

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**МАЛЕТА БОГДАН ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 663.551.4

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАСООБМІНУ В КОЛОННИХ  
АПАРАТАХ З ЦИКЛІЧНИМ РУХОМ ФАЗ**

05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та  
фармацевтичних виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття  
наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2013

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій,  
Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Таран Віталій Михайлович,**  
Національний університет харчових технологій,  
МОН молоді та спорту України,  
м. Київ, завідувач кафедри машин і апаратів  
харчових та фармацевтичних виробництв

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Марценюк Олександр Степанович,**  
Національний університет харчових технологій,  
МОН молоді та спорту України,  
м. Київ, професор кафедри процесів і апаратів  
харчових виробництв

доктор технічних наук, професор  
**Паламарчук Ігор Павлович,**  
Вінницький національний аграрний університет,  
МінАПП України,  
завідувач кафедри процесів та обладнання  
переробних і харчових виробництв  
ім. П. С. Берника, декан факультету механізації  
сільського господарства

Захист відбудеться "\_17\_" \_\_\_\_\_квітня\_\_\_\_\_ 2013 року о 14\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 по захисту дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук при Національному університеті харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, аудиторія А-311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий "11" березня 2013 р.

**Учений секретар**  
спеціалізованої вченої ради, к.т.н., доц.

**Л. О. Кривопляс-Володіна**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Колонні масообмінні апарати широко використовуються в харчовій, хімічній, нафтохімічній та інших галузях промисловості для розділення рідких сумішей. Домінуючими серед процесів розділення є процеси ректифікації, що охоплюють близько 90 %. Витрати енергії на ректифікацію можуть досягати 50 % від загальних енергетичних витрат усього виробництва.

Відомо, що як капітальні, так і поточні витрати на промислові процеси розділення обернено пропорційні ефективності масопередачі між парою та рідиною, що, у свою чергу, залежить від характеру фазової рівноваги, поверхні контакту фаз та коефіцієнта масопередачі. Для тарілчастих колонних апаратів резерви підвищення ефективності процесу пов'язані з організацією руху фаз у колонах та залежать від характеру взаємодії потоків на тарілках. Найбільша ефективність розділення компонентів досягається при ідеальному витісненні по рідині та парі.

Сучасні вимоги до процесу ректифікації передбачають вирішення комплексу завдань: зменшення капітальних витрат на будівництво нових та реконструкцію діючих об'єктів; зменшення енерговитрат на процеси розділення; підвищення якості кінцевих продуктів.

Отже, створення обладнання, яке забезпечує підвищення ефективності масообміну в тарілчастих колонах за рахунок організації гідродинамічних режимів ідеального витіснення по парі та рідині, обумовлює зацікавленість у подальшому вдосконаленні їх конструкцій та дослідженні основних характеристик режимів їх роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано відповідно до планів науково-дослідної роботи НУХТ, зокрема до теми: “Розроблення наукових основ тепломасообмінних та інших процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв з метою створення нових високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації та автоматизації для харчових та переробних галузей АПК” (схвалено Вченою Радою НУХТ, протокол від 25.03.06 № 7) та пов'язана з кафедральною темою на 2010-2015 рр.: “Інтенсифікація технологічних процесів з метою створення високоефективного обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв”(схвалено на засіданні кафедри МАХВ, протокол від 17.09.10 № 3).

Автор особисто брав участь у створенні дослідної установки, проведенні експериментальних досліджень, обробленні та узагальненні результатів експериментів, у промисловому впровадженні.

**Мета та завдання досліджень.** Мета дисертації – розробка колонних масообмінних апаратів, які забезпечують зменшення капітальних та поточних витрат на промислові процеси розділення рідких однорідних сумішей за рахунок підвищення ефективності масообміну при організації гідродинамічних режимів ідеального витіснення по рідині та парі. Мета дисертаційної роботи передбачає розв'язання комплексу основних задач:

- розробити алгоритм та програму розрахунку процесу циклічної

ректифікації, яка дозволяє визначити число ступенів контакту, концентраційні профілі на ступенях у рідині та парі, ефективність ступенів;

- провести теоретичне дослідження впливу керуючих факторів процесу та параметрів математичної моделі (локальної ефективності та величини рідинної затримки) на ефективність розділення;

- на основі аналізу конструкцій існуючих контактних пристроїв (масообмінних тарілок) розробити та дослідити контактні пристрої, які забезпечують однократну зміну рідини на ступені контакту;

- виготовити експериментальну установку, дослідити гідродинамічні, масообмінні та технологічні характеристики запропонованих контактних пристроїв;

- провести експериментальні дослідження бражної колони при різних технологічних режимах та порівняти отримані дані з реально діючими колонами;

- порівняти експериментальні дані з результатами математичного моделювання;

- розробити колони, які працюють у режимі циклічного руху фаз для впровадження в промислову галузь України;

- провести техніко-економічний аналіз результатів промислового впровадження.

**Об'єкт і предмет дослідження.** *Об'єктом дослідження є процес масообміну в тарілчастих колонних апаратах, які працюють у циклічному режимі. Предмет досліджень – спеціальні контактні пристрої, які забезпечують ідеальне витіснення по рідині та парі.*

**Методи дослідження.** У роботі застосовувались методи математичного та фізичного моделювання. Математична модель базується на числовому вирішенні нелінійної системи диференціальних рівнянь першого порядку. Під час фізичних досліджень застосовувались методи фізико-хімічного аналізу, зокрема газової хроматографії. Обробка результатів досліджень проводилась із застосуванням статистичних методів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що: 1) на базі теоретичної тарілки ідеального витіснення запропоновано метод розрахунку циклічної ректифікації; 2) створено програмне забезпечення, яке дозволяє розрахувати технологічні та конструкційні параметри ректифікаційних колон, використовуючи моделі теоретичної тарілки (Мак-Кеб і Тіле), моделі ідеального витіснення та проміжні значення гідродинамічних режимів; 3) проведено моделювання бражної колони, яка працює в циклічному режимі; встановлено вплив керуючих факторів процесу та параметрів моделі на ефективність роботи бражної колони; 4) розроблено спеціальні контактні пристрої, які забезпечують однократну зміну рідини на тарілці при безперервній подачі рідини та циклічній подачі пари в колону; 5) досліджено гідродинамічні та масообмінні характеристики розроблених контактних пристроїв; 6) запропоновано нову методику для визначення ефективності колони, яка працює в циклічному режимі; 7) виконано комплекс досліджень

технологічних характеристик бражної колони в промислових умовах і на базі отриманих результатів підтверджено відповідність розробленого програмного забезпечення; 8) вперше впроваджено колони, які працюють у режимі циклічного руху фаз, з розробленими контактними пристроями.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Створено програмне забезпечення, яке дозволяє розрахувати технологічні та конструкційні параметри бражних колон.

Створено експериментальну установку, яка дозволила провести фізичне моделювання бражної колони і довести адекватність запропонованої математичної моделі промисловим умовам.

На базі виконаних експериментальних досліджень розроблено рекомендації щодо промислової експлуатації бражних колон.

Розроблені конструкції контактних пристроїв використані в колонах з діаметром від 400 до 650 мм, захищені Українськими, Євразійськими патентами та патентами США.

Промислова експлуатація підтвердила, що ефективність процесу розділення у циклічному режимі не залежить від діаметра колони.

Одержані результати використані при проектуванні промислових апаратів на ДП “Косарський спиртовий завод” та ДП “Червонослобідський спиртовий завод” і підтверджені актами впровадження результатів дисертаційного дослідження № 1 від 08.09.11 та № 2 від 24.07.12 відповідно.

**Особистий внесок здобувача.** Розвинуто та доповнено теоретичні основи циклічної ректифікації у співавторстві з науковим керівником д.т.н, проф. Тараном В. М.

За безпосередньою участю автора отримано наступні результати: розроблено математичну модель та програму розрахунку бражної колони; створено експериментальну установку, розроблено засоби її автоматизації та програмне забезпечення; досліджено гідродинамічні та масообмінні характеристики запропонованих контактних пристроїв; доведено адекватність запропонованої математичної моделі режимам роботи промислових колонних апаратів. Особисто проведено експериментальні дослідження, виконано математично-статистичне опрацювання їх результатів. Надано рекомендації щодо режимів роботи бражної колони.

**Апробація результатів досліджень.** Матеріали дисертаційної роботи обговорювались і доповідались на: 73–76-й наукових конференціях молодих вчених, аспірантів і студентів НУХТ, Київ, НУХТ, 2007–2011 рр.; IV Международной научной конференции студентов и аспирантов “Техника и технология пищевых производств”, Беларусь, Могильов, МГУП, 2008; The European Meeting of Chemical Industry and Environment EMChIE, Mechelen, Belgium, 2010; 19<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA and the 7<sup>th</sup> European Congress of Chemical Engineering ECCE-7, Prague, Czech Republic, 2010; 9<sup>th</sup> Distillation & Absorption Conference, Eindhoven, The Netherlands, 2010;

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 19 наукових праць, з них 3 статі у фахових виданнях, 10 тез доповідей на науково-технічних конференціях; патенти на винахід 5 та патент на корисну модель 1.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 107 найменувань, 5 додатків. Загальний об'єм роботи – 198 сторінок (основний текст становить 142 сторінки), рисунків – 61, таблиць – 17.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** розглянуто теоретичні основи проведення процесу масообміну в циклічному режимі. Обґрунтовано актуальність поданої роботи та окреслено перспективи використання циклічної ректифікації в промислових умовах.

