

ТЕХНОЛОГІЯ ЦИКЛІЧНОЇ РЕКТИФІКАЦІЇ В КОЛОННИХ МАСООБМІННИХ АПАРАТАХ З БАРБОТАЖНО-ПРОВАЛЬНИМИ ТАРІЛКАМИ

Вступ. У колонних масообмінних апаратах з тарілками без зливних пристроїв пара і рідина проходять через одні й ті ж самі отвори або щілини. Такі тарілки називаються провальними. До них належать дірчасті, рейчасті, трубчаті, хвилясті та інші. Переваги провальних тарілок — простота конструкції, низька вартість виготовлення і монтажу, порівняно невеликий гідравлічний опір. Головний недолік – невеликий інтервал зміни швидкостей пари і рідини, в межах якого підтримується стійка та ефективна їх робота, недостатній час контакту фаз, а також перемішування рідини на суміжних тарілках.

Авторами запропонована технологія циклічної ректифікації за безперервної подачі гріючої пари в масообмінних колонних апаратах з барботажно-провальними тарілками. Інноваційна технологія передбачає здійснення контрольованих циклів затримки рідини на полотнах провальних тарілок та її періодичного переливу через всі отвори з верхніх тарілок на нижні завдяки миттєвій зміні швидкості пари. Під час затримки рідини на полотні тарілки відбувається масообмін між рідиною і парою, яка барботує через отвори контактних пристроїв. В цей період робочого циклу рухомий клапан закриває переливний отвір, тарілка є непровальною або барботажною. В момент відкривання переливного отвору швидкість пари в барботажних отворах стає нижчою за критичну, за якої рідина утримується на полотні, і відбувається її «провал» на нижче розташовану тарілку. В цей період циклу тарілка стає провальною (відбувається перелив рідини). Універсальність роботи барботажно-провальних тарілок полягає у почерговій зміні швидкості пари в отворах контактних пристроїв завдяки зміні вільного перерізу тарілок в заданому діапазоні значень за заданим алгоритмом. У вищевказаних умовах зростає рушійна сила процесу масообміну через збільшення градієнту концентрацій летких компонентів, покращуються дифузійні характеристики контактних пристроїв, підвищується ефективність їх роботи і зменшуються питомі витрати гріючої пари [1].

Актуальність теми обумовлена визначенням гідродинамічного режиму роботи барботажно-провальних тарілок та дослідженням ефективності технології циклічної ректифікації в масообмінних колонних апаратах, оснащених барботажно-провальними тарілками із змінним вільним перерізом в процесах розгонки спиртовмісних фракцій і епюрації бражного дистилляту, встановлення питомих витрат гріючої пари в розгінній і епюраційній колонах.

Матеріали та методи. Методи досліджень — аналітичні, хімічні, фізико-хімічні з використанням приладів та методики досліджень, що застосовуються у виробництві ректифікованого етилового спирту. Витрати рідини контролювали за допомогою витратоміру РМ, швидкість повітря у вільному перерізі колони — анемометром МС-13, в отворах тарілок — розрахунковим методом. Концентрацію летких домішок спирту визначали на газовому хроматографі з колонкою НР FFAP 50 m×0,32 m. Аналіз дослідних проб виконували згідно ДСТУ 4222:2003 «Горілки, спирт етиловий та водно-спиртові розчини. Газохроматографічний метод визначення вмісту мікрокомпонентів».

Результати та обговорення. Ефективність роботи барботажно-провальних тарілок в умовах циклічної ректифікації залежить від прийнятих гідродинамічних режимів, що визначають межі стабільної роботи масообмінних колонних апаратів. Необхідною умовою їх встановлення є визначення гранично допустимої швидкості пари (верхньої і нижньої критичної швидкості) у вільному перерізі колони та барботажних отворах. Нижня межа відповідає швидкості пари, за якої «провал» рідини з верхніх тарілок на нижні припиняється, Верхня межа відповідає швидкості пари, при якій розпочинається винесення рідини з нижніх тарілок на верхні (бризковиніс), що призводить до зменшення поверхні контакту фаз.

