

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Бабенко Володимир Миколайович**



УДК 66.074:661

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ГІДРОДИНАМІКИ І МАСООБМІНУ В ПРОЦЕСАХ  
РЕКТИФІКАЦІЇ СУМІШІ РОЗЧИННИКІВ НА НОВОМУ КОНТАКТНОМУ  
ПРИСТРОЇ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Себко Вадим Вадимович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри хімічної техніки  
та промислової екології

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Білецький Едуард Володимирович**,  
Харківський торговельно-економічний інститут  
Київського національного торговельно-  
економічного університету, заступник  
директора з навчально-методичної та науково-  
педагогічної роботи

кандидат технічних наук, доцент  
**Лазненко Дмитро Олексійович**,  
Сумський державний університет,  
доцент кафедри прикладної екології

Захист відбудеться 2 вересня 2016 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, вул. Фрунзе, 21, м. Харків.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розіслано " 27 " липня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 64.050.05



Литвиненко О.А.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У світовій практиці для сучасного промислового виробництва виникає потреба в невеликих за розмірами, але досить ефективних масообмінних апаратах, при цьому спостерігається неухильне зростання капітальних витрат у вартості технологічного обладнання і, зокрема, тепло - і масообмінної апаратури. В цих умовах важливе значення набуває підвищення інтенсивності масообмінних процесів. Розробка перспективних масообмінних апаратів пов'язана зі зниженням як основних виробничих витрат, так і витрат на монтаж. У процесах поділу сумішей покращення дії апаратів може бути отримано у результаті створення тонких плівок і дрібних крапель рідини та бульбашок газу, а також значної швидкості оновлення міжфазної поверхні. Зазначене веде до істотного зменшення габаритів обладнання.

Створення надійних колонних апаратів для реалізації процесів ректифікації, а також методик їх розрахунку, є одним із напрямків досліджень хімічної технології. При цьому виникає доцільність поглибленого дослідження теоретичних положень роботи таких апаратів, а саме руху газорідних потоків і конструкцій контактних елементів, на яких відбувається взаємодія фаз. Результати таких досліджень можуть стати основою для оптимізації конструкції контактних елементів. Таким чином, удосконалення процесу масообміну при ректифікації суміші розчинників в колонних апаратах, розробка нових контактних пристроїв, за допомогою яких відбувається очищення від побічних компонентів і як наслідок, зменшення викидів у навколишнє середовище, є актуальним науково-практичним завданням, яке вирішує дисертаційна робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ "ХПІ" у рамках госпдоговору: "Розрахунок, технічна документація колони з регулярною насадкою для регенерації етанолу" (ПАТ «ФАРМСТАНДАРТ-БІОЛІК», м. Харків), де здобувач був відповідальним виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи – визначення параметрів гідродинамічних і масообмінних процесів ректифікації на основі поділу суміші розчинників при застосуванні нових насадочних елементів.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

- провести аналіз існуючих методів оцінки гідродинамічних і масообмінних процесів ректифікації, які використовуються для поділу гетерогенних систем;
- експериментально визначити стадії, що лімітують досліджувані процеси утворення рідинної плівки на поверхні контактної пристрою, та знайти фактори, що сприяють підвищенню ефективності процесу ректифікації;
- розробити експериментальний стенд для дослідження гідродинамічних і масообмінних процесів ректифікації при різних геометричних параметрах контактної пристрою;

– виконати експериментальне дослідження гідродинамічних і масообмінних характеристик процесу ректифікації за рахунок застосування раціональних конструкцій регулярних елементів для виявлення граничних умов;

– надати узагальнену математичну модель процесу гідродинамічної і масообмінної взаємодії потоків в ректифікаційній колоні, яка надає змогу дослідження ректифікації гетерогенних сумішей в умовах зміни геометричних параметрів регулярних контактних елементів;

– розробити науково обґрунтовані положення для модернізації типових колонних апаратів безпосередньо для виробництва та на основі проведення досліджень визначити рекомендації щодо реконструкції типового обладнання ректифікаційної колоні;

– запровадити результати наукових досліджень у виробництво та навчальний процес.

*Об'єкт дослідження* є гідродинаміка та масообмін в системі газ-рідина ректифікаційного колонного апарату, з використанням нових контактних елементів.

*Предметом досліджень* є закономірності процесу ректифікації гетерогенних сумішей при атмосферному тиску в апаратах з регулярними насадками.

**Методи дослідження** застосовані у дисертаційній роботі: гідродинаміку процесів досліджено у прозорих колонних апаратах з використанням створених типів контактних елементів; визначення складу початкової суміші, кубового залишку і продуктів ректифікації проведено методом газорідинної хроматографії; концентрації розчинника у початковій суміші та продуктах ректифікації визначено за допомогою комплексу повірочних ареометрів; визначення втрати напору у колонному апараті проведено рідинними дифманометрами; кількість ректифікату і флегми визначено за показниками ротаметра. Для обробки експериментальних даних і планування експериментів застосовано математичні методи з використанням програмних пакетів Microsoft Excel і MathCAD.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

– вперше створено нові контактні елементи для процесу поділу суміші розчинників (патент України на винахід. Пат. 61718 А Україна., B01D53/00, B01J19/30. Регулярна насадка DINAMIX для тепломасообмінних апаратів), який відрізняється від існуючих формою гофра та розташуванням ламелей в блоці;

– вперше експериментально отримана залежність питомого гідравлічного опору від швидкості газу та кількості зрошувальної рідини в ректифікаційній колоні при використанні нового контактного елемента;

– експериментально досліджено гідродинаміку створених контактних елементів в широкому діапазоні зміни швидкості газу і рідини, як для певних втрат напору, так і для наукового обґрунтування ефективності масообміну;

– одержала подальшого удосконалення методика розрахунку висоти і діаметра колонного апарату в залежності від питомої поверхні контактного елемента.

**Практичне значення одержаних результатів** для хімічної технології полягає у розробці та удосконаленні контактних елементів ректифікаційних апаратів колонного типу, як обладнання для енергозберігаючої технологічної схеми гетерогенного поділу сумішей.

На основі створених перспективних конструкцій контактних елементів надано рекомендації щодо геометричних параметрів контактних елементів та апарату при різних швидкостях газового потоку (до 1,5 м/с).

Виконано дослідження із застосуванням контактних елементів, які об'єднують підвищену пропускну здатність і малі гідродинамічні втрати напору, а також спроектовано та виготовлено ефективний ректифікаційний апарат продуктивністю 100 л/год.