**Перший розділ “Теорія та практика циклічної ректифікації в аналітичному висвітленні”** присвячено: аналізу теоретичної і практичної складових циклічної ректифікації. Для тарілчастих колонних апаратів найбільш ефективно розділення компонентів досягається при організації гідродинамічного режиму ідеального витіснення по рідині та парі (газу). У таких умовах ефективність тарілки може значно перевищувати локальну ефективність та досягати значень 200–300 %. Для стаціонарного режиму це можливо при забезпеченні повздовжнього секціонування тарілки. Проте практична реалізація даних умов не принесла бажаних результатів через недосконалість контактних пристроїв. Наступним кроком у напрямі реалізації гідродинамічного режиму ідеального витіснення по рідині та парі було використання циклічного режиму масообміну, що передбачає заміну просторової системи координат, в якій концентраційні профілі компонентів змінюються вздовж руху рідини по тарілці на часові, а саме за час подачі пари в колону. Інтервал часу від моменту початку до моменту закінчення подачі пари називають паровим періодом  $\tau_{\text{п}}$  (наприклад, 30 с), а від моменту початку до моменту закінчення переливання рідини на нижчу тарілку – рідинним періодом  $\tau_{\text{р}}$  (наприклад, 3 с). Повний цикл роботи  $\tau_{\text{ц}}$  складається із суми рідинного та парового періодів:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{р}} \quad (1)$$

Для розрахунків колонних апаратів у стаціонарному режимі використовується загальноприйнята модель теоретичної тарілки (Мак-Кеб і Тіле), яка передбачає ідеальне перемішування рідини та пари на тарілках. Розрахунок колонних апаратів у циклічному режимі проводиться на основі моделі теоретичної тарілки ідеального витіснення. Модель ґрунтується на базі матеріального балансу колони по цільовому компоненту та зводиться до наступних положень: 1) рідина та пара рухаються по тарілці в режимі ідеального витіснення; 2) пара, що піднімається з будь-якого перерізу потоку рідини, досягає рівноваги з цією рідиною; 3) на суміжних тарілках пара взаємодіє з рідиною в один і той самий момент перебування рідини на тарілці. Обидві моделі описують крайні випадки гідродинамічної ситуації на тарілці та можуть переходити одна в одну при відповідних умовах. Математичний опис

циклічного процесу є системою нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку, розв'язання яких можливе лише числовим методом. Результати математичного моделювання представлені у вигляді робочих ліній процесу.

Проведено аналітичний огляд будови контактних пристроїв та масообмінних апаратів, які реалізують умови проведення циклічної ректифікації. Розглянуті рішення не можуть повною мірою забезпечити промислову реалізацію технології та її переваги. Основним завданням дисертаційної роботи є розробка контактних пристроїв, які можуть реалізувати переваги циклічної ректифікації в промислових умовах.

У другому розділі “Математичне моделювання процесу розділення в бражній колоні” проведено математичне моделювання бражної колони в двохкомпонентній системі “етанол – вода”. Найбільш широко в харчовій промисловості процес ректифікації використовують при отриманні спирту етилового ректифікованого. Бражна колона є першою колоною в технологічній системі БРУ та потребує значних капітальних та експлуатаційних витрат на вилучення спирту з бражки. У зв'язку з цим бражна колона представляє інтерес для подальших досліджень з метою переведення її в циклічний режим роботи.

Програма розрахунку створена на базі коміркової моделі. Коміркову модель масообміну для тарілки, яка працює в циклічному режимі, можна інтерпретувати наступним чином. Візьмемо довільну тарілку під номером  $n$ , з кількістю молів рідини  $H$  на тарілці. Паровий потік з витратою  $G$ , моль/с; тривалість парового періоду  $\tau_n$ ; концентрації легколеткого компоненту (ЛЛК) у рідині  $x$ , а в парі  $y$ . Під час парового періоду кількість пари, що надходить на тарілку, становить  $G\tau_n$ . Розбиваємо  $G\tau_n$  на  $N$  частин  $\frac{G\tau_n}{N}$ . Тоді рівняння матеріального балансу по ЛЛК для довільного моменту подачі пари  $j = \frac{\tau_n}{N}$  можна записати:

$$\left(\frac{G\tau_n}{N}\right)y_{n-1(j)} + Hx_{n(j-1)} = \left(\frac{G\tau_n}{N}\right)y_{n(j)} + Hx_{n(j)}, \quad (2)$$

де  $y_n$  – концентрація ЛЛК у парі, яка покидає  $n$  тарілку, % моль;  $y_{n-1}$  – концентрація ЛЛК у парі, яка покидає  $n - 1$  тарілку, % моль.

Дане рівняння можна назвати елементарним актом масопередачі для однієї комірки. Число  $N$  визначає число комірок. Для режиму ідеального витіснення мінімальне число комірок  $N = 10$ . Для режиму ідеального перемішування  $N = 1$ .

Розроблена програма забезпечила розрахунки бражної колони в наступних діапазонах: продуктивність заводу від 500 до 10 000 дал/добу; діаметри колон від 400 до 3 000 мм; концентрація бражки від 3 до 12 % об.; витрата пари від 12 до 40 кг/дал; втрати спирту з бардою не перевищують 0,004 % моль. Параметр моделі – кратність рідинної затримки  $\Phi$  змінюється у межах 0,05...1,00:

$$\Phi = \frac{H_{cm.}}{H}, \quad (3)$$

де  $H_{cm.}$  – кількість рідини, яка переливається за один цикл;  $H$  – загальна кількість рідини на тарілці.

Параметр моделі – локальна ефективність  $E_0$  змінюється у межах  $0,1 \dots 1,0$ :

$$E_0 = \frac{y_n - y_{n-1}}{y_n^* - y_{n-1}}, \quad (4)$$

де  $y_n^*$  –рівноважна концентрація ЛЛК в парі, яка покидає  $n$  тарілку.

Матеріальний баланс по ЛЛК виконується на 99,6 %. Моделювання проводили в системі “етанол – вода” по компоненту етанол на прикладі реального спиртового заводу продуктивністю 3000 дал/добу. Результатом розрахунку за умови повного перемішування (теоретична тарілка) є 10 тарілок, при ефективності тарілки 100 %. Результатом розрахунку за моделлю теоретичної тарілки ідеального витіснення є 4 тарілки, при більш високому значенні ефективності тарілки. Значення ефективності тарілки понад 100 % пояснюється тим, що в циклічному режимі середнє значення зміни концентрації ЛЛК в парі є більшим за рівноважне зазначення до рідини що покидає тарілку.

Для обох режимів отримані профілі зміни концентрації етанолу в рідині  $x(\tau)$  та парі  $y(\tau)$  для кожного ступеня контакту. За концентраційним профілям побудовані робочі лінії процесу, відповідно для кожної з моделей (рис.1 а), б)). Форма та положення робочих ліній демонструють перевагу моделі теоретичної тарілки ідеального витіснення над моделлю теоретичної тарілки.

Під час проектування колонного апарату ставиться завдання визначити оптимальні співвідношення між кількістю тарілок та витратою пари при регламентованих втратах спирту з бардою не вище допустимих. Особливий інтерес викликає визначення витрат пари для вилучення спирту з бражок різної міцності. У нашій моделі змінювали концентрацію бражки від 7 до 12 % об. При нескінченній кількості тарілок та рівноважному значенні концентрації спирту в парі витрата пари для циклічного та стаціонарного процесу буде однаковою. У таблиці визначено мінімально можливу витрату пари при мінімальній кількості теоретичних тарілок. При цьому фактор дифузійного потенціалу:

$$\lambda = \frac{mG}{L}, \quad \bar{\lambda} \approx 1,45 \quad (5)$$

де  $\lambda$  –фактор дифузійного потенціалу;  $m$  – константа фазової рівноваги;  $L$  –витрата рідини, моль/с;  $G$  – витрата пари, моль/с.

Таблиця

Режим	Міцність бражки, % об.					
	7	8	9	10	11	12
Мінімальна витрата пари при безкінечній кількості тарілок, кг/дал	14,2	13,05	12,08	11,58	10,65	10,03
Циклічний режим, кг/дал	16	14	13	12	11	11
Стаціонарний режим, кг/дал	20	18	16	15	14	13
Кількість теоретичних тарілок ідеального витіснення	13	12	11	11	10	8
Кількість теоретичних тарілок	16	16	15	14	13	13

З таблиці видно, що різниця між мінімальною витратою пари при нескінченній кількості тарілок та мінімально допустимою витратою пари в циклічному режимі значно менша, ніж у стаціонарному. Крім того, підтверджується загальноприйняте положення, згідно з якого зі зменшенням концентрації бражки збільшуються питомі витрати пари.

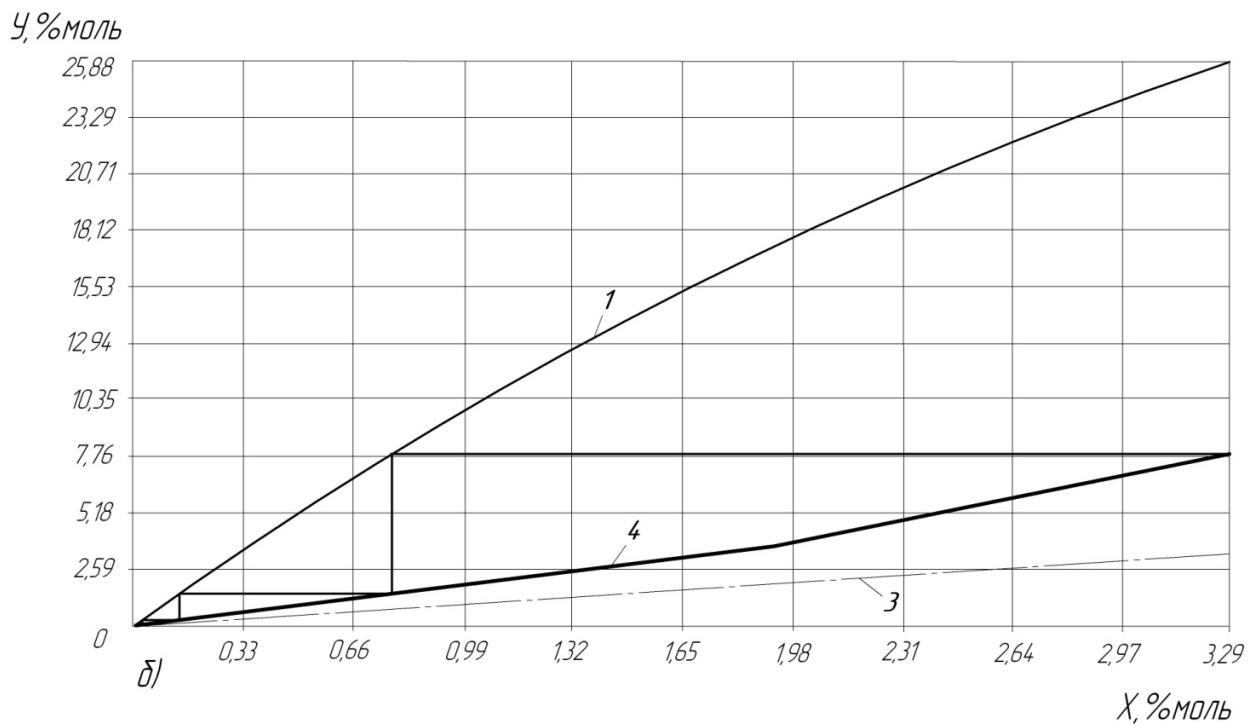
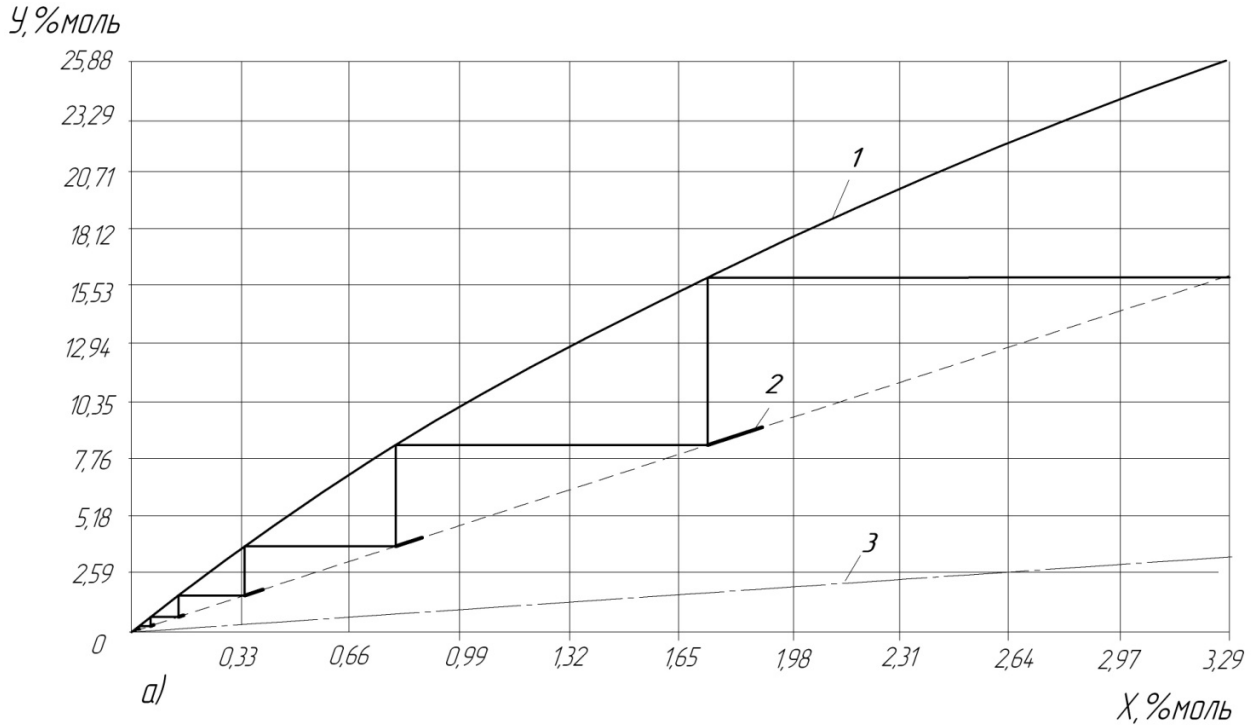


Рис. 1. Робочі лінії процесу масообміну: а) теоретичної тарілки ідеального перемішування; б) теоретичної тарілки ідеального витіснення: 1 – лінія рівноваги етиловий спирт – вода; 2 – робоча лінія теоретичної тарілки; 3 –  $y = x$ ; 4 – робоча лінія теоретичної тарілки ідеального витіснення.

Наступним етапом моделювання було визначення кількості теоретичних тарілок у залежності від концентрації бражки, витрати пари, локальної ефективності  $E_0$  та кратності рідинної затримки  $\Phi$ .

Перша серія моделювання стосувалася визначення кількості теоретичних тарілок при фіксованій витраті пари 16 кг/дал у діапазоні значень параметрів  $E_0 \in [0,8 - 1,0]$  та  $\Phi \in [0,8 - 1,0]$  (рис. 2). Концентрація спирту в бражці змінювалась у межах 7...12 % об. Із *рисунку 3* видно, що для стаціонарного режиму діапазон роботи колони без втрат значно вужчий (9...12 % об.), у той час як для циклічного режиму при витраті пари 16 кг/дал цей діапазон становить 7...12 % об. Кількість тарілок у циклічному режимі в 2 рази менша, ніж у стаціонарному. Таким чином, даний режим має більш широкий діапазон роботи при зміні концентрацій бражки внаслідок вищої ефективності.

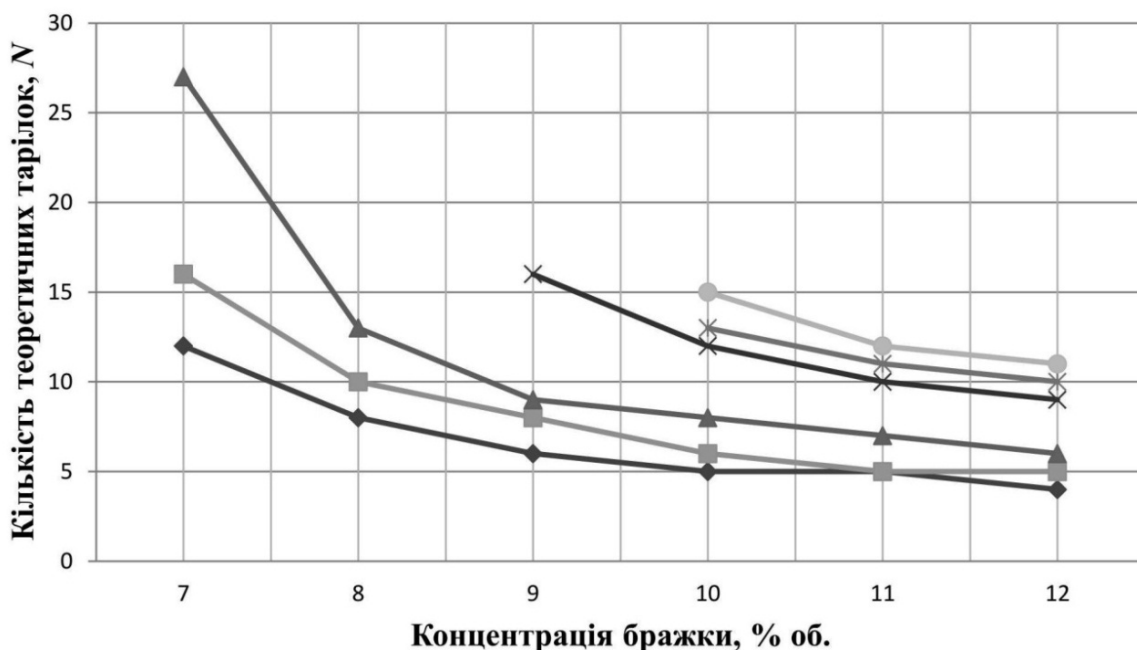


Рис. 2. Залежність кількості теоретичних тарілок від концентрації бражки, при витраті пари 16 кг/дал: Циклічний режим: ◆  $\Phi = 1, E_0 = 1$ ; ■  $\Phi = 0,9, E_0 = 0,9$ ; ▲  $\Phi = 0,8, E_0 = 0,9$ ; Стаціонарний режим: ×  $E_0 = 1$ ; ✱  $E_0 = 0,9$ ; ●  $E_0 = 0,8$ .

