

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАСООБМІНУ МІЖ РІДИНОЮ І ПАРОЮ

Булій Ю.В.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Ободович О.М.<sup>2</sup>, д-р техн. наук.

<sup>1</sup> - Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, 01601, Україна

<sup>2</sup> – Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

Запропонована інноваційна технологія ректифікації в режимі роздільного руху фаз при безперервній подачі в ректифікаційну колону пари і рідини. Подовження часу затримки рідини на тарілках до досягнення фазової рівноваги дозволяє підвищити ефективність масообміну, скоротити енерговитрати на 40 % і знизити собівартість обладнання.

**Ключові слова:** контрольовані цикли, ректифікація, фазова рівновага, масообмін, ректифікаційна колона.

«Бібл. 7, рис. 4».

Предложена инновационная технология ректификации в режиме раздельного движения фаз при непрерывной подаче в ректификационную колонну пара и жидкости. Увеличение времени задержки жидкости на тарелках до достижения фазового равновесия позволяет повысить эффективность массообмена, сократить расход греющего пара на 40 % и снизить себестоимость оборудования.

Proposed innovative technology of rectification in a mode separate phase movement by continuously feeding in a distillation column vapor and liquid. The increase in the delay time of the liquid on the plates to achieve phase equilibrium improves the efficiency of mass transfer, to reduce the consumption of heating steam by 40% and reduce the cost of the equipment.

Одним із шляхів підвищення ефективності масообміну між рідиною і паром є подовження проміжку часу перебування рідини на тарілках ректифікаційної колони до моменту досягнення рівноважного стану шляхом організації роздільного руху фаз. Найбільш ефективно розділення летких компонентів на ступенях контакту відбувається в циклічному режимі, запропонованому Д. Кенноном в 60-х роках. Його використання дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії контактних пристроїв, покращити фізико-хімічні та органолептичні показники ректифікованого спирту, суттєво знизити собівартість обладнання, скоротити питомі витрати гріючої пари та об'єми спиртовмісних відходів спиртового виробництва.

Заслужують на увагу наукові роботи, проведені в цьому напрямку на кафедрі процесів і апаратів Київського технологічного інституту харчової промисловості під керівництвом проф. Тарана В.М. Перші масообмінні апарати для здійснення контрольованих циклів затримки та переливу рідини були запропоновані ними у 80-х роках.

На рис. 1 показано повздовжній переріз апарата, що включає корпус 1 з ситчастими тарілками 2, над кожною з яких розміщені тарілки 3 з клапанами 4, що з'єднані між собою [1]. Вільний перетин тарілки становив 70-75 %. Клапани 4 зв'язані з тягою 5, яка приводилась в рух приводним механізмом 6. Між приводом і корпусом апарата розташований пристрій 7 для регулювання висоти підйому клапанів 4.