Результати дослідження конструкцій контактних елементів та рекомендації щодо їх використання впроваджено на підприємстві ПАТ «ФАРМСТАНДАРТ-БІОЛІК» (м. Харків, акт впровадження від 02.04.2015 р.) при ректифікації суміші розчинників.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХПІ» під час викладання дисциплін: "Технологічне обладнання харчових та переробних виробництв" та "Стандартизація та сертифікація обладнання хімічних виробництв" при підготовці фахівців за спеціальністю 7(8).05050315 (акт впровадження від 02.10.2015р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати роботи що винесено на захист отримані здобувачем особисто. Серед них: встановлення залежності питомої поверхні насадки від втрат напору, геометричних параметрів контактного блоку від питомої поверхні насадки, залежність висоти колонного апарату від питомої поверхні насадки, залежність гідродинамічного опору для нового насадочного елемента від навантаження по газу та рідині; обробка експериментальних даних, математичне моделювання для визначення питомої поверхні, узагальнення отриманих результатів і формулювання основних висновків, розробка проекту документацій для госпдоговору, впровадження розроблених контактних пристроїв у виробництво.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації та її результатів доповідалися, обговорювалися й одержали позитивний відгук на: XI, XII Міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 2003, 2004 рр.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Екотрофологія – міст у майбутнє харчування людини» (м. Біла Церква, 2007р.); IV науково-технічній конференції «Ресурсоенергозбереження і енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 2012 р.), IV Міжнародній конференції «Розвиток науки в XXI столітті», (м. Харків, 2015 р.).

**Публікації.** Основні результати досліджень опубліковано в 13 друкованих наукових працях, з яких 7 статей – у наукових фахових виданнях України (1 – у науково-метричній базі даних), 1 деклараційний патент України на винахід, 5 – у матеріалах конференцій.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'ятих розділів, висновків, переліку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи складає 149 сторінок; з них 20 рисунків по тексту; 4 таблиці по тексту; список використаних джерел з 155 найменувань на 17 сторінках, 3 додатки на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, зв'язок дисертації з науковими програмами, планами та темами, визначено об'єкт, предмет, мету і задачі досліджень, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, показано особистий внесок здобувача, а також апробацію отриманих результатів дисертації.

У **першому розділі** проаналізовано сучасні підходи щодо проектування ректифікаційних апаратів та контактних елементів. Показано, що найбільш продуктивними представляються колонні апарати, що відносяться до групи апаратів з фіксованою поверхнею контакту, в яких постійно оновлюються плівки рідини і розвивається у вільному обсязі поверхня за рахунок інтенсивного утворення плівки на осередках контактного елемента. Головною перевагою роботи таких апаратів є велика поверхня фазового контакту, створена в одиниці об'єму контактного елемента. Іншою суттєвою перевагою колонних апаратів, оснащених сучасними контактними елементами, є невеликі габаритні розміри, висока продуктивність та нижчі енерговитрати, ніж в апаратах зі звичайними насадками і тарілчастими колонами.

На основі аналізу науково-технічних та патентних джерел інформації визначено основні напрямки досліджень дисертаційної роботи: виникає необхідність математичного моделювання апаратурних рішень процесу ректифікації суміші розчинників, що дозволяє встановити зв'язок між основними режимно-технологічними, фізико-хімічними, гідродинамічними факторами і інформативними параметрами ректифікаційних установок, та необхідність виявляти вплив кожного з гідродинамічних факторів на конкретні критерії процесу.

У **другому розділі** наведено методологію досліджень, виконаних в дисертаційній роботі (рис. 1). Описано методику постановки експериментів та обробки отриманих даних, наведено методи та прилади для вимірювання гідродинамічних характеристик і температури в різних частинах досліджувальної лабораторної установки.

Обґрунтовано використання матеріалу регулярного насадочного елемента та допоміжних пристроїв, зокрема розподільовача зрошувальної рідини. Наведено дослідження, що здійснювались у широкому діапазоні швидкості газу та рідини, які необхідні як для визначення втрат напору, так і для прогнозу

ефективності при масообміні. Для виведення емпіричної формули використано виробничі показники експлуатації вже існуючих контактних пристроїв, які широко використовуються на хімічних та переробних підприємствах для поділу суміші розчинників на колонних апаратах.

Визначена залежність, що дозволяє порівнювати відповідні характеристики апаратів з відомими і запропонованими контактними елементами, зокрема втрати напору

$$\Delta P_B = \frac{\Delta P_{г-р} - \Delta P_г}{\Delta P_г}, \quad (1)$$

де  $\Delta P_{г-р}$  і  $\Delta P_г$  – втрати напору в двофазному і однофазному потоках відповідно при одній і тій же витраті газу,  $\Delta P_B$  – відносна втрата напору, Па.

Величини  $\Delta P_{г-р}$  і  $\Delta P_г$  можуть бути визначені експериментально на основі системи розчинник – вода. Співвідношення (1) встановлює залежність між геометричними характеристиками порівнюваних насадочних елементів і дозволяє виконати прогноз ефективності застосування нових насадочних елементів у порівнянні з відомими.



Рисунок 1 – Загальна схема досліджень дисертаційної роботи

Наведено що, при рівних швидкостях газу досліджуваний контактний елемент повинен мати: мінімальні втрати напору в однофазних і в двофазних

потоках, а також контактну поверхню, яка перевищує поверхню відомого насадочного елемента при близьких співвідношеннях вільного об'єму. Як об'єкт порівняння прийнята плоско-паралельна насадка, найкраща з точки зору гідродинаміки (в тому числі і мінімального гідравлічного опору). Підвищення питомої поверхні, яка є властивою для плоскопаралельної насадки, на практиці досягається переведенням її в об'ємну згідно з аналогією відносно комбінованих регулярних насадок. На основі проведених досліджень створено лабораторний контактний пристрій для процесу поділу гетерогенних систем з робочою назвою DINAMIX.

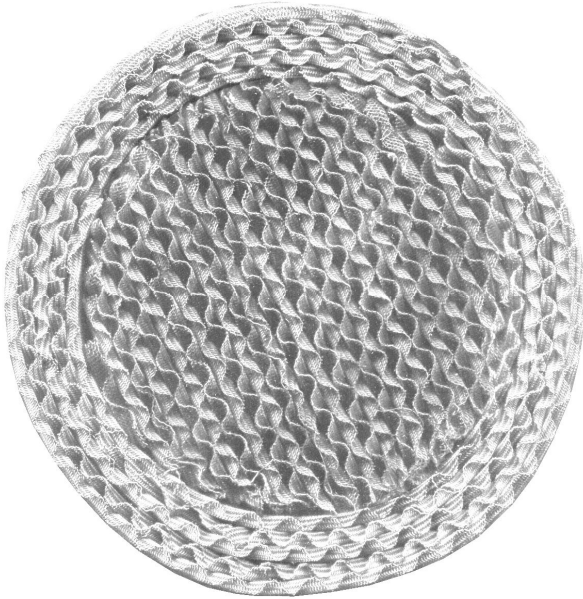


Рисунок 2 – Елемент регулярної насадки

Збільшення робочої поверхні забезпечується як шляхом заміни утворюючих плоскопаралельну насадку штампованих листів на профільовані смуги з шириною від 50 до 100 мм, так і розміщенням пакетів один над другим без зазору між подальшими по висоті рядами насадки. Таким чином, обрано для гідродинамічних випробувань в стендових умовах два варіанти регулярної комбінованої насадки з синусоїдальним гофром і кутом нахилу до вертикалі  $45^\circ$ , з висотою листів в пакеті 60 мм і сумарною висотою блоків 1000

мм. Загальний вигляд елемента регулярної насадки наведено на рис. 2.