Друга серія дослідів на моделі стосувалася визначення кількості теоретичних тарілок колони для обох режимів залежно від витрати пари. Бражка надходить у колону з фіксованою концентрацією 10 % об. Із *рисунку 3* видно, що в усіх випадках при зменшенні питомої витрати пари збільшується кількість теоретичних тарілок,  $N$ . В обох режимах спостерігаються діапазони, в яких при різних витратах пари кількість тарілок є однаковою. Фіксована кількість тарілок забезпечує відсутність втрат спирту з бардою для певного діапазону витрати пари. При цьому в циклічному режимі даний діапазон є значно ширшим. Проте існують значення витрат пари, при яких збільшення кількості теоретичних тарілок не забезпечує нормативних втрат спирту з бардою. Для циклічного режиму це 12 кг/дал, а для стаціонарного – 15 кг/дал.

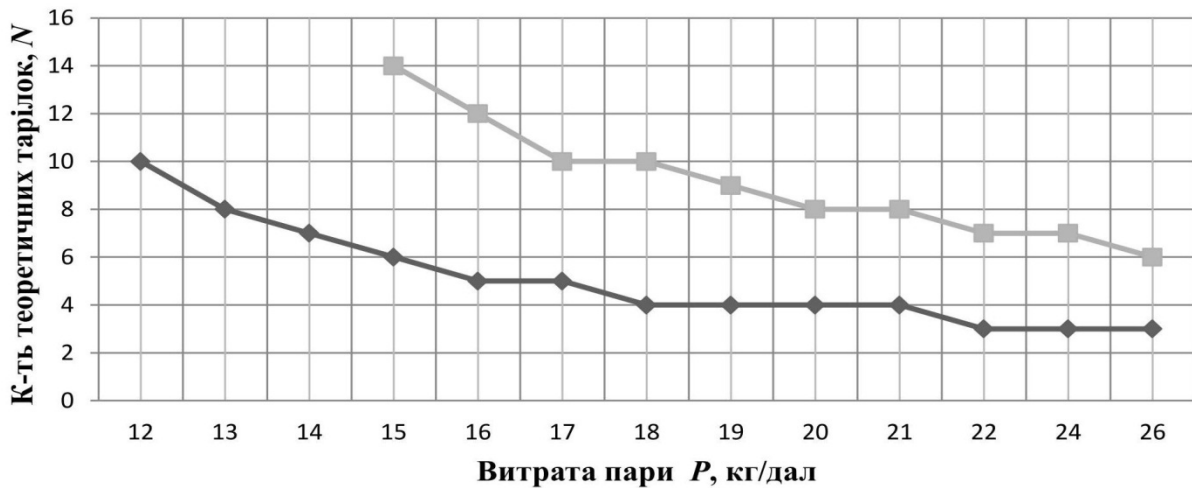


Рис. 3. Залежність між питомою витратою пари  $P$ , кг/дал та необхідною кількістю теоретичних тарілок,  $N$  в бражній колоні. Концентрація спирту в бражці 10 % об: —■— стаціонарний режим; —◆— циклічний режим

Третя серія дослідів на моделі стосувалась визначення впливу параметрів моделі  $\Phi$  та  $E_0$  на ефективність тарілки. Виявилось, що на ефективність розділення інтенсивніше впливає локальна ефективність  $E_0$ , ніж кратність рідинної затримки  $\Phi$ .

Четверта серія дослідів на моделі стосувалась порівняння теоретичної ефективності колони, яка працює в циклічному та стаціонарному режимах, за ідентичної витрати пари та складу живлення (рис. 4). Максимальна різниця в ефективності стаціонарного та циклічного процесів досягається при мінімальній концентрації бражки. Теоретичний аналіз показує, що циклічний режим дозволяє ефективно працювати у розширеному діапазоні зміни концентрації бражки та досягає найбільшого економічного ефекту при розділенні бражок малої концентрації 3...5 % об. (наприклад, при виробництві біоетанолу з целюлози).

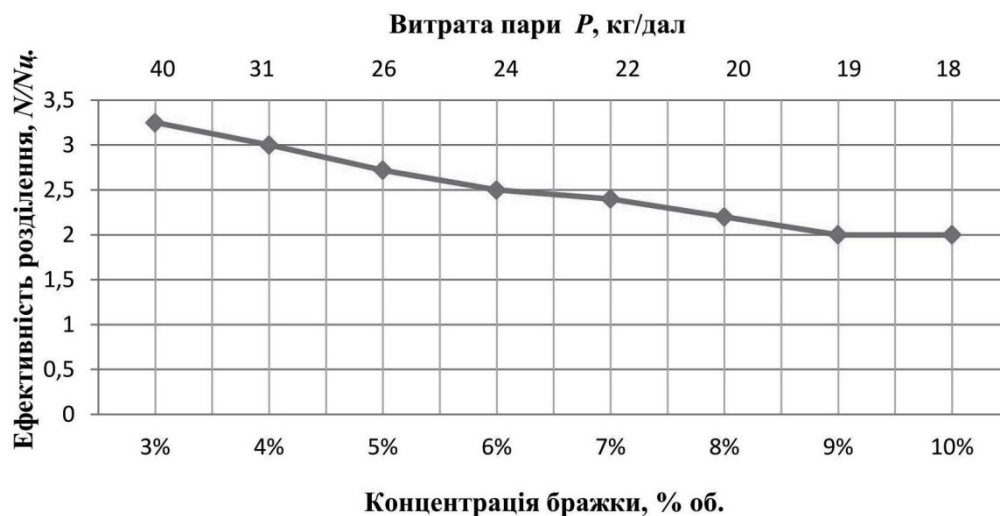


Рис. 4. Теоретична ефективності бражної колони  $N/N_u$  (циклічний режим) при змінній витраті пари від 18 до 40 кг/дал та концентрації бражки 3...10 % об.

Третій розділ “Розробка та дослідження спеціальних контактних пристроїв” присвячений розробці конструкції масообмінних контактних пристроїв та дослідженню їхніх гідродинамічних характеристик. Запропонований контактний пристрій дозволяє проводити процес масообміну в системі “газ (пара) – рідина” у режимі циклічного руху фаз. Живлення в колону подається постійно, а парова фаза дискретно. Кожний контактний пристрій працює автономно, що дозволяє усунути вплив запізнення імпульсу тиску парового потоку в період подачі пари в колону. Двосторонній клапан знаходиться у верхньому положенні завдяки двом факторам: перепаду тиску на тарілці та динамічного напору пари. Наявність шлюзової камери на тарілці дозволяє тримати кратність рідинної затримки  $\Phi$  близькою до одиниці. Рідинний період є мінімальним та становить близько 3 секунд. Таким чином, при перетіканні відбувається однократна та одночасна зміна рідини на всіх тарілках колони, а рух рідини наближається до ідеального витіснення. При цьому рушійна сила масообміну максимальна. Об’єктом досліджень прийнято конструкцію, зображену на рисунку 5.

Дослідження гідродинамічних характеристик проводили у колоні  $\Phi$  310 мм, в якій були розмішені 10 тарілок з вільним перерізом 7% та відстанню між тарілками 500 мм. Колона укомплектована системою автоматики, контрольно-вимірювальною апаратурою та додатковим обладнанням. Дослідження проводили в системі “пара – вода” при навантаженнях по рідинні  $L = 8 \dots 24 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \text{ год})$ . Парове навантаження  $F_s$  змінювалося у межах 0,15...2,8:

$$F_s = V_s \sqrt{\rho_g} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)^{0,5}, \quad (6)$$

де  $F_s$  – фактор парового навантаження;  $\rho_g$  – густина пару,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $V_s$  – швидкість пару,  $\text{м}/\text{с}$ .

Перша серія дослідів – визначення опору сухого контактного пристрою. Пара в куб колони подавалась циклічно, при різній витраті (рис. 6).

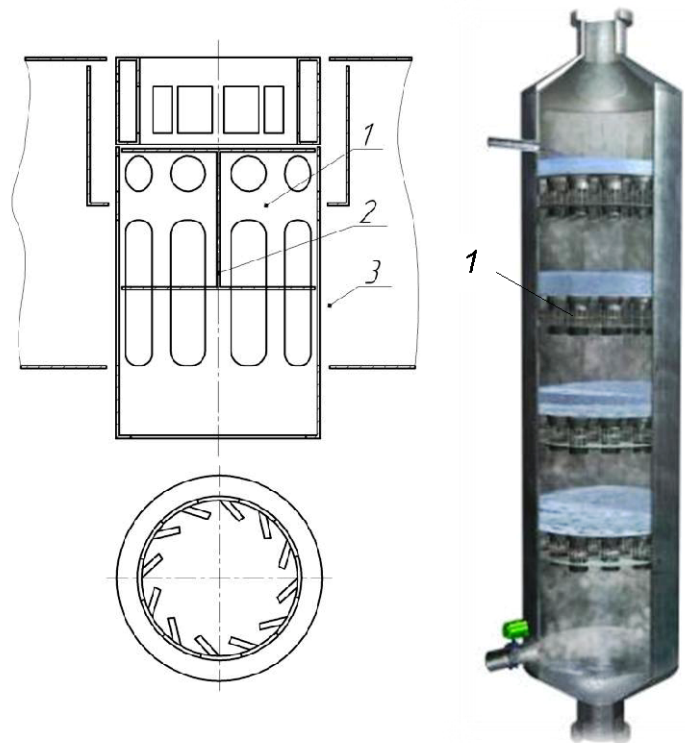


Рис. 5. Масообмінний контактний пристрій: 1-контактний пристрій; 2-двосторонній клапан; 3-шлюзова камера.

Величина опору сухого контактної пристрою описується формулою:

$$\Delta P_{\text{с.т.}} = \xi \frac{u^2 \rho_{\text{г.}}}{2}, \quad (7)$$

де  $\xi$  – опір контактної пристрою;  $u$  – швидкість пару/газу в прорізах тарілки, м/с;  $\Delta P_{\text{с.т.}}$  – опір сухої тарілки, Па.

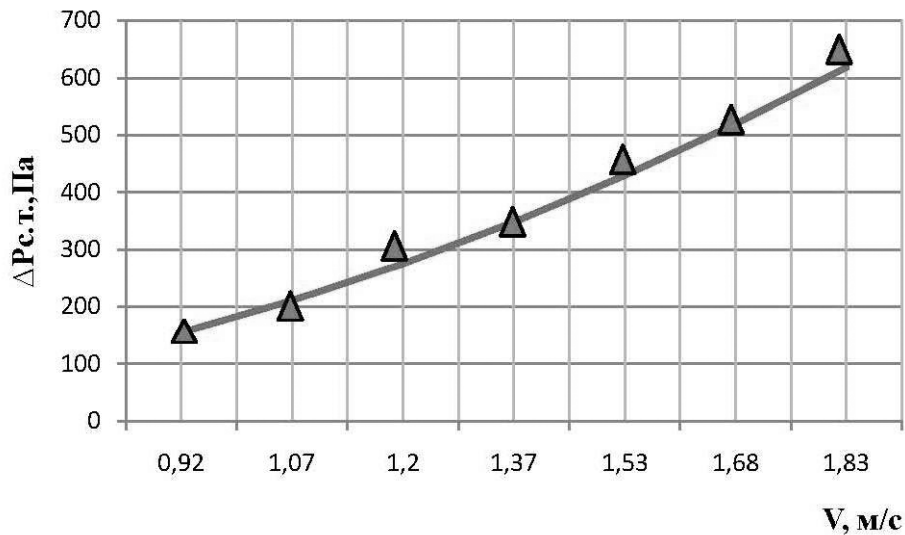


Рис.6. Опір сухої тарілки  $\Delta P_{\text{с.т.}}$ :

де  $V$  – швидкість пари в колоні, м/с.

Згідно з формулою (7) розрахунковим методом було визначено коефіцієнт опору тарілки  $\xi = 3 \dots 3,5$ . Дане значення коефіцієнту опору знаходиться в діапазоні між ситчатою та клапанною тарілками.

Друга серія дослідів стосувалась визначання повного гідродинамічного опору тарілки  $\Delta P$  для трьох варіантів висоти шару рідини: а)  $h = 50$  мм; б)  $h = 70$  мм; в)  $h = 100$  мм. Опір  $\Delta P$  є сумою опорів сухої тарілки  $\Delta P_{\text{с.т.}}$ , газорідинного шару на тарілці  $\Delta P_{\text{г.р.}}$ :

$$\Delta P = \Delta P_{\text{с.т.}} + \Delta P_{\text{г.р.}}, \quad (8)$$

де  $\Delta P$  – повний гідродинамічний опір тарілки, Па;  $\Delta P_{\text{г.р.}}$  – опір газорідинного шару, Па.

Опір газорідинного шару  $\Delta P_{\text{г.р.}}$  визначали розрахунковим шляхом для трьох варіантів із формули (8).

Із *рисунку 7* видно, що збільшення швидкості пари та кількості рідини на тарілці спричиняє ріст  $\Delta P$ . З точки зору ефективності масообміну контактний пристрій повинен забезпечити максимальну поверхню масопередачі та рушійну силу процесу між паровим та рідинними потоками. Для даних контактних пристроїв було прийнято висоту шару рідини на тарілці 100 мм з умови оптимізації часу циклу. Завдяки високій ефективності розділення компонентів розроблена колона має меншу кількість тарілок у порівнянні з нині діючими та широкий робочий діапазон по швидкості пари – від 0,3 до 1,8 м/с. Враховуючи ці обставини, ми можемо дозволити збільшити висоту шару рідини на тарілці до 100 мм, маючи на увазі, що промисловим завданням є зменшення витрати пари на процес розділення.

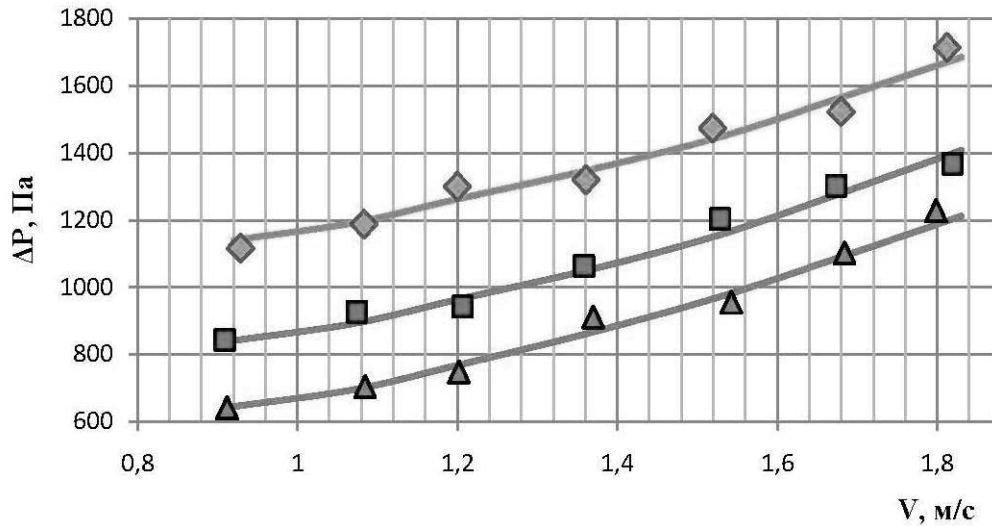


Рис. 7. Повний гідравлічний опір тарілки  $\Delta P$ . Висота шару рідини на тарілці:

▲ – 50 мм; ■ – 70 мм; ◆ – 100 мм.

Третя серія дослідів стосувалась визначання діапазону навантажень тарілок по рідині, через коефіцієнт  $h/h_{max}$ , та по парі, через параметр  $F_s$  (рис. 8). Діапазон роботи колони доцільно поділити на стабільний та ефективний.

Витратою пари можна забезпечити стабільну роботу колони для будь-якої кількості рідини на тарілці. Залежність стабільної роботи колони від витрати пари має лінійний характер. Зі збільшенням кількості рідини на тарілці має збільшуватись витрата пари.

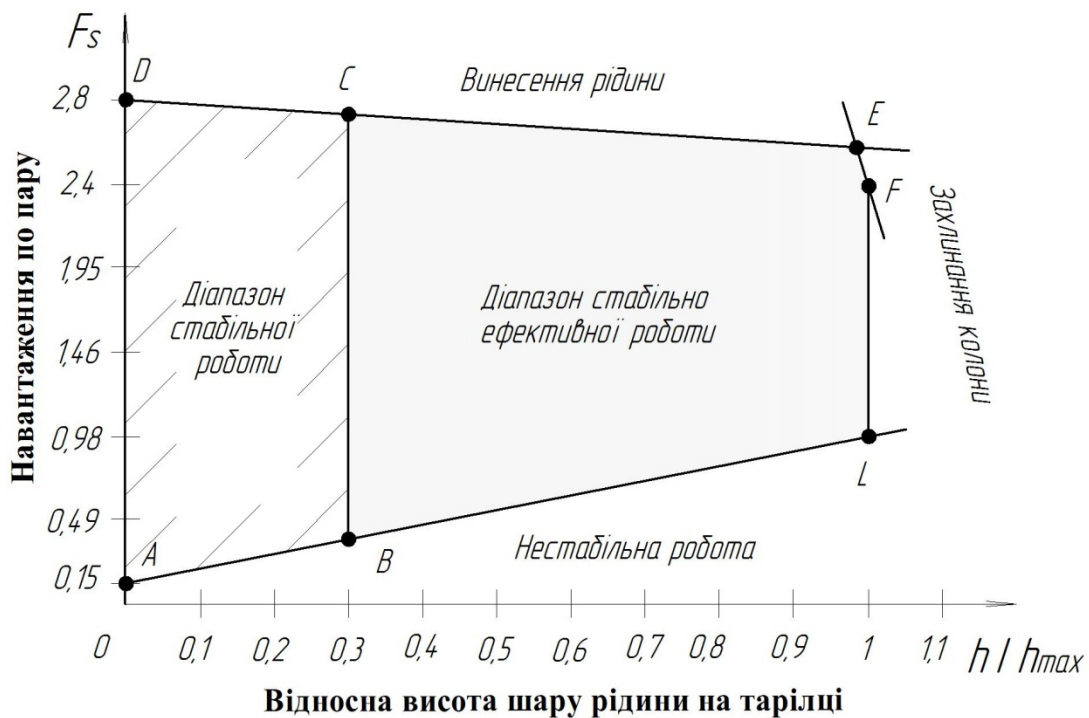


Рис. 8. Область навантажень тарілок:  $h$  – висота реального шару рідини на тарілці,  $h_{max}$  – максимальний шар рідини на тарілці.

Недостатня витрата пари приводить до відсутності стійкого барботажу та зменшення ефективності роботи колони за рахунок перемішування рідини на суміжних тарілках під час її перетоку.

Тарілки з розробленими контактними пристроями ефективно працюють у діапазоні більш високих промислових навантажень при виробництві спирту етилового ректифікованого. При цьому діаметр колон значно менший.

**Четвертий розділ “Дослідження процесу масообміну”** присвячений дослідженню технологічних показників роботи експериментальної бражної колони  $\varnothing 310$  мм. Досліди проходили у два етапи за реальних умов, при розділенні мелясних спиртових бражок концентрацією від 7 до 9 % об. На першому етапі колона складалася з 7 тарілок. Навантаження по бражці становило  $14,4 \dots 21,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$ . Швидкість пари в колоні  $0,71 \dots 1,4 \text{ м/с}$ . Витрата пари  $20,4 \dots 24,9 \text{ кг/дал}$  забезпечувала відсутність втрат спирту з бардою. Колона працювала стабільно.

На другому етапі кількість тарілок збільшили до 10 при навантаженні по бражці  $14,4 \dots 16,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$ . Швидкість пари в колоні  $0,71 \dots 0,94 \text{ м/с}$ . Концентрація спирту в бражному дистиляті  $45 \dots 55 \%$  об. Витрата пари на 1 дал абсолютного спирту складала  $14,3 \dots 19,9 \text{ кг}$ . Стабільність роботи колони підтверджена відтворенням процентного складу барди та дистиляту при дотриманні ідентичних параметрів процесу. Кількість тарілок у бражній колоні, яка працювала в циклічному режимі, була в  $2,0 \dots 2,5$  рази менша, ніж у промислових колонах з різними контактними пристроями, а питома витрата пари на ректифікацію при 10 тарілках зменшилась на  $4 \dots 5 \text{ кг/дал}$ .

Ефективність експериментальної бражної колони розраховувалась за відношенням числа теоретичних тарілок,  $N$  до числа реальних тарілок, в циклічному режимі,  $N_{\text{ц}}$  на першому та другому етапах. Розрахунок базувався на експериментальних даних, витрата пари змінювалась  $16 \dots 25 \text{ кг/дал}$ , а висота шару рідини на тарілці становила  $h = 100 \text{ мм}$ . Із *рисунку 9а* слідує, що для першого етапу за мінімальної витрати пари  $20 \text{ кг/дал}$  досягається максимальна ефективність процесу. Такий результат пов'язаний з тим, що при теоретичних розрахунках збільшення витрати пари призводить до зменшення кількості тарілок. Для наших дослідів кількість тарілок у колоні залишається фіксованою. Таким чином реальна ефективність тарілки при збільшенні витрати пари буде зменшуватись. Для другого етапу спостерігаються аналогічні закономірності: найбільша ефективність колони досягається за мінімальної витрати пари –  $16 \text{ кг/дал}$ .

На *рисунку 9б* зображено порівняння ефективності експериментальної бражної колони, яка працює в циклічному режимі, з теоретичною ефективністю бражної колони, розрахованої по моделі теоретичної тарілки ідеального витіснення. Із *рисунку* видно, що ефективність бражної колони не перевищує 60 %. Таким чином, ефективність колони, яка працює в циклічному режимі, потрібно розраховувати по моделі теоретичної тарілки ідеального витіснення. У цьому випадку ми уникаємо протиріччя, при якому ефективність циклічного процесу перевищує 100 %.

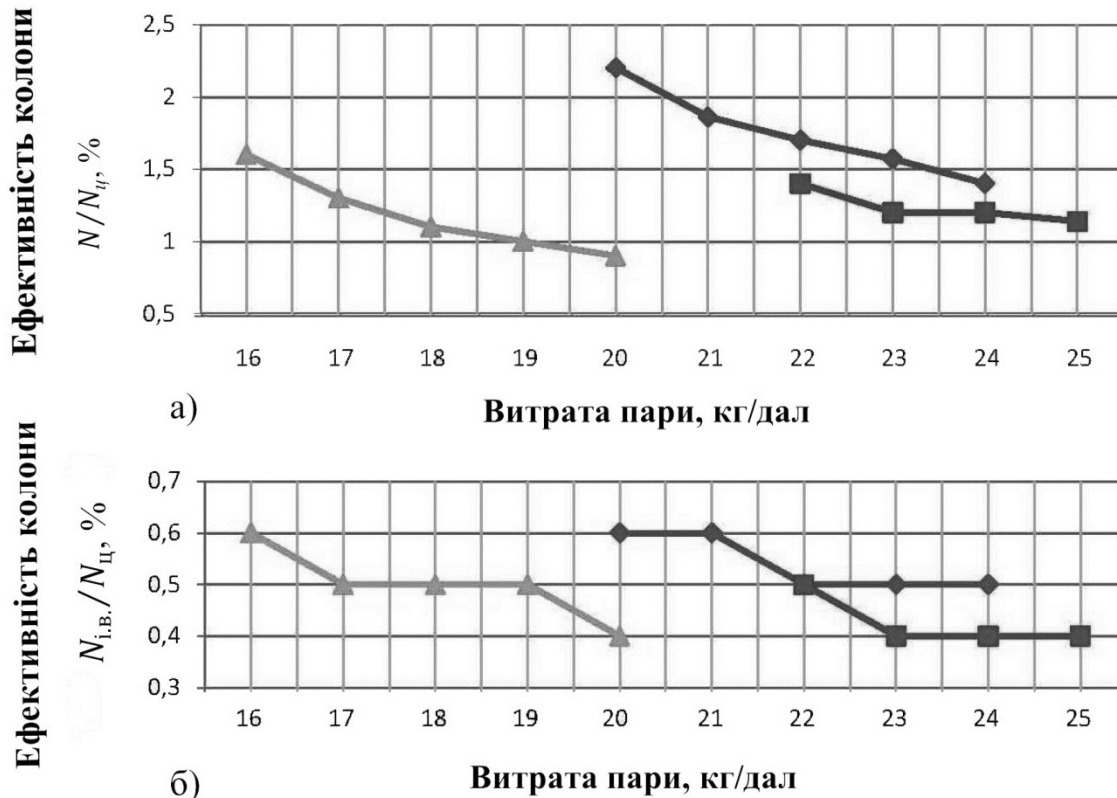


Рис. 9. Ефективність бражної колони:

а) відносно моделі теоретичної тарілки,  $N/N_{т}$ ; б) відносно моделі теоретичної тарілки ідеального витіснення,  $N_{i.в.}/N_{ц}$ . Етап I (7 тарілок) ◆ – 7 % об., ■ – 8 % об.  
Етап II (10 тарілок) △ – 9 % об.

**П'ятий розділ “Промислове впровадження розроблених контактних пристроїв”** присвячений аналізу роботи контактних пристроїв у промисловій колоні концентрування домішок. Колонні апарати з контактними пристроями впроваджені на ДП “Косарський спиртовий завод” та “Червонослобідський спиртовий завод”. Вони підтверджують теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи.

У зв'язку з плановою модернізацією БРУ при реконструкції колони концентрування домішок на ДП “Косарський спиртовий завод” діючу колону з 50 ковпачковими тарілками  $\varnothing$  850 мм замінили циклічною колоною  $\varnothing$  650 мм з 15 тарілками. Такий крок був пов'язаний з малими капітальними витратами, незначними ризиками впровадження нової технології та високою економічною ефективністю.

Після реконструкції було отримано наступні результати: навантаження на колону по спирту збільшилось на 50 %; вихід концентрату зменшився з 3...4 % до 0,6...0,7 %; концентрація етанолу в кубі колони збільшилась з 6...8 % об. до 10...20 % об.; витрата пари зменшилась з 800...1000 кг/год до 300...350 кг/год; подача води на гідроселекцію зменшилась з 3...4 м<sup>3</sup>/год до 1,5...3 м<sup>3</sup>/год.

Кубову рідину колони, якість якої була не гірша за якість епюрату, подавали в епюраційну колону, як воду на гідроселекцію. Запропоноване нами

технічне рішення дозволило зменшити кількість води на гідроселекцію та кількість рециклів.

Стабільну роботу колони забезпечував самозаливний гідрозатвор, згідно з патентом на корисну модель № 53305. Необхідність у створенні такого гідрозатвору виникла у зв'язку з інтенсивною турбулізацією рідини на тарілках колони.

На ДП “Косарський спиртовий завод” проведено порівняльні хроматографічні аналізи кубової рідини та епюрату. Було відзначено, що практично для всіх випадків склад кубової рідини колони концентрування домішок за головними та верхніми проміжними домішками якість був кращою, ніж епюрат. Кінцевим результатом реконструкції стало збільшення виходу спирту на 3 % від продуктивності заводу, зменшення питомої витрати пари на 2 кг/дал, покращення фізико-хімічних та органолептичних показників спирту етилового ректифікованого класу “Люкс”, ДСТУ 4221:2003.

## **ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі проведено теоретичний аналіз та запропоновано апаратне оформлення способу інтенсифікації процесу масообміну в тарілчастих колонних апаратах за допомогою циклічних режимів роботи та реалізовано промислове впровадження розроблених контактних пристроїв, що дозволило отримати такі результати:

1. Створено програмне забезпечення для моделювання процесу ректифікації бражної колони. Математичне моделювання дозволяє:
  - а) отримати робочу лінію процесу, концентраційні профілі ЛЛК у рідині та парі на ступенях контакту, кількість ступенів контакту та їхню ефективність;
  - б) визначити вміст етанолу в дистилаті та втрати в барді;
  - в) дослідити вплив керівних факторів процесу та параметрів моделі на ефективність розділення, отримати залежність кількості теоретичних тарілок від концентрації бражки при різних значеннях параметрів моделі;
  - г) провести порівняння розрахункової витрати пари для стаціонарного та циклічного процесів;
  - д) використати програмне забезпечення при проектуванні, оптимізації та експлуатації колонних апаратів.

2. Розроблено контактні пристрої, які забезпечують однократну зміну рідинної затримки на ступені контакту та мають суттєві переваги над відомими контактними пристроями. На запропоновані конструкції отримано патенти на винаходи України, США та Євразії.

3. Створено експериментальну установку та виконано комплекс досліджень режимів роботи бражної колони. Визначено гідродинамічні характеристики тарілок та їх робочий діапазон (по рідині та парі), який відповідає промисловим навантаженням.

4. Встановлено, що для експериментальної бражної колони кількість тарілок в 2,0...2,5 рази менше, ніж у промислових колонах. Питома витрата пари на перегонку зменшилась на 4...5 кг/дал. Навантаження тарілки по бражці

складає 15...20 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>год.

5. Підтверджено адекватність математичної моделі промисловим режимом роботи експериментальної бражної колони.

6. Показано, що технічні характеристики колони концентрування домішок на ДП “Косарський спиртовий завод” переважають характеристики ковпачкової колони за наступними позиціями: навантаження на колону по спирту збільшилося у 3 рази, площа січення колони зменшилась у 2 рази, кількість тарілок зменшилась у 3,3 рази, витрата пари зменшилась у 2,5 рази, а води на гідроселекцію – у 2,5 рази. Ефективність розділення автотельна відносно діаметра колони.

7. Економічна ефективність від впровадження колони ККД у циклічному режимі досягається за рахунок збільшення виходу спиту етилового ректифікованого на 3 % від продуктивності заводу та зменшення питомих витрат пари на 2 кг/дал.

8. Промислові колони впроваджені на ДП “Косарський спиртовий завод”, “Червонослобідський спиртовий завод”.

#### **ПЕРЕЛІК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:**

1. Малета Б. В. Співставлення циклічного та стаціонарного процесу ректифікації / Б. В. Малета, В. М. Таран, В. Н. Малета // Наукові праці НУХТ. – 2010. – №33. – С. 95–97.

*Особистий внесок дисертанта: продемонстрував загальні риси циклічного та стаціонарного процесів ректифікації.*

2. Maleta B. Hydrodynamics of Liquid Flow in the Model of Theoretical Stage with Perfect Displacement / B. Maleta, V. Taran, and V. Maleta // Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – Volume 5. – Number 1, January 2011. – USA. – p. 25–29.

*Особистий внесок дисертанта: вдосконалив теоретичні положення.*

3. Maleta B. Understanding process intensification in cyclic distillation systems / B. Maleta, A. Kiss, V. Taran, V. Maleta // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – Volume 50, Issue 7. – July 2011. – USA. – p. 655–664.

*Особистий внесок дисертанта: розробив методика досліджень, опрацював і узагальнив експериментальні дані та підготував матеріали до публікації.*

4. Патент на винахід 81700 Україна, МПК В01D 3/30 Массообмінний контактний пристрій / Б. В. Малета, О. В. Малета; заявка – № а2006 03889; заявл. 10.04.2006; опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2.

*Особистий внесок дисертанта: взяв участь у розробці конструкції масообмінного контактного пристрою.*

5. Євразійський патент на винахід 012722, Массообменное контактное устройство / Б. В. Малета, О. В. Малета; заявка – № 2008 01972; заявл. 03.04.2007; опубл. 30.12.2009.

*Особистий внесок дисертанта: взяв участь у розробці конструкції та підготував матеріали заявки згідно з вимогами ЕПО.*

6. United States Patent US 8158073 B2, Mass Exchange Contact Device / В. Maleta, О. Maleta, PCT/UA2007/000021 on Apr. 3, 2007; Prior Publication Date US2010/0221156A1 Sep. 2, 2010; Date of Patent Apr. 17, 2012.

*Особистий внесок дисертанта: взяв участь у розробці конструкції та вніс пропозиції щодо розміщення насадки та каталізатора в просторі між тарілками.*

7. Патент на винахід 83273 Україна, МПК В01D 3\16, В01D 3\18, В01D 3\22 Контактний пристрій для масообмінних апаратів / Б.В. Малета, О.В. Малета; заявка – № а2006 07648; заявл. 10.07.2006; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12.

*Особистий внесок дисертанта: взяв участь у розробці конструкції масообмінного контактеного пристрою без рухомих елементів.*

8. Патент на винахід 92839 Україна, МПК В01D 3\30 Масообмінний контактний пристрій / Б. В. Малета, О. В. Малета; заявка – № а2009 04725; заявл. 13.05.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.

*Особистий внесок дисертанта: підготовка матеріалів заявки та вдосконалення конструкції масообмінного контактеного пристрою.*

9. Патент на корисну модель 53305 Україна, МПК В01D 3\30, В01D 3\14 Самозаливний гідрозатвор / Б. В. Малета, О. В. Малета; заявка – № u2008 14827; заявл. 23.12.2008; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19.

*Особистий внесок дисертанта: запропонував конструкцію гідрозатвора.*

10. Малета Б. В. Перспективи використання технології ректифікації з РРФ в спиртовій промисловості України / Б. В. Малета, В. М. Таран // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ ст. : Програма і матеріали 73-ї наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 23–24 квітня 2007 р. – Тези доп. – К. : НУХТ, 2007. – Ч. II. – С. 37.

*Особистий внесок дисертанта: продемонстрував потенційні можливості використання технології ректифікації з РРФ у спиртовій промисловості України.*

11. Малета Б. В. Промислово-експериментальна колона по розгонці головної фракції з роздільним рухом фаз / Б. В. Малета, В. М. Таран // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ ст. : Програма і матеріали 74-ї наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 21–22 квітня 2008 р. – Тези доповіді. – К. : НУХТ, 2008. – С. 240.

*Особистий внесок дисертанта: розробив методіку досліджень, опрацював і узагальнив експериментальні дані та підготував матеріали до публікації тез.дей*

12. Малета Б. В. Работа разгонной колонны с раздельным движением фаз / Б. В. Малета, В. М. Таран // Техника и технология пищевых производств : VI Международная научная конференция студентов и аспирантов : Тезисы доклада. – Могилёв : УО МГУПП, 2008. – С. 110.

*Особистий внесок дисертанта: проаналізував роботу колони концентрування домішок.*

13. Малета Б. В. Колона концентрації метанолу з роздільним рухом фаз / Б. В. Малета, В. М. Таран // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем

харчування людства у XXI ст. : Програма і матеріали 75-ї наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 13–14 квітня 2009 р. – Тези доповіді. – К. : НУХТ, 2009. – С. 231.

*Особистий внесок дисертанта: проаналізував роботу колони концентрування метанолу.*

14. Малета Б. В. Аналіз конструктивних рішень реалізації масообміну з роздільним рухом фаз в тарілчастих колонних апаратах / Б. В. Малета, В. М. Таран // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI ст. : Програма і матеріали 76-ї наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 12–13 квітня 2010 р. – Тези доповіді. – К. : НУХТ, 2010. – С. 110.

*Особистий внесок дисертанта: провів аналіз конструкцій та підготував матеріали до публікації тез.*

15. Maleta B. Energy-saving technology of mass transfer in tray columns with separate phase movement / B. Maleta, V. Taran, and V. Maleta // The 6<sup>th</sup> European Meeting on Chemical Industry and Environment EMChIE (Mechelen, Belgium, 2010), Conference Proceeding. – Volume 2. – p. 1149–1155.

*Особистий внесок дисертанта: продемонстрував переваги циклічної ректифікації з точки зору витрати енергії.*

16. Maleta B. Use of a theoretical stage model with perfect displacement with a trayed column with separate movement of the vapor and liquid phases / B. Maleta, V. Taran, and V. Maleta // 19<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010 and the 7<sup>th</sup> European Congress of Chemical Engineering ECCE-7 (Prague, Czech Republic, 2010), Separation Process. – Summaries 2. – p. 490–491.

*Особистий внесок дисертанта: вдосконалив теоретичні положення.*

17. Maleta B. Hydrodynamics of liquid flow in the model of theoretical stage with perfect displacement / B. Maleta, V. Taran, V. Maleta // 9<sup>th</sup> Distillation & Absorption Conference (Eindhoven, the Netherlands, 2010), abstract of the report. – p. 70.

*Особистий внесок дисертанта: вдосконалив теоретичні положення.*

18. Малета Б. В. Гідродинаміка рідинного потоку в моделі теоретичної тарілки ідеального витиснення / Б. В. Малета, В. М. Таран // Конференція, присвячена 80 річчю НУХТ, – 27–28 вересня 2010 р. – Тези доповіді. – К. : НУХТ, 2010. – С. 70.

*Особистий внесок дисертанта: вдосконалив теоретичні положення.*

19. Малета Б. В. Моделювання циклічної ректифікаційної колони / Б. В. Малета, В. М. Таран // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI ст. : Програма і матеріали 77-ї наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 11–12 квітня 2011 р. – Тези доповіді. – К. : НУХТ, 2011. – Ч. 2. – С. 5.

*Особистий внесок дисертанта: провів математичне моделювання.*

## АНОТАЦІЯ

### **Малета Б. В. Підвищення ефективності масообміну в колонних апаратах з циклічним рухом фаз. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2013.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності масообміну в тарілчастих колонних апаратах за рахунок забезпечення ідеального витіснення по рідині та парі з використанням спеціальних контактних пристроїв.

Розроблено програмне забезпечення та проведено математичне моделювання циклічного процесу масообміну в бражній колоні. Досліджено вплив параметрів процесу та керуючих факторів моделі на ефективність розділення.

Розроблено та запатентовано конструкції контактних пристроїв, які забезпечують ідеальне витіснення по рідині та парі. Здійснено комплекс досліджень, у результаті яких визначено гідродинамічні характеристики тарілки та робочий діапазон навантажень тарілки по рідині та парі.

Проведено дослідження роботи бражної колони та підтверджена адекватність математичної моделі експериментальній установці. У промислових умовах продемонстровані переваги циклічного режиму над стаціонарним. Запропоновано методику порівняння ефективності колони в циклічному режимі відповідно до моделі теоретичної тарілки ідеального витіснення.

Здійснено промислове впровадження розроблених контактних пристроїв для колони концентрування домішок. У процесі промислової експлуатації підтверджено підвищення ефективності масообміну в 3...4 рази при зменшенні енергетичних витрат в 1,5...2 рази.

**Ключові слова:** циклічна ректифікація, колона концентрування домішок, бражна колона, теоретична тарілка ідеального витіснення, математична модель, масообмінні процеси.

## АННОТАЦИЯ

### **Малета Б.В. Повышение эффективности массообмена в колонных аппаратах с циклическим движением фаз. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2013.

Диссертационная работа посвящена повышению эффективности массообмена в тарельчатых колонных аппаратах за счет обеспечения идеального вытеснения по жидкости и пару с использованием специальных контактных устройств.

На примере бражной колонны проведена оценка диапазона нагрузок по жидкости и пару разработанных тарелок. Определены режимы работы бражной

колоны и эффективность контактных устройств, а также показаны преимущества колонных аппаратов в циклическом режиме работы. Изучено влияние основных факторов на эффективность разделения. Продемонстрирована экономическая целесообразность использования колонных аппаратов, работающих в циклическом режиме. Данные, полученные в результате экспериментов, были использованные при математическом моделировании и определении эффективности колонны.

Приведены методики теоретических и экспериментальных исследований технологии циклической ректификации, разработаны технические рекомендации, которые послужили основой для промышленного внедрения. Показаны результаты работы промышленной колоны концентрирование примесей на примере “ДП Косарский спиртовой завод”. Проведено сопоставление результатов работы стандартной колонны концентрирования примесей  $\varnothing 850$  мм с 50 колпачковыми тарелками, с циклической колонной  $\varnothing 650$  мм с 15-ма тарелками.

Первый раздел работы посвящен анализу конструкций контактных устройств и теоретических основ массообмена в циклическом режиме.

Второй раздел работы посвящен математическому моделированию циклического процесса массообмена в бражной колонне. Разработанное программное обеспечение может быть использовано для проектирования, оптимизации и эксплуатации колонных аппаратов. Исследовано влияние параметров модели и управляющих факторов на эффективность разделения. Проведен сравнительный анализ циклического и стационарного режимов.

Третий раздел посвящен разработке контактных устройств, обеспечивающих идеальное вытеснение по жидкости и пару. Создана экспериментальная установка и проведен комплекс исследований, в результате которых определены гидродинамические характеристики тарелки и рабочий диапазон нагрузок по жидкости и пару.

Четвертый раздел посвящен исследованиям экспериментальной бражной колонны. Подтверждена адекватность математической модели экспериментальной установке. Проведен сравнительный анализ пилотной установки и промышленных бражных колонн. Экспериментально подтверждены преимущества циклического режима. Предложена методика определения эффективности колонны в циклическом режиме согласно модели теоретической тарелки идеального вытеснения.

Пятый раздел посвящен промышленному внедрению колонны концентрирования примесей с разработанными контактными устройствами. Показаны результаты работы колоны в виде физико-химических анализов концентрата примесей головного характера и кубовой жидкости. В процессе промышленной эксплуатации подтверждено повышение эффективности массообмена в 3...4 раза при уменьшении энергетических затрат в 1,5...2 раза.

**Ключевые слова:** циклическая ректификация, колонна концентрирования примесей, бражная колонна, теоретическая тарелка идеального вытеснения, математическая модель, массообменные процессы.

## SUMMARY

### **Maleta B.V. Improving of the mass transfer efficiency in tray distillation column with cyclic movement phases. – Manuscript.**

The thesis for obtaining of scientific degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions. National University of Food Technologies, Kyiv, 2013.

The thesis is devoted to improving of the mass transfer efficiency in tray distillation column with cyclic movement phases by providing ideal displacement on liquid and vapor.

The software is developed and carried out mathematical modeling of cyclic mass transfer process in the beer column. The investigated the influence of process parameters on the efficiency of the separation.

The developed and patented designs of the mass transfer contact devices that provide an ideal displacement in liquid and vapor. The conducted complex research of mass transfer contact devices, as a result we have a hydrodynamic characteristic of distillation trays and operating range load.

The researched the beer column and confirmed the adequacy of the mathematical model of the experimental unit. The industrial conditions demonstrated advantages cyclic mode over standard.

We proposed method of comparing the efficiency of the columns in a cyclic mode according to the model of theoretical trays ideal displacement.

Done industrial implementation of the development mass transfer contact devices in column of the concentration impurities. During the industrial operation confirmed efficiency of mass transfer in 3...4 times while reducing energy costs at 1.5...2 times.

**Key words:** cyclic distillation, column concentration of impurities, beer column, theoretical trays of perfect displacement, mathematical model, mass transfer processes.