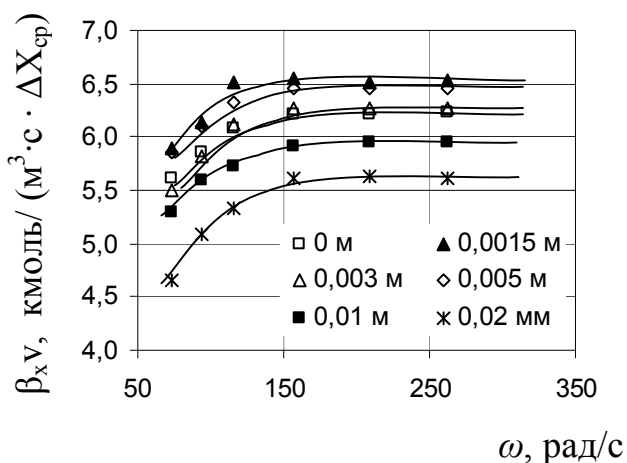


Рис. 10. Залежність об'ємного коефіцієнта масовіддачі в рідині від швидкості обертання для контактних пристроїв з різним кроком між елементами. Швидкість газу – 1,74 м/с, щільність зрошення – $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

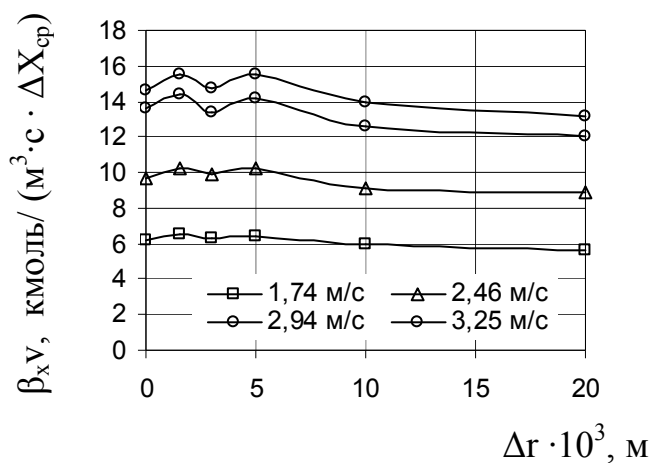


Рис. 11. Залежність об'ємного коефіцієнта масовіддачі в рідині від кроку між кільцевими елементами при різних швидкостях газу. Швидкість обертання – 157 $\text{рад}/\text{с}$, щільність зрошення – $0,116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

В результаті дослідно-промислової апробації визначені рекомендовані режимні параметри роботи установки (навантаження по фазах, парове та флегмове число). Застосування в даному випадку малогабаритних відцентрових масообмінних апаратів дозволяє значно знизити габаритні розміри обладнання (відповідно капітальні затрати та виробничі площі), а також досягається зниження експлуатаційних та енергетичних витрат на проведення процесу.

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу інтенсифікації процесів масообміну із застосуванням поля відцентрових сил та існуючих конструкцій відцентрових апаратів обґрунтований перспективний напрямок досліджень – організація багатократного диспергування рідини всередині обертового перфорованого ротору в режимі протитечійної взаємодії фаз.

2. Розроблена конструкція контактної пристрою для відцентрового масообмінного апарата, яка забезпечує високі масообмінні показники за рахунок організації взаємодії фаз у нестационарних гідродинамічних режимах.

3. Розроблено фізичну та математичні моделі гідродинаміки фаз у контактному пристрої, що дозволяють отримувати розподіл полів швидкості газу, гідравлічний опір контактної пристрою та характеристики дисперсної фази.

4. Проведені експериментальні дослідження гідродинамічних характеристик ВМА підтвердили адекватність отриманих теоретичних результатів. У результаті обробки експериментальних даних отримані залежності і коефіцієнти теоретичних моделей.

5. Експериментально отримані залежності масообмінних характеристик ВМА від конструктивних розмірів контактної пристрою та режимних параметрів його роботи. Визначені рекомендовані діапазони роботи апарата та конструктивні характеристики контактної пристрою. В тому числі рекомендована швидкість обертання, яка забезпечує відцентрову силу у зоні взаємодії фаз на рівні 1000 м/с^2 , та рекомендований крок між контактними елементами $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

6. Розроблено методику інженерного розрахунку ВМА з запропонованим типом контактної пристрою, визначені рекомендації до його проектування та експлуатації.