В результаті розробки нових блоків комбінованої насадки отримано упорядковану геометричну поверхню, перераховану з урахуванням кількості витрачання матеріалу на одиницю об'єму, яка дорівнює  $1050\text{--}1100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Запропонований контактний елемент вигідно відрізняється від аналогічних збільшеною питомою поверхню, нижчим гідродинамічним опором, більшим вільним об'ємом та простотою виготовлення.

Комбінована регулярна насадка має вертикальні ромбовидні канали, з округленими кутами, які утворюються рядом смуг металотканого матеріалу, встановлених на ребро і розташованих паралельно один одному; смуги мають на верхній кромці вид синусоїди з постійним кроком, на які, в свою чергу, встановлюються блоки, при цьому кожен наступний блок повернений щодо попереднього на  $90^\circ$ . Зазначені особливості конструкції дають можливість: створити пакет насадок, який поєднує малу металоємність з міцністю; значно спростити процес виготовлення насадки, а також використовувати при виготовленні різні металоткані матеріали; значно збільшити робочу впорядковану поверхню контакту та кратність її відновлення на регулярній насадці.

**Третій розділ** присвячено експериментальному дослідженню на гідродинамічній масообмінній установці, яка виготовлена для випробувань контактних пристроїв (рис. 3).

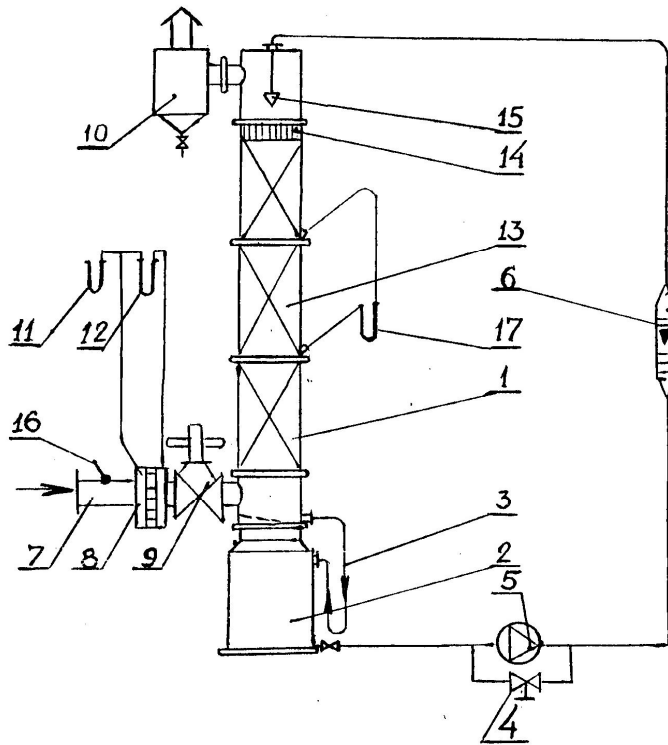


Рисунок 3 – Схема установки для гідродинамічних досліджень насадок:

- 1 – колона; 2 – збірник рідини;
- 3 – гідро-засув; 4 – лінія нагнітання рідини;
- 5 – насос; 6 – ротаметр; 7 – повітропровід;
- 8 – діафрагма; 9 – засувка; 10 – сепаратор;
- 11, 12 – манометри; 13 – досліджуваний пакет насадки; 14 – розподільник рідини на зрошення; 15 – розпилювач; 16 – термометр;
- 17 – мікроманометр.

одного пласта насадки на інший через руйнування і створення плівок зрошувальної рідини і через деяке збільшення часу контакту.

Кількість повітря в процесі дослідів змінювали в межах від 5 до 400 м<sup>3</sup>/год.

У серії дослідів досліджено два різновиди нової насадки:

1 – комбінована насадка з металотканої сітки з осередком 0,4 x 0,4 мм і висотою гофра 2,5 мм.

2 – комбінована насадка з металотканої сітки з осередком 0,4 x 0,4 мм і висотою гофра 3,0 мм.

В роботі досліджено значення гідравлічного опору колонного апарату з різними насадочними пристроями. У кожному експерименті здійснюється 4–5 серій вимірювань падіння тиску при різних швидкостях газу.

Як моделююче середовище застосовувалися повітря, вода, суміші розчинників вода – етанол, вода – метанол – етанол – ацетон. На першому етапі досліджень порівнювалися існуючі аналоги з розробленим контактним елементом. Аналіз табличних значень свідчить про те, що опір, як сухої, так і зрошеної комбінованих насадок, в яких кожен з пакетів розташовано з поворотом на 45°С, перевищує опір цих же пакетів, розташованих правильними рядами з поворотом на 90°С при абсолютно ідентичних умовах. Це пояснюється значним збільшенням кількості «лобових ударів» газового потоку по торцевим граням кожного з наступних пакетів. Більш того, в двофазному потоці ці значення становлять значну величину саме при переході з

В результаті розробки комбінованої насадки отримано підвищення діапазону робочих швидкостей газу з 1,0–1,5 до 1,6–1,9 м/с в умовах низьких втрат напору (до 80–100 Па на 1 м висоти). Разом з тим, збільшення поверхні насадки більш  $1100 \text{ м}^2/\text{м}^3$  має і негативні моменти: підвищуються втрати напору в цій насадці; зростає нестабільність при роботі на маленьких навантаженнях зі зрошення через фізичну вадку кількості флегми.

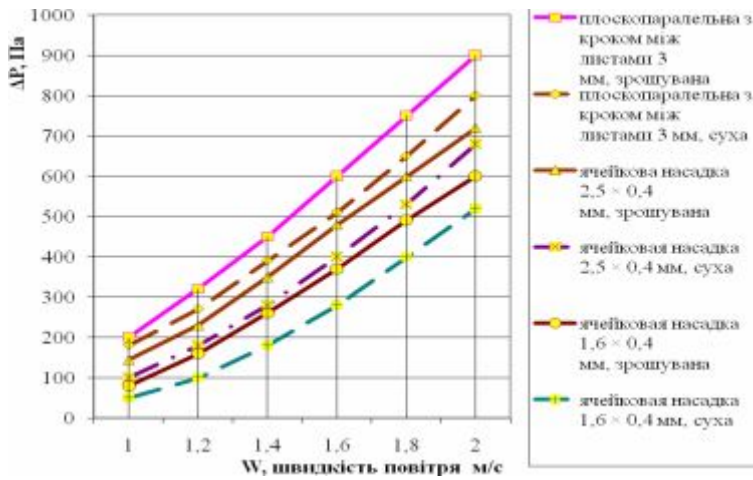


Рисунок 4 – Залежність питомого гідравлічного опору від швидкості повітря в колоні з різними насадками