Дослідження проводили на експериментальній ректифікаційній колоні, оснащених змінними контактними пристроями — сітчастими і лускоподібними, в системі вода-повітря. Характеристики колони: діаметр — 300 мм; кількість тарілок — 5 шт.; відстань між тарілками — 300 мм; діаметр барботаєжних отворів — 2,4 мм; площа перерізу отворів лусок арочного типу — 19,42 мм²; товщина полотна тарілки — 2 мм; вільний переріз тарілки — 2,6 %; висота шару рідини на тарілках — 35 мм. Для сітчастих тарілок витрати повітря змінювали в діапазоні 1-15 дм³/с, що відповідає зміні швидкості в барботаєжних отворах 1,5-10 м/с, щільність зрошення коливалась в межах від 4 до 11 м³/(м²·год). Для лускоподібних тарілок щільність зрошення змінювали від 5 до 15 м³/(м²·год).

Відомо, що для підвищення коефіцієнтів корисної дії тарілок різних конструкцій доцільно здійснювати затримку рідини на їх полотні шляхом організації течії окремих парорідинних струменів із взаємним зіткненням або додаткової установки перегородок і відбивачів. Пристрої для гальмування руху рідини виконують у вигляді отворів, насадок та ін. Площа вільного перерізу отворів із зустрічним потоком пари становить 2-3 % від загальної площі тарілки. Для збільшення тривалості контакту пари і рідини та інтенсифікації масообміну на окремих ділянках тарілки встановлюють вертикальні перегородки. Контактні пристрої з частковою компенсацією прямогоку вперше були досліджені А.Н. Прохоровим. Заслужують на увагу дослідження, проведені в цьому напрямку, В.П. Кривошеєвим, О.В. Ануфрієвим, М.І. Фараховим, С.Б. Азізовим, А.А. Kiss, Н.Р. Flodman, М. Matsubara, М. Petrus та ін. [2]. Незважаючи на отримані позитивні результати, обґрунтовані методами математичного моделювання, відомі способи і моделі не знайшли широкого практичного застосування через складність обраних конструктивних рішень, відсутність масообміну в паровий період, коливання тиску пари в колекторі та низьку пропускну здатність колонних масообмінних апаратів по парі та рідині.

Для вирішення поставлених задач авторами запропоновані технологія циклічної ректифікації, що дозволяє виключити вищевказані недоліки, та відповідна конструкція колонного масообмінного апарата. Спосіб передбачає періодичний перелив рідини з тарілки на тарілку завдяки примусовій роботі переливних пристроїв, що містять рухомі елементи, зв'язані з приводним механізмом [3]. Крім того, для реалізації способу передбачено оснащення колонного апарата лускоподібними тарілками з коаксіальним розташуванням лусок. Таке технічне рішення дозволяє виключити односпрямованість потоків пари і рідини по всій площі тарілки. А у разі розділення сумішей, що містять зважені частинки (наприклад, в браєжних колонах браєоректифікаційних установок), виключити можливість утворення застійних зон, пригоряння на поверхні тарілок зважених частинок та збільшити таким чином термін їх експлуатації без зупинки на профілактичні роботи.

Для реалізації запропонованого способу і проведення досліджень тарілки експериментальної колони були оснащені поворотними сегментами, оснащеними мікропроцесорною пневматикою фірми FESTO (з'єднаними із стандартними пневмоциліндрами двобічної дії типу DNT 63-50-PPV-A), які рухались почергово відповідно до програми контролера М340 фірми «Schneider Electric». Рухомі сегменти відкривали та закривали переливні отвори тарілок таким чином, що перелив рідини відбувався періодично по висоті колони зверху вниз. Управління мехатронними підсистемами відбувалося сучасними комп'ютерно-інтегрованими засобами.

На першому етапі досліджень були встановлені гідродинамічні режими стабільної роботи сітчастих і лускоподібних тарілок в циклічному режимі, визначені гранично допустимі значення швидкості повітря в барботаєжних отворах і у вільному перерізі колони. Для сітчастих тарілок: нижня критична швидкість повітря в барботаєжних отворах (V_{ome}) становила 5,4 м/с; лінійна швидкість повітря у вільному перерізі колони ($V_{лин}$) — 0,25 м/с. Для лускоподібних тарілок: (V_{ome}) дорівнювала 6,5 м/с; ($V_{лин}$) в барботаєжному режимі роботи тарілок становила 0,5-0,9 м/с, перехідному — 0,9-1,3 м/с і струменевому — 1,3-2,0 м/с. На другому етапі була визначена швидкість повітря в отворах (V_{op}), за якої спостерігався бризковинос рідини. Для сітчастих тарілок: (V_{op}) становила 8 м/с; при цьому ($V_{лин}$)

дорівнювала 0,7 м/с; відносна величина бризковиносусу (e) не перевищувала 0,01 кг рідини на 1 кг повітря. Для лускоподібних тарілок: ($V_{бр}$) становила 1,3-1,5 м/с; в струменевому режимі (e) не перевищувала 0,2 кг/кг повітря, в барботажному режимі — 0,1 кг/кг. Крім того, було встановлено, що інтенсивний перелив рідини через барботажні отвори відбувається при швидкостях повітря, менших від нижньої критичної. Для дослідних типів тарілок така швидкість не повинна перевищувати 1,5-1 м/с. Отримані експериментальні дані можуть бути використані для проектування тарілчастих масообмінних апаратів циклічної дії.

Дослідження ефективності запропонованої технології проводились у виробничих умовах Сторонибаського МПД ДП «Укрспирт» в процесах розгонки спиртовмісних фракцій і епюрації бражного дистилляту в режимі гідроселекції. Для досліджень була змонтована експериментальна колона, оснащена коаксіально розташованими лускоподібними барботажно-провальними тарілками, з'єднаних з мехатронними підсистемами. Хроматографічний аналіз дослідних проб живлення ($Ж$), кубової рідини ($КР$), концентрату естеровивушного ($КЕС$), епюрату ($Е$), головної фракції ($ГФ$), ректифікованого етилового спирту ($РС$) та розрахункові значення ступеню вилучення (α) і кратності концентрування (β) летких домішок спирту в обраному гідродинамічному режимі приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Аналіз дослідних проб і розрахункові значення (α) і (β) летких домішок

Група домішок	Концентрація, мг/дм ³						α	β
	Ж	КР	КЕС	Е	ГФ	РС		
Етанол, % об.	30,5	3,7	67	30,14	92,5	96,5	8,24	2,20
Альдегіди	318,62	2,75	2302,18	0,29	1135,26	0,18	115,86	7,23
Естери	40,50	—	448615,11	—	2394,99	—	∞	11076,92
Метанол, %	0,18	0,0003	2,69	0,0023	0,49	0,0003	600	14,94
Масло сивушне	105882,74	726,94	726463,81	1179,78	3113,18	0,88	145,66	6,86

Після включення експериментальної розгінної колони вихід ректифікованого етилового спирту збільшився на 3,8 %. В процесі розгонки повністю видалялися естери. Порівняно з типовою розгінною колоною ступінь видалення вищих спиртів масла сивушного і метанолу збільшилась на 38 %, кратність концентрування головних домішок підвищилась на 25 %, вищих спиртів — на 40 %, метанолу — на 37 %. Встановлено, що питома витрата гріючої пари на розгінну колону зменшилась від 25 до 16 кг/дал безводного спирту, введеного на тарілку живлення, на епюраційну колону — від 15 до 8,2 кг/дал безводного спирту. За всіма показниками отриманий спирт етиловий ректифікований відповідав вимогам спирту сорту «Люкс».

Висновок. Запропонована технологія циклічної ректифікації в колонних апаратах, оснащених барботажно-провальними тарілками. Отримані експериментальні дані гранично допустимої швидкості пари у вільному перерізі колони і барботажних отворах сітчастих і лускоподібних тарілок. У виробничих умовах проведені дослідження ефективності запропонованої технології. Проведений порівняльний аналіз ступеню вилучення і кратності концентрування груп летких домішок в експериментальній і типовій розгінних колонах. Встановлено, що використання інноваційної технології дозволяє зменшити питомі витрати гріючої пари в розгінній та епюраційній колонах на 36 % в порівнянні з типовими.

Література.

1. Патент України 89874 С2. Спосіб переливу рідини по тарілках колонного апарата у процесі масообміну між парою та рідиною / Дмитрук А.П., Черняхівський Й.Б., Дмитрук П.А., Булій Ю.В. – Заявлено 06.06.08; Опубл. 10.03.10, Бюл. № 5.– 4 с.
 2. Kiss A. Cyclic distillation – Design, control and applications // Separation and Purification Technology. – 2014. – Vol. 125. – P. 326–336.
 3. Патент України 116565. Ректифікаційна колона з керованими циклами / Булій Ю.В., Шиян П.Л., Дмитрук А.П., Дмитрук П.А. – Заявлено 12.12.16; Опубл. 25.05.17, Бюл. № 10. – 5 с.
Булій Ю.В., Куц А.М., НУХТ, м. Київ, Україна
- Технологія циклічної ректифікації в колонних масообмінних апаратах з барботажно-провальними тарілками.