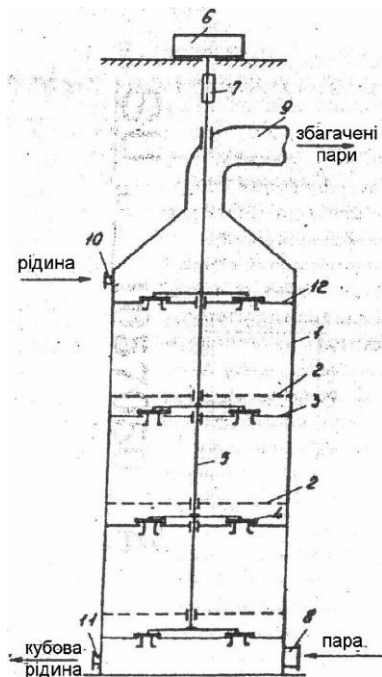


Рис. 1

Корпус 1 містить патрубки 8 для подачі пари, 9 для відводу збагачених парів, 10 для вводу рідини та 11 для відведення кубової рідини. Апарат працює при періодичній подачі пари та рідини на тарілку живлення. Пуск апарата здійснюється в рідинний період, коли клапани проміжних тарілок знаходяться у положенні «Закрито». Рідина накопичується на клапанній тарілці 12 в якості рідинної затримки і перебуває на ній визначений термін часу. В кінці рідинного періоду подачу рідини закривають і в кубову частину подають пару (паровий період). Механічний привід 6 піднімає клапани 4, і рідина з тарілки 12 переливається на тарілку 2, на якій підхоплюється струменями пари, швидкість якої в отворах тарілки досягає 10-15 м/с. Після відкриття клапанів 4 рідина після витримки перетікає з проміжної тарілки 2 на нижче розташовану тарілку 3. Таким чином протягом циклу проходить однократна зміна рідинної затримки на всіх тарілках колони.

Результатом подальших наукових досліджень став масообмінний апарат, представлений на рис. 2. Апарат містить корпус 1 з непровальними контактними елементами 2 (ковпачками, клапанами) і переливними пристроями, що складаються з двох коаксіально розміщених перфорованих циліндрів 3 і 4, один з яких (зовнішній 3) нерухомий, а другий (внутрішній 4) рухомий і з'єднаний з приводним

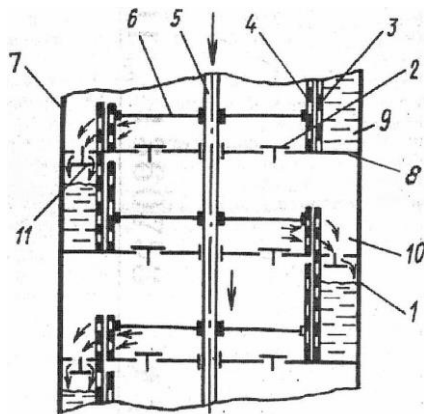


Рис. 2

механізмом 5 тягою 6. Зовнішній перфорований циліндр 3 разом з корпусом царги 7 утворює кільцевий простір, який розділений по висоті суцільними радіальними перегородками 8, що ділять кільцевий простір на накопичувальну 9 та зливну 10 камери. Для запобігання прориву пари в зливній камері встановлений зворотній клапан 11 [2].

Спосіб відбувається наступним чином. В рідинний період, коли положення рухомого циліндра забезпечує перекриття отворів в нерухомому циліндрі на ділянці накопичувальної камери, в останню надходить рідина із трубопроводу, утворюючи рідинну затримку тарілки. Перфорації в нерухомому та рухомому циліндрах на ділянці зливної камери в цей період співпадають (відкриті). Через заданий термін часу в момент початку парового періоду спрацьовує привід, і рухомий циліндр переводиться в положення, при якому отвори в циліндрах на ділянці накопичувальної камери суміщаються (відкриваються), і рідина із накопичувальної камери переливається на полотно тарілки в зону барботажу до переливної перегородки, отвори якої в цей період циклу закриті. При цьому положення рухомого циліндру на ділянці зливної камери таке, що отвори в рухомому та нерухомому циліндрах не співпадають. Потік пари проходить крізь клапани, і на тарілці відбувається масообмін.

Вдосконалена конструкція вищеописаного масообмінного апарату представлена на рис. 3.

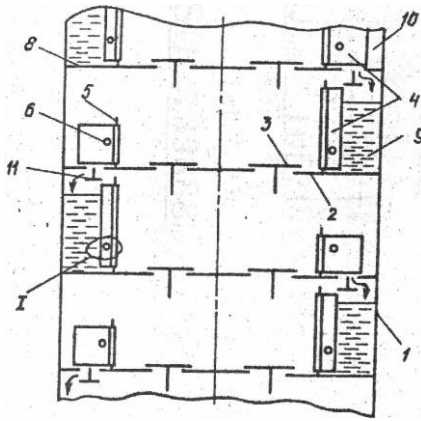


Рис. 3

Апарат містить корпус 1, тарілки 2 з контактними елементами 3, переливні пристрої, що складаються з жалюзійних пластин 4, поворотних навколо осей та з'єднаних тягами 6 з приводним пристроєм. Пластини 4 разом з корпусом утворюють кільцевий простір, розділений по висоті суцільними радіальними перегородками 8, які ділять кільцевий простір на накопичувальну 9 і зливну камери 10. В зливній камері встановлений зворотній клапан 11, а жалюзійні пластини в камерах 9 і 10 розвернені в протилежні сторони [3].