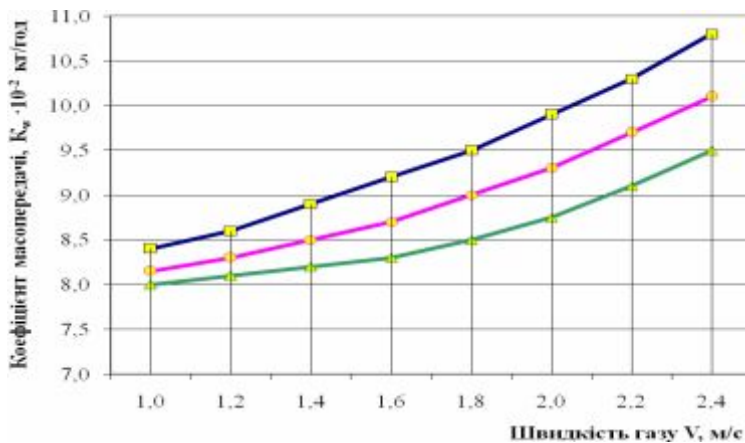


Рисунок 5 – Залежності об'ємних коефіцієнтів масопередачі від швидкості газової фази для досліджуваного колонного апарату:

- – з регулярною насадкою з осередком в сітці 0,4 x 0,4 на 2,7 мм;
- – з регулярною насадкою з осередком в сітці 0,4 x 0,4 на 2,9 мм;
- Δ – з регулярною насадкою з осередком в сітці 0,4 x 0,4 на 3,3 мм

масопереносом і тертям, вказує на підвищені витрати енергії газового потоку для утворення поверхні контакту фаз.

На рис. 5 представлено залежності об'ємних коефіцієнтів масопередачі від швидкості газової фази для досліджуваного напівпромислового колонного апарату. Аналізуючи отримані результати досліджень, слід зазначити, що втрата тиску запропонованої регулярної насадки з осередком в сітці 0,4 на 0,4 мм і

втрата напору (до 80–100 Па на 1 м висоти). Разом з тим, збільшення поверхні насадки більш  $1100 \text{ м}^2/\text{м}^3$  має і негативні моменти: підвищуються втрати напору в цій насадці; зростає нестабільність при роботі на маленьких навантаженнях зі зрошення через фізичну вадку кількості флегми.

Саме тому, як основний варіант регулярної насадки обрано комбіновані пакети з висотою гофра 2,75 мм та з загальною висотою 60 мм.

Відповідно до експериментальних даних щодо залежності питомого гідравлічного опору від швидкості повітря в колоні з різними насадками (рис. 4) отримуємо, що у варіанті комбінованої насадки з висотою гофра 2,75 мм при підвищенні питомої поверхні насадки (на 23–25% в порівнянні з існуючими), практично зберігаються втрати напору на сухій насадці, але підвищуються втрати напору для зрошеного блока, що згідно з прийнятою аналогією між

висотою гофра 2,75 мм на 28–32% нижче порівнюваних аналогічних, але з іншими геометричними характеристиками, при ідентичних швидкостях газової фази.

При застосуванні регулярної комбінованої насадки, виготовленої з металотканої нержавіючої сітки з квадратною коміркою 0,4 на 0,4 мм синусоїдальним профілем і висотою між вершинами пластин насадки в прилеглих один до одного рядах 2,75 мм, розрахована висота колонної частини, яка відповідає одиниці переносу, а, отже, і загальна висота ректифікаційного апарату становить на 30–35% менше, ніж для відомої плоскопаралельної насадки. Проведено результати дослідження процесу ректифікації розчинника в напівпромисловому колонному апараті з новою регулярною насадкою. Дослідження здійснено за допомогою установки, яка складається з колонного апарату, з внутрішнім діаметром 250 мм і висотою 3 м, з відповідним допоміжним обладнанням. Дослідження із застосуванням інших насадок здійснено за аналогічних умов для газу та рідини при протиточних режимах.

На основі проведених експериментальних досліджень розраховано ступінь вилучення розчинника із початкової суміші рідини, табл. 1.

Таблиця 1 – Основні технологічні показники процесу регенерації розчинників в колонному апараті з регулярною насадкою

Швидкість газу, м/с	Температура, °С		Опір колонного апарату (на 1 м висоти), Па	Вміст розчинника		Ступінь вилучення, %
	пара в кубі	пара в дефлегматорі		в кубі, % об	в парі, % об	
1,50	80	78	290	0,20	0,96	99,0
1,75	80	78	300	0,25	0,95	98,5
2,00	81	78	320	0,30	0,94	98,0
2,25	82	78	350	0,40	0,92	97,0

Отримані результати свідчать про те, що залишковий вміст розчинника в кубовому залишку знаходиться в межах 0,2–0,4% об'ємних, що в два рази менше, ніж на колонному обладнанні зі звичайною насипною насадкою, раніш встановленому на підприємстві, це забезпечує більший вихід кінцевого продукту за менший час роботи. У табл. 1 наведено основні технологічні показники процесу регенерації суміші розчинників в колонному апараті з діаметром 250 мм з регулярною насадкою (з осередком в сітці 0,4 x 0,4 на 2,75 мм). У кожному подальшому експерименті варіювалося навантаження за парою, числом флегми і відбором розчинника у вигляді кінцевого продукту. Для забезпечення необхідного рівня екстракції складних вуглеводнів застосовували масло з температурою 95°С, з якого кінцевий продукт вимивався сумішшю вода – розчинник.

Дослідження проведені на стендовій установці, надали змогу здійснити масштабний перехід, встановити ректифікаційну колону замість існуючої на

виробництві у цеху легкозаймистих рідин (ЛЗР), провести оцінку похибок вимірювань і визначити інтервал застосування контактної пристрою.

У четвертому розділі наведено математичне моделювання процесу гетерогенного поділу суміші на регулярній насадці, досліджено залежності основних конструктивних характеристик і геометричних параметрів регулярних контактних пристроїв ректифікаційних апаратів від технологічних факторів, а саме від питомої поверхні насадки. Критерієм, який визначає інтенсивність утворення поверхні контакту фаз, а також оновлення поверхні контакту в ректифікаційних апаратах, може слугувати висота еквівалентна теоретичній тарілці. Для порівняння контактних пристроїв з іншими, з подібними параметрами, обрана важлива характеристика процесу масопередачі – величина питомої поверхні насадки.

Для дослідження залежності питомої поверхні насадки – основного параметру ректифікаційної установки, від висоти гофра в ламелі контактної блока використано математичний метод поліноміальної апроксимації на основі MS Excel. Отримано емпіричні формули для визначення питомої поверхні ( $y_1$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ) в залежності від розміру гофри ( $x$ , м) та висоти колонного апарату ( $z$ , м) від питомої поверхні ( $y_2$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ):

$$y_1 = 3,901x^2 - 126,1x + 1248, \quad (2)$$

$$y_2 = 0,285z^4 - 8,641z^3 + 98,05z^2 - 550,6z + 1897. \quad (3)$$

Формули (2) і (3) встановлюють залежність конструктивних параметрів ректифікаційної колони (питомої поверхні  $y_1, y_2$ ) від основних технологічних факторів, таких як висота гофри блока та самого апарату.

Оскільки на практиці по-різному оцінюють процес масопередачі, для кращого зіставлення і порівняння результатів дослідження, в роботі розраховано наступні параметри: висота еквівалентна теоретичній тарілці (ВЕТТ), число теоретичних тарілок (за методикою запропонованою В.В. Кафаровим), визначено об'ємний коефіцієнт масопередачі на 1 м висоти насадки і число одиниць переносу. Проведено дослідження масообмінних процесів при використанні нових контактних елементів. Показано, що залежність ВЕТТ від навантаження по газу має різний характер при збільшенні  $W$ . При невеликих значеннях швидкості газу ефективність масовіддачі збільшується і ВЕТТ знижується, а потім встановлюється на постійному рівні. Найменша швидкість, при якій забезпечується стабільна ефективна робота колони, в залежності від навантажень по рідині змінюється від 0,2 до 0,3 м/с.

Слід визначити, що на значення ВЕТТ більший вплив здійснює саме рівномірність розподілу рідини, котра надходить на зрошення насадочного шару у верхній частині апарату.

Експериментально отримано значення ефективності поділу, що виражено через ВЕТТ, в межах від 50 до 100 мм, при цьому гідравлічний опір 1 м насадочного шару не перевищує 1000 Па, в діапазоні зміни навантажень за рідиною і газом (при  $L$  від 5 до 60  $\text{м}^3/\text{м}^2$  і  $W$  від 0,5 до 3 м/с).

Висота одиниці переносу (ВОП), віднесена до газової фази, визначається як

$$\text{ВОП} = \frac{H}{N_{\text{ог}}}, \quad (4)$$

де  $H$  – висота насадки (м),  $N_{\text{ог}}$  – число одиниць переносу в газовій фазі.

Висота, еквівалентна теоретичній тарілці (БЕТТ), визначається залежністю

$$\text{БЕТТ} = \frac{H \cdot \ln S_0}{\ln(1 - \psi) - \ln\left(1 - \frac{\psi}{S_0}\right)}. \quad (5)$$

Число теоретичних тарілок визначається

$$n = \frac{N_{\text{ог}}(1 - S_0)}{2,3 \cdot \lg\left(\frac{1}{S_0}\right)}. \quad (6)$$

Об'ємний коефіцієнт масопередачі визначається

$$K_v = \frac{N_{\text{ог}} \cdot W \cdot 3600}{H}, \quad (7)$$

де  $W$  – лінійна швидкість повітря,  $S_0$  – фактор відгонки (в режимі нескінченної флегми наближається до 1, оскільки вся кількість пари з дефлегматора, у вигляді рідини, повертається в колону),  $\psi$  – ступінь відгону розчинника  $\psi = (x_1 - x_2)/x_1$ , де  $x_1, x_2$  – початкова і кінцева концентрації розчинника в розчині на вході і виході з колони (кг/кг). Висота шару насадки обиралася рівною 1 м, тоді формула по визначенню висоти одиниці переносу має такий вигляд

$$\text{ВОП} = \frac{1}{N_{\text{ог}}}. \quad (8)$$

Для визначення числа теоретичних тарілок при  $S_0 < 1$  отримаємо вираз, що зв'язує цю величину з числом одиниць переносу,

$$n = \frac{\text{ВОП}^{-1}(1 - S_0)}{\ln\left(\frac{1}{S_0}\right)}. \quad (9)$$

Тоді висота, еквівалентна теоретичній тарілці визначається формулою

$$\text{БЕТТ} = \frac{1}{n}. \quad (10)$$

Результати досліджень, представлених у четвертому розділі дисертації, орієнтовані на оптимальне проектування колонних установок з новими контактними елементами й удосконалення вже діючих насадок. Адекватність формул (4) та (10) реальному процесу перевірено порівнянням експериментальних значень. При цьому похибка отриманих результатів не перевищувала 5%, що підтверджується похибкою застосовуваної вимірювальної апаратури.

Залежність (7) дозволяє розрахунковим шляхом визначити величину коефіцієнта масопередачі досліджуваного зразка у вигляді співвідношення з коефіцієнтом масопередачі відомого зразка: з урахуванням поправок на співвідношення еквівалентних діаметрів, швидкостей газу і еквівалентів значень роботи, витраченої на утворення поверхні контакту фаз. Досліджено передумови інтенсифікації процесу гетерогенного поділу сумішей, тобто збільшення кількості вилученого розчинника за одиницю часу, яку можна здійснити збільшенням багатofакторних змінних  $H$ ,  $W$ , які входять в основне рівняння масопередачі. Одним з факторів, які значно впливають на гідродинаміку процесу, є швидкість газової фази, зі зростанням якої зростає коефіцієнт масопередачі для турбулентного режиму роботи колонного апарату.

Експериментально доведено, що для процесів з протитечійним рухом газу і рідини можливості збільшення швидкості газу обмежуються захлинанням апарату, де швидкість газу становить 3,1–3,3 м/с. Проте, захлинання супроводжується значним зростанням опору апарату, який для ряду процесів, в тому числі і для вилучення цільових продуктів при ректифікації, неприпустимо. Тому доводиться обмежувати швидкість газової фази до 1,5 м/с так, щоб втрати напору не перевищували 1000 Па на 1 метр висоти контактної шару.

В ході роботи відзначено, що з числа названих вище складових, здебільше втрати напору в елементах масообміну пов'язані з формуванням поверхні контакту фаз. Інші – це втрати в допоміжних пристроях, необхідних для раціонального конструктивного оформлення апарату. Важливим фактором є те, що при застосуванні запропонованих насадочних пристроїв немає необхідності в додаткових перерозподільвачах.

Таким чином, для забезпечення максимальної продуктивності установки в умовах, пов'язаних з обмеженими втратами напору, необхідно прагнути до мінімальних втрат у допоміжних елементах. Доцільність встановлення тільки одного зрошувального пристрою пояснюється здатністю контактних елементів захоплювати стікаючу рідину зі стінки колони та розподіляти її у центральні частини регулярної насадці.

Виходячи з цього положення, проведена експериментальна оцінка можливості підвищення швидкості газу на прикладі апаратів з регулярними насадочними елементами, поширеними в сучасній хімічній промисловості. При цьому, для стандартної плоско-паралельної насадки з відстанню між листами 5 мм, швидкість газу на початку підвісання становить близько 3,1–3,3 м/с, для розбавлених водних розчинів.

Таким чином на основі експериментальних даних підтверджено, що максимально допустима швидкість в апараті не повинна перевищувати 65–70% від швидкості захлинання, тобто може становити близько 2,2–2,5 м/с.

Фактична швидкість газу в сучасних колонних апаратах з регулярними

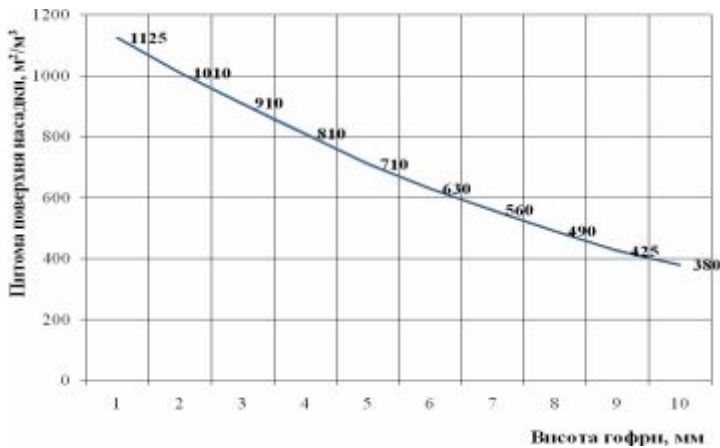


Рисунок 6 – Залежність геометричній поверхні насадки від висоти гофра

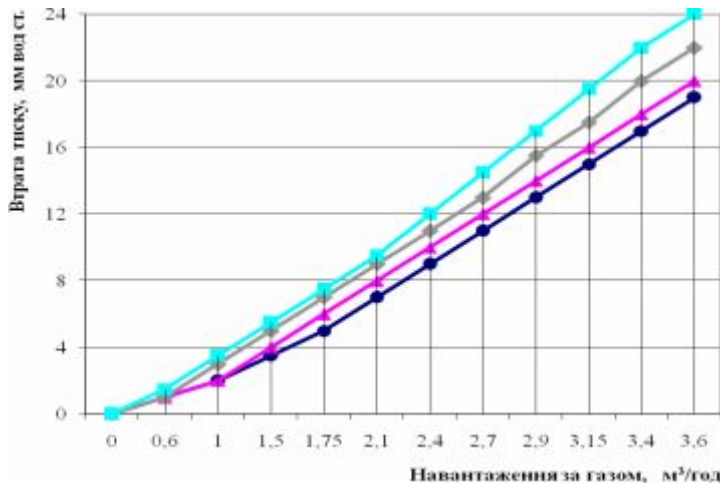


Рисунок 7 – Залежність гідродинамічного опору від навантаження за газом (парою) при наступних навантаженнях зі зрошування поверхні насадочного шару:

- – 0,0 м<sup>3</sup>/год на 1 м<sup>2</sup>; Δ – 60 м<sup>3</sup>/год на 1 м<sup>2</sup>;
- ◇ – 140 м<sup>3</sup>/год на 1 м<sup>2</sup>; □ – 220 м<sup>3</sup>/год на 1 м<sup>2</sup>

органічних розчинників, виконано вибір основних технологічних умов ведення процесів в промислових установках. На рис. 6 представлена залежність геометричної поверхні насадки від висоти гофри. При зменшенні висоти гофри менше ніж 2,5 мм непропорційно зростають витрати матеріалу сітки на виготовлення насадочних пристроїв. У підсумку це збільшення економічно не виправдовується. Отримано залежність (рис. 7) гідродинамічного опору від навантаження за газом для колонного апарату з внутрішнім діаметром 250 мм.

З графіка представленого на рис. 8, встановлено залежність гідродинамічного опору від температури зрошувальної рідини (при постійній

насадками для поділу гетерогенних систем не перевищує 2,5 м/с. Запропоновано інтервал швидкості газу для процесу поділу суміші розчинників в діапазоні від 0,5 до 2,5 м/с.

Отже реально досяжним є дворазове зменшення швидкості газової фази для використання контактної пристрою для вакуумної ректифікації термолабільних сумішей та рідин з низькою температурою кипіння при атмосферному тиску.

У п'ятому розділі наведені способи і прийоми удосконалення та оптимізації ректифікаційних установок з контактними елементами для проведення процесу поділу гетерогенних систем, а також представлена методика розрахунку висоти і діаметра колонного апарату в залежності від питомої поверхні контактної елемента. На основі запропонованого математичного опису процесу ректифікації

швидкості газу, що дорівнює 1 м/с). При цьому раціональною можна вважати ту схему, яка за інших рівних умов забезпечує максимальну питому поверхню насадки, достатню для поділу гетерогенних систем з урахуванням відповідних норм при мінімальних енергетичних витратах.

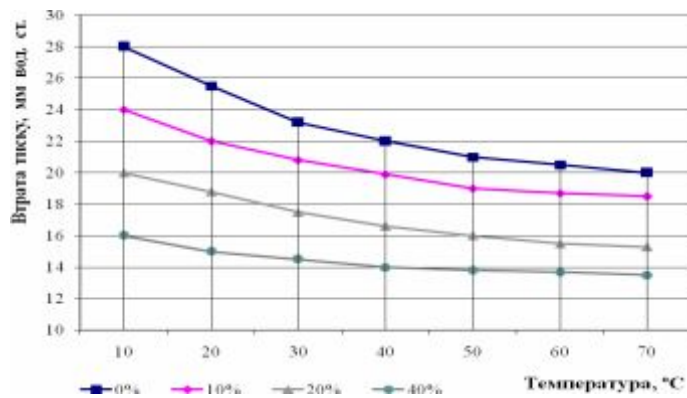


Рисунок 8 – Залежність гідродинамічного опору від температури зрошуваної рідини, від води – □ і ◇, та системи вода-етанол – ○ і Δ, при постійній швидкості газу 1 м/с

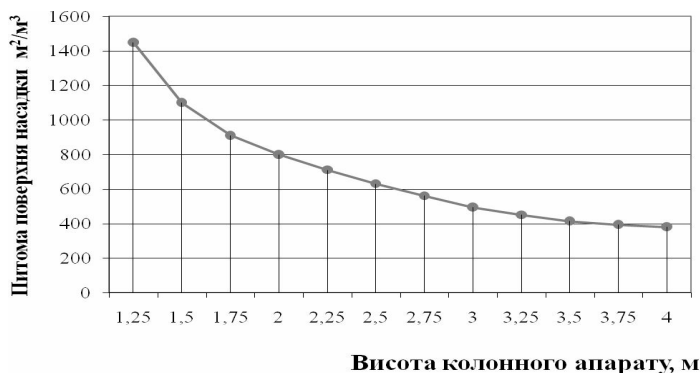


Рисунок 9 – Залежність висоти колонного апарату від питомої поверхні насадки

є визначальними при виборі основних параметрів ректифікаційних установок. Застосування нових насадочних пристроїв з питомою поверхнею більше 600 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> (рис. 9) дає можливість знизити висоту колонного апарату і як наслідок, зменшити капітальні та енергетичні витрати при отриманні кінцевої продукції.

Одержані результати досягаються за рахунок використання сучасних контактних елементів з упорядкованою внутрішньою структурою. Запропоновані технічні рішення, необхідно використовувати як при проектуванні нових колонних апаратів, так і при вдосконаленні діючих.

У додатках представлені табличні залежності ступеня вилучення розчинника при ректифікації, зведені таблиці, патент України на винахід та акти впровадження результатів роботи в учбовий процес та на підприємство ПАТ «ФАРМСТАНДАРТ-БІОЛІК» (м. Харків).

В діапазоні температур від 10 до 40 °С (рис. 8) спостерігається рівномірне лінійне зменшення опору, яке пов'язане в основному зі зниженням коефіцієнту в'язкості рідин, що повністю збігається з теорією масопереносу. На рис.9 представлена залежність висоти колонного апарату від питомої поверхні насадки виготовленої з металотканинної сітки. Виходячи із емпіричних формул, розрахованих для основного компонента розчинника, який виділяється із суміші, отримано розрахунок для визначення необхідної питомої поверхні в залежності від висоти гофри контактного елемента і розміру самого колонного апарату.

Наведені вище дані свідчать, що режимно-технологічні умови реалізації процесу гетерогенного поділу сумішей на регулярній насадці

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання – виявлення закономірностей гідродинаміки і масообміну в процесах ректифікації суміші розчинників на новому контактному пристрої та розробка науково-обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення ефективності роботи ректифікаційного апарату. За результатами досліджень зроблено наступні висновки:

1. Встановлено обмеженість практичного використання існуючих методів підвищення гідродинамічних і масообмінних процесів ректифікації, які використовуються для поділу суміші розчинників. Обґрунтовано перспективність побудови нових колонних контактних пристроїв, яка полягає в меншому гідравлічному опорі і збільшеній питомій поверхні.

2. Виявлено, що основними лімітуючими стадіями для існуючих контактних пристроїв є: підвищений гідродинамічний опір та необхідність встановлення додаткових розподільних пристроїв. Підвищення питомої поверхні є одним з основних факторів що збільшує ефективність ректифікаційного колонного апарата.

3. Створено експериментальний стенд для дослідження процесу ректифікації, особливість якого полягає у можливості використання контактних пристроїв з різними геометричними параметрами, та наявність прозорих стінок, що дозволяє візуально оцінювати розподіл рідини в колоні.

4. Отримано експериментальні залежності втрат тиску в колоні при різних геометричних характеристиках контактного елемента, що дозволило знайти граничні умови використання контактних пристроїв для розділу суміші розчинників. Виявлено, що оптимальна висота гофра становить 2,75 мм, при синусоїдальному профілі металічної сітки з діаметром дроту 0,16 мм і осередком 0,4 на 0,4 мм.

5. Запропоновано математичний опис процесу гідродинамічної і масообмінної взаємодії потоків в ректифікаційній колоні, що надає змогу дослідження ректифікації суміші розчинників при встановленні різних регулярних контактних елементів. Розрахована величина висоти еквівалентній теоретичній тарілці (ВЕТТ) для чисел флегми від 3 до 8.

6. Науково обґрунтовано положення, що дозволило запропонувати, виготовити та експериментально дослідити ряд контактних елементів з діаметрами від 50 до 250 мм, що працюють в діапазоні швидкості газового потоку від 0,3 до 2,2 м/с. Надано рекомендації щодо реконструкції колонного обладнання з використанням нових контактних пристроїв, які передбачають застосування одного зрошувального пристрою і встановлення під ним контактного елемента зі збільшеним вільним об'ємом, що забезпечує зниження гідравлічного опору на 25–30%.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємстві ПАТ «ФАРМСТАНДАРТ-БІОЛІК» (м. Харків), а також у навчальний процес кафедри хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХП».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бабенко В.Н. Работа гофрированного регулярного насадочного элемента в загрязненных средах / М.А. Цейтлин, В.Н. Бабенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 26. – С. 161-166.

*Здобувачем досліджено роботу контактного елемента з різними органічними розчинниками.*

2. Бабенко В.Н. Работа модернизированного элемента регулярного насадочного устройства в качестве перераспределителя жидкостного потока в колонном аппарате / М.А. Цейтлин, В.Н. Бабенко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – № 28 – С. 112-117.

*Здобувачем доведена перспективність застосування регулярного контактеного елемента в якості розподілювача рідинного потоку в колонному апараті.*

3. Бабенко В.Н. Особенности работы газожидкостной системы на трубчатых решетках со стабилизатором пены в виде блока регулярной насадки / В.Н. Бабенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №3 – С. 47-50.

4. Бабенко В.М. Дослідження особливостей роботи газорідинної системи колонного апарату зі стабілізатором пінного шару / В.М. Бабенко, І.О. Лаврова // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №4 – С. 43-50.

*Здобувачем запропоновано модифікацію колонного апарату, який має здатність щодо підвищення висоти пінного шару без підвищення швидкості газового потоку.*

5. Бабенко В.М. Дослідження особливостей роботи газорідинної системи колонного апарату зі стабілізатором пінного шару / В.М. Бабенко, І.О. Лаврова // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №4 – С. 43-50.

*Здобувачем запропоновано технічні рішення, які дозволяють отримати раціональні показники для широкого діапазону навантажень апарата (стосовно рідини та газу).*

6. Бабенко В.Н. Контроль температуры масляного сырья в процессе тепловой обработки / В.В. Себко, В.Н. Бабенко, Т.С. Тихомирова, Е.О. Петухова, А.К. Минкова // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ „ХПІ”, 2015. – №.30. – С. 99-105.

*Здобувачем доведена можливість та перспективність застосування приладів контролю температури при обробці розчинниками суміші масел.*

7. Бабенко В. Н. Исследование математической модели процессов гидродинамического и массообменного взаимодействия потоков в ректификационной колонне / В.Н. Бабенко, В.В. Себко, Т.М. Арсланалиев, О.В. Горбунова // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2016. – №2. – С. 42-47.

*Здобувачем розглянуто питання, які пов'язані з удосконаленням та моделюванням теоретичних положень роботи нових насадних елементів задля підвищення параметрів процесу масообміну в системі газ-рідина.*

8. Деклараційний патент України на винахід. Пат. 2003042983 Україна. 61718 А, МПК В01D53/00, В01J19/30. Регулярна насадка DINAMIX для тепломасообмінних апаратів / В.І. Сиренко, В.М. Бабенко, Є.В. Бубликова, О.М. Філенко; заявлено 07.04.03; опубл. 17.11.03, Бюл. №11.

*Здобувачем розроблено та виготовлено новий блок контактного елемента для процесу ректифікації.*

9. Бабенко В.Н. Сравнительный анализ конструктивных особенностей геометрических параметров регулярных насадок для тепломассообменных аппаратов / В.Н. Бабенко, В.И. Сиренко / Тези доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції: «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», 15–16 травня 2003 р., Харків. – Харків: НТУ «ХП», 2003. – С. 405.

*Здобувачем проведено патентний огляд та досліджено можливість застосування регулярних контактних елементів для поділу суміші розчинників.*

10. Бабенко В.Н. Выбор оптимальных конструкций распределителей жидкости в пленочных массообменных аппаратах / А.Ю. Колесников, В.Н. Бабенко, Е.В. Бубликова, В.И. Сиренко / Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції: «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», 20–21 травня 2004 р., Харків. – Харків: НТУ «ХП», 2004. – С. 523.

*Здобувачем визначено залежності щодо газорозподілу та розподілу зрошення в колонних апаратах різної конструкції.*

11. Бабенко В.Н. Оборудование для ректификации органических растворителей в фармацевтической и пищевой промышленности / В.Н. Бабенко / Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції: «Екотрофологія – міст у майбутнє харчування людини», 13–14 вересня 2007 р., Біла Церква. – Біла Церква: БДАУ, 2007. – С. 97-98.

12. Бабенко В.Н. Повышение точности измерений и достоверности контроля параметров ферромагнитных плоских изделий при реализации многопараметрового метода на базе теплового дифференциального устройства / В.В. Себко, В.Н. Бабенко, В.П. Себко / Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції: «Ресурсоенергозбереження і енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії», 7–9 листопада 2012 р., Харків. – Харків: НТУ „ХП”, 2012. – С. 12.

*Здобувачем проведено вимірювання параметрів міцності і корозійної стійкості контактних елементів застосованих в ректифікації.*

13. Бабенко В.Н. Повышение метрологических характеристик и качества работы теплового трансформаторного электромагнитного преобразователя (ТЭМП) с нагреваемым плоским изделием / В.В. Себко, В.Н. Бабенко, Д.Л. Кунченко / Збірник доповідей IV Міжнародної заочної конференції: «Развитие науки в XXI веке», 13 червня 2015 р., Харків. – Харків: Науково-інформаційний центр «Знання», 2015. – Ч.1 – С. 25-30.

*Здобувачем доведена можливість та перспективність застосування електромагнітного перетворювача для контролю температурного режиму роботи колонного апарату.*

## АНОТАЦІЇ

**Бабенко В. М. Закономірності масообмінних і гідродинамічних процесів ректифікації при різних геометричних параметрах контактного пристрою.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків, 2016.

Дисертацію присвячено дослідженню процесу поділу рідинних гетерогенних сумішей на регулярних контактних пристроях з різними геометричними параметрами насадочних елементів.

Досліджено механізм процесу утворення рідинної плівки для колонних апаратів, що застосовуються в ректифікації у відповідності з гідродинамічними характеристиками процесу. Показано, що основним фактором інтенсифікації масообмінного процесу для регулярних контактних елементів, є швидкість відновлення рідинної плівки.

Доведено що, основними факторами, які визначають ефективність процесу поділу суміші розчинників, є низький питомий опір апарату по газу і конструктивні особливості контактних елементів ректифікаційної колони.

Отримано графічні та емпіричні залежності для розрахунку висоти насадочного шару, питомої поверхні насадки в залежності від лінійної швидкості газу в колонному апараті і геометричних параметрів насадочних пристроїв.

Розроблено практичні рекомендації для проектування колонних установок з високими енергетичними показниками.

Запропоновано новий регулярний контактний елемент, який поєднує в собі велику питому поверхню з малим гідродинамічним опором. Запропоновано принципову апаратурно-технологічну схему процесу поділу суміші розчинників, яка розроблена й впроваджена на виробництві ПАТ «ФАРМСТАНДАРТ-БІОЛІК» (м. Харків).

*Ключові слова:* гідродинаміка та масообмін, ректифікація, гетерогенні рідинні системи, колонний апарат, контактний елемент, питома поверхня насадки.

**Бабенко В. Н. Закономерности массообменных и гидродинамических процессов ректификации при различных геометрических параметрах контактного устройства.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии.

– Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, г. Харьков, 2016.

Диссертация посвящена исследованию процесса разделения жидкостных гетерогенных смесей на регулярных контактных устройствах с различными геометрическими параметрами насадочных элементов.

В соответствии с гидродинамическими характеристиками процесса исследован механизм образования жидкостной пленки на контактных элементах для колонных аппаратов, применяющихся в ректификации. Показано, что основным фактором интенсификации массообменного процесса для регулярных контактных элементов является скорость образования жидкостной пленки при низком удельном сопротивлении аппарата по газу. Доказано, что основными факторами, определяющими эффективность процесса разделения смеси растворителей, является низкое удельное сопротивление аппарата по газу и конструктивные особенности контактных элементов ректификационной колонны.

Получены графические и эмпирические зависимости для расчета высоты насадочного слоя, удельной поверхности насадки в зависимости от линейной скорости газа в колонном аппарате и геометрических параметров насадочных устройств. Предложенные теоретические и экспериментальные исследования дают возможность разработать ряд новых технических решений по улучшению работы колонного оборудования для разделения водных смесей растворителей.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации для проектирования колонных установок с высокими энергетическими показателями, получено математическое описание процесса гетерогенного разделения смесей, которое устанавливает связь между основными технологическими и гидродинамическими факторами, а так же основными параметрами установок, что дает возможность проводить выбор параметров колонных аппаратов для обеспечения необходимой производительности по целевому компоненту. На основе гидродинамического моделирования апробирован метод прогнозирования эффективности использования исследуемой насадки, по сравнению с известной.

В рамках решения научно-практического задания были исследованы практические аспекты работы созданных контактных устройств, на основе комплексного подхода, определены основные параметры установок для процесса разделения смесей и усовершенствования последних путем установки в них новых контактных элементов. На основе экспериментальных исследований по гидродинамическому моделированию впервые разработана новая регулярная насадка и спрогнозированы ее массообменные характеристики. Изготовлен новый регулярный контактный элемент, который сочетает в себе большую удельную поверхность с малым гидродинамическим сопротивлением. Выполнена, в производственных условиях, проверка эффективности использования новой насадки в процессе разделения смеси растворителей, в результате которой были подтверждены ранее спрогнозированные массообменные характеристики насадки.

В рамках хоздоговора разработана и предложена принципиальная аппаратурно-технологическая схема процесса разделения гетерогенных систем на составляющие фракции, которая была принята и внедрена на производстве ПАО «ФАРМСТАНДАРТ-БИОЛЕК» (г. Харьков).

*Ключевые слова:* гидродинамика и массообмен, ректификация, гетерогенные жидкостные системы, колонный аппарат, контактный элемент, удельная поверхность насадки.

**Babenko V.N. Laws of mass transfer and hydrodynamic processes of rectification for different geometrical parameters of the contact device.** – On the right manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of engineering sciences on specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – National technical university «Kharkiv Polytechnic Institute» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The dissertation is dedicated to the study of the separation process of liquid heterogeneous mixtures on the regular contact devices with different geometric parameters of the packing elements.

The mechanism of the liquid film formation for the column apparatuses utilized in rectification is investigated according to the hydrodynamic characteristics of the process. It is shown that the main factor in the intensification of mass transfer processes for regular contact devices is velocity recovery of the liquid film.

It is proved that the main factors of the solvent mixture separation efficiency are low specific resistance of an apparatus for a gas and constructional characteristics of the contact devices of a rectification column.

Graphical and empirical relationships are obtained to calculate height of the packed bed, specific surface of a nozzle, depending on the linear gas velocity in a column apparatus and geometric parameters of the packing devices.

Practical recommendations for the design of column units with high energy performance are developed.

A new regular contact element that combines large surface area with low hydrodynamic resistance is suggested. A process flow diagram of the solvent mixtures separation is given, which was developed and implemented in the production line of PJSC "PHARMSTANDARD-BIOLIK" (Kharkiv city).

*Key words:* fluid dynamics and mass transfer, rectification, liquid heterogeneous systems, column unit, contact element, specific surface area packing.