7. Результати досліджень були використані під час проектування ректифікаційної установки на базі двох відцентрових апаратів, яка пройшла успішні випробування в промислових умовах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пляцук Л.Д. Вплив конструктивних параметрів контактної пристрою на гідродинаміку в роторному ректифікаційному апараті / Л.Д. Пляцук, Д.О. Лазненко, С.В. Сидоренко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – 2006. – Вип.5/2006(40). – С.106–109.

Здобувачем проведений аналіз режимів розпилювання рідини залежно від величини відцентрової сили в контактному пристрої.

2. Сидоренко С.В. Визначення розміру крапель при диспергуванні рідини в малогабаритному роторному ректифікаційному апараті / С.В. Сидоренко // Вісник Сумського державного університету. – 2007. – №4. – С. 18 – 23.

Здобувачем визначені режими диспергування рідини в контактному пристрої відцентрового масообмінного апарата, теоретично отримані залежності для розрахунку розміру дисперсної фази у визначених режимах.

3. Гідродинаміка плівкової взаємодії фаз в роторних ректифікаційних апаратах / Л.Д. Пляцук, Д.О. Лазненко, В.Я. Стороженко, С.В. Сидоренко // Вісник Сумського державного університету. – 2007. – №3. – С.70–83.

Здобувачем отримане рівняння для визначення ділянки стабілізації плівки рідини та залежність, що враховує вплив газу на розподіл швидкості рідини по товщині плівки.

4. Пляцук Л.Д. Визначення гідравлічного опору відцентрового тепломасообмінного апарату / Л.Д. Пляцук, Д.О. Лазненко, С.В. Сидоренко // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – №1. – С.31–38.

Здобувачем розроблено модель руху газу через контактний елемент, створено модель для розрахунку опору зрошуваного контактного пристрою, а також виконані розрахунки за отриманими залежностями і проведено зіставлення з експериментальними результатами.

5. Лазненко Д.О. Створення установок рекуперації летких розчинників з використанням роторних тепломасообмінних апаратів / Д.О. Лазненко, С.В. Сидоренко // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов : Междунар. науч.-техн. конф., 2-6 июня 2008 г. : сборник научных статей. – Х., 2008. – С.400–403.

Здобувачем виконаний аналіз виробництв, що є джерелами забруднення атмосфери леткими органічними сполуками з виділенням схем очищення вентиляційних викидів та потенційного місця в них відцентрового масообмінного обладнання.

6. Лазненко Д.О. Дослідження гідравлічного опору відцентрового масообмінного апарату / Д.О. Лазненко, С.В. Сидоренко // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2009. – Вип.35. – Т.2. – С.122–127.

Здобувачем проведена експериментальна частина роботи, виконано обробку та зіставлення отриманих результатів.

7. Експериментальні дослідження гідродинаміки рідкої фази в контактному пристрої відцентрового масообмінного апарату / С.В. Сидоренко, Д.О. Лазненко, Л.Д. Пляцук, В.Я. Стороженко // Хімічна промисловість України. – 2009. – №6. – С.16–21.

Здобувачем виконана частина експериментальних робіт, розроблена методика обробки результатів, виконане опрацювання отриманих даних.

8. Лазненко Д.О. Технічне рішення утилізації відходу виробництва ацетату етиленгліколю з використанням відцентрового масообмінного обладнання / Д.О. Лазненко, С.В. Сидоренко // Вісник Національного технічного університету «ХП»: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2009. – №15. – С.3–8.

Здобувачем виконано інженерний розрахунок дослідно-промислової установки на базі двох ВМА, брав безпосередню участь у дослідженнях параметрів роботи установки в промислових умовах, виконував обробку отриманих результатів.

9. Пляцук Л.Д. Организация массообменных процессов в поле центробежных сил / Л.Д. Пляцук, Д.О. Лазненко, С.В. Сидоренко // Современные проблемы инновационных технологий в образовании и науке : Междунар. науч.-техн. конф., 12-13 июня 2009 г. : труды конф. – Шимкент, 2009. – С.191–196.

Здобувачем проведений аналіз існуючих способів організації взаємодії фаз та формування поверхні контакту в контактних пристроях відцентрових апаратів.

10. Пляцук Л.Д. Дослідження масовіддачі в рідкій фазі при роботі відцентрового масообмінного апарату / Л.Д.Пляцук, Д.О. Лазненко, С.В. Сидоренко // Хімічна промисловість України. – 2010. – №1. – С.27–30.

Здобувач брав безпосередню участь у проведенні експериментальних робіт, виконував математичне опрацювання результатів, підготовку матеріалів до публікації.

11. Лазненко Д.О. Дослідження масовіддачі в газовій фазі при роботі відцентрового масообмінного апарату [Електронний ресурс] / Д.О. Лазненко, С.В. Сидоренко // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2010. – №2(18). – Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2010-2/10ldomta.pdf>.

Здобувачем виконані експериментальні дослідження масообміну при лімітуючому опорі в газовій фазі, проведено обробку результатів експерименту.

12. Пат. на корисну модель №42657 Україна, МПК В 01 D 3/30. Відцентровий тепломасообмінний апарат / Лазненко Д.О., Сидоренко С.В.; Заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u200902470 ; заявл. 19.03.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. №13.

АНОТАЦІЯ

Сидоренко С.В. Гідродинаміка та масообмін в диспергуючому контактному пристрої відцентрового масообмінного апарата. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Сумський державний університет, Суми, 2011.

У дисертаційній роботі виконані теоретичні й експериментальні дослідження гідродинамічних та масообмінних характеристик відцентрового масообмінного апарата з розробленим типом контактної пристрою. Контактний пристрій конструктивно складається з вісесиметричних кільцевих контактних елементів, виконаних з металевої сітки. Елементи розташовані з кроком один від одного.

Розроблено фізичну та математичні моделі гідродинаміки фаз у контактному пристрої, отримані залежності для розрахунку швидкостей газу, гідравлічного опору та дисперсних характеристик рідини.

Експериментально досліджений вплив режимних (швидкості обертання ротора, швидкості газу та щільності зрошення) і конструктивних (крок між контактними елементами) параметрів контактної пристрою на гідродинамічні показники та кінетику масопереносу в апараті. За результатами обробки експериментальних даних визначені коефіцієнти теоретичних моделей гідродинаміки рідини та газу та узагальнені в критеріальній формі рівняння масовіддачі.

У результаті теоретичного моделювання та експериментальних досліджень розроблена методика інженерного розрахунку відцентрового апарата з дослідженим типом контактної пристрою. На підставі розрахунків

за створеною методикою розроблена та досліджена у виробничих умовах ректифікаційна установка на базі двох відцентрових масообмінних апаратів.

Ключові слова: гідродинаміка, масообмін, відцентровий масообмінний апарат, відцентрове поле, контактний пристрій, інтенсифікація.

АННОТАЦІЯ

Сидоренко С.В. Гидродинамика и массообмен в диспергирующем контактном устройстве центробежного массообменного аппарата. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Сумский государственный университет, Сумы, 2011.

Диссертационная работа посвящена теме исследования гидродинамических и массообменных характеристик центробежного массообменного аппарата с контактными устройствами предложенной конструкции.

Актуальность темы исследования определяется постоянно растущими потребностями в снижении материальных и энергетических затрат производств, повышении эффективности технологического оборудования и охране окружающей среды. Одним из перспективных путей интенсификации процессов химических производств есть их проведение в поле центробежных сил.

Проведенный литературный анализ существующего состояния центробежного массообменного оборудования позволил выделить ряд перспективных конструкций центробежных аппаратов. Также выявлено, что значительный ресурс для дальнейшей интенсификации процесса лежит в использовании нестационарных гидродинамических режимов при диспергировании жидкости. При этом достаточно интересно использование эффектов резкого повышения интенсивности массопереноса в период образования и разрушения капель (концевые эффекты).

Исходя из проведенного анализа, в качестве объекта исследования предложена новая конструкция контактного устройства для центробежного массообменного аппарата (ЦМА). Контактное устройство состоит из набора осесимметричных кольцевых контактных элементов, выполненных из металлической мелкоячеистой сетки и установленных на расстоянии один от другого. Такая конструкция обеспечивает многократные стадии образования и разрушения дисперсного потока в режиме противоточного взаимодействия с газовой фазой в поле центробежных сил.

Разработана физическая модель взаимодействия фаз в контактном устройстве ЦМА, которая учитывает начальные, режимные и конструктивные параметры рассматриваемого процесса и позволяет оценить их влияние на гидродинамику фаз.

Разработана математическая модель, описывающая движение газовой фазы в контактном устройстве, на основании которой получены зависимости

для определения гидравлического сопротивления и распределения скоростей газа в середине контактного устройства.

На основании физической модели определены режимы диспергирования жидкости на сетчатых контактных элементах. Получены уравнения, позволяющие определить размер образующейся капли в различных режимах диспергирования в конкретных условиях проведения процесса. Уравнения учитывают влияние на размер дисперсной фазы скорости газа, частоты вращения, физических свойств фаз и геометрических параметров сетки. На основании энергетического подхода получено уравнение для определения скорости движения капли в свободном пространстве между контактными элементами. Используя полученные зависимости, а также учитывая вероятность захвата летящей капли на поверхность сетки, получена модель для определения количества удерживаемой жидкости (в диспергированном состоянии) и соответствующей ей величины поверхности контакта фаз.

Экспериментальными методами исследований подтверждена адекватность полученных теоретических моделей гидродинамики фаз. Для газовой фазы получены коэффициенты уравнения для расчета гидравлического сопротивления ЦМА с контактным устройством предлагаемой конструкции. Для жидкой фазы экспериментально подтверждены режимы образования дисперсной фазы в контактном устройстве, получены распределения капель по размерам в каждом режиме диспергирования. Получены коэффициенты, дополняющие теоретические уравнения, что позволяет прогнозировать дисперсность жидкой фазы в контактном устройстве ЦМА.

Экспериментально исследованы массообменные характеристики ЦМА с диспергирующим контактным устройством. Исследования массообмена проводились в зависимости от режимных (частота вращения и нагрузки по фазам) и конструктивных (шаг между контактными элементами) характеристик ЦМА.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика инженерного расчета ЦМА с диспергирующим контактным устройством. Составлен алгоритм расчета, оформленный в виде блок-схемы.

Проведена опытно-промышленная апробация ЦМА с диспергирующим контактным устройством. При этом проводили анализ получаемых продуктов и сравнение с аналогичными показателями для колонных массообменных аппаратов. Результаты апробации показали высокую эффективность разработанного устройства.

Ключевые слова: гидродинамика, массообмен, центробежный массообменный аппарат, центробежное поле, контактное устройство, интенсификация.

SUMMARY**Sidorenko S.V. Hydrodynamics and mass transfer in dispersive contact device of mass transfer centrifugal apparatus. – The manuscript.**

Thesis for the academic degree of Candidate of Engineering Science, on speciality 05.17.08 — Processes and the Equipment of Chemical Technology. – Sumy State University, Sumy, 2011.

In dissertation performed theoretical and experimental study of hydrodynamic and mass transfer characteristics of mass transfer centrifugal apparatus with the proposed type of resistance device. Contact device is assembled with axisymmetrical ring contact elements made of metal mesh. Elements are spaced from one another.

The physical and mathematical model of the hydrodynamics of the phases in the contact device are elaborated, the dependences for calculating the rate of gas flow resistance and dispersion characteristics of the liquid are elaborated.

Experimental influence of regimen (rotor speed, velocity, gas density and irrigation) and design (a step between the contact elements) parameters of hydrodynamic resistance on device performance and mass transfer kinetics in the machine. As a result of experimental data processing coefficients for theoretical models of hydrodynamics of liquid and gas and mass transfer results are summarized in the form of criterial equations.

As a result of theoretical modeling and experimental research methodology of engineering calculations centrifugal apparatus of the investigated type of resistance device. Based on calculations by a method developed and investigated working conditions in the rectification unit on the basis of two mass transfer centrifugal machines.

Key words: hydrodynamics, mass transfer, mass transfer centrifugal apparatus, centrifugal field, contact device, intensification.

Підписано до друку 3.03.11

Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл - вид. арк. 0,9. Наклад 100 прим.

Замовлення №

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.