Спосіб відбувається наступним чином. В рідинний період, коли жалюзійні пластини 4 закриті, в накопичувальну камеру 9 тарілки подається рідина із трубопроводу в об'ємі, рівному рідинній затримці. В цей час пара в колону не надходить, контактні елементи герметизують основне полотно тарілки, зворотній клапан 11 і жалюзійні пластини зливної камери знаходяться в положенні «Відкрито». Через деякий термін часу подача рідини перекривається і в апарат подають пару. За сигналом командного пристрою привід переводить жалюзійні пластини 4 в положення «Відкрито», і рідина розтікається по площині тарілки, контактуючи з парою. При цьому жалюзі перегородки на ділянці зливу закриті, що запобігає перетоку рідини з тарілки в зливну камеру. Зворотній клапан 11 перекриває зливний отвір, запобігаючи проходженню пари через зливну камеру. Паровий та рідинний періоди повторюються по чергово.

Відомі масообмінні апарати не знайшли широкого практичного використання. Причиною цього було складність конструктивних рішень щодо реалізації технологічного процесу, відсутність масообміну в період надходження рідини на тарілку або її переливу через необхідність почергової або імпульсної подачі рідинного та парового потоків, а також залежність регулювання об'ємної швидкості переливу рідини від тиску пари.

У 2002 р. співробітниками ТОВ «Техінсервіс-процес» запропонований енергозберігаючий спосіб масообміну між рідиною і парою, що передбачає здійснення контрольованої у часі затримки рідини на тарілках ректифікаційної колони, оснащеної масообмінними контактними пристроями, дія яких залежить від тиску гріючої пари. Спосіб передбачає перелив рідини через перехідні ємкості в момент припинення подачі гріючої пари [4, 5].

Контактний пристрій складається з тарілки 1, на якій закріплений контактний елемент 2 з відігнутими по дотичній пластинами барботажного вузла 3, обичайки 4 з отворами 10 і 11 під полотном тарілки 1, додаткового (нижнього) полотна тарілки 5, двохстороннього клапана, який рухається в середині обичайки 4 і складається з верхньої 6 та нижньої 7 пластин, з'єднаних дистанційною стійкою 8. Відігнутий нижній край обичайки 4 виконує функцію обмежувача опускання (рис. 4).

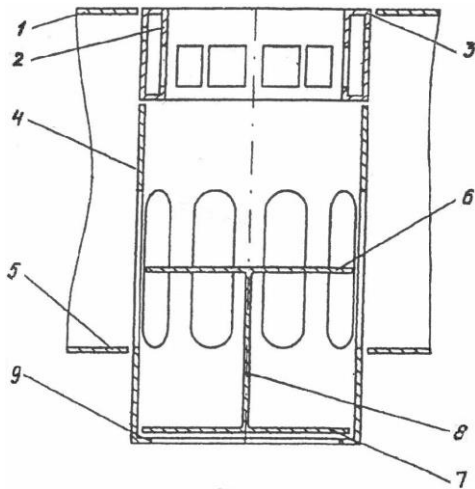


Рис. 4

В паровий період пара піднімається вгору по колоні (перелив рідини з тарілки на тарілку відсутній), піднімає клапан у верхнє положення таким чином, що верхня пластина 6 закриває отвір контактного елемента 2. Пара проходить через барботажний пристрій 3 і барботує через шар рідини. Після закінчення парового періоду подачу пари припиняють, і двохсторонній клапан падає донизу до тих пір, поки його рух не зупинить обмежувач опускання 9 обичайки 4. Рідина із зони барботажу на полотні тарілки 1 проходить через отвори 11 обичайки 4, попадає в перехідний об'єм. Час затримки подачі пари визначається часом переливу рідини з тарілки 1 у вищевказаний об'єм. В початковий момент подачі пари двохсторонній клапан рухається вгору, а рідина вниз. В отвори обичайки 4 починає надходити пара, що барботує крізь рідину. Із збільшенням отвору швидкість пари падає, і рідина починає переливатися на нижче розташовану тарілку. Наступні паровий та рідинний цикли здійснюються аналогічно.

Експериментальні дослідження ефективності запропонованої технології проводились у виробничих умовах ДП «Ковалівський спиртовий завод» в процесі перегонки спиртової бражки та ДП «Липницький спиртовий завод» в процесі розгонки головної фракції етилового спирту. Для перегонки бражки була виготовлена і змонтована експериментальна колона діаметром 325 мм. Колона мала 10 тарілок, відстань між якими дорівнювала 600 мм; вільний переріз тарілки становив 7 %. Гріюча пара подавалась в колону періодично з затримками 3-4 с. Дослідження процесу розгонки відбувалися в експериментальній колоні діаметром 400 мм, оснащеною 15 тарілками, відстань між якими становила 500 мм. Інтервал робочого циклу дорівнював 40 с.: час перетоку рідини 10 с., час рідинної затримки - 30 с.

В ході досліджень були виявлені переваги та недоліки запропонованого способу. Перевагою способу є скорочення витрати гріючої пари на 40 % в порівнянні з типовими установками та зниження собівартості обладнання. До основних недоліків відносяться: залежність роботи переливних пристроїв від тиску пари, низька пропускна здатність колони по парі та рідині, відсутність масообміну в період переливу рідини, виникнення імпульсу запізнення підняття клапанів по висоті колони та коливання тиску в загальному колекторі пари.

Для підвищення ефективності масообміну шляхом подовження часу контакту пари та рідини на тарілках колони до моменту їх фазової рівноваги співробітниками кафедри біотехнології продуктів бродіння і виноробства НУХТ в співпраці з ТОВ «ТІСЕР» у 2008 р. була запропонована енергозберігаюча технологія ректифікації в режимі контрольованих циклів затримки рідини на тарілках і синхронного її переливу у два послідовних етапи, що повторюються періодично за заданим алгоритмом без переривання потоків рідини та пари [6].

Метою роботи було дослідження ефективності масообміну між рідиною і паром на тарілках колони в процесі розгонки побічних продуктів і напівпродуктів брагоректифікації, встановлення питомих витрат гріючої пари.

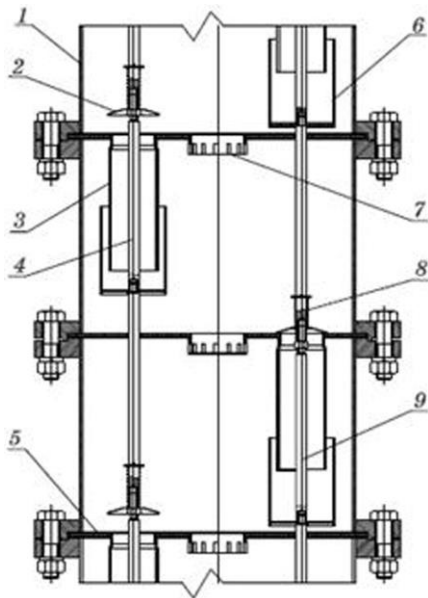


Рис. 5.

Випробовування проводились у виробничих умовах ДП «Чуднівський спиртовий завод». Об'єктом досліджень було обрано розгінну колону, в якій відбуваються процеси вилучення й очистки етилового спирту із фракцій, збагачених леткими органічними домішками, що входять до складу головної фракції етилового спирту, погонів із конденсаторів бражної та спиртової колон, конденсатора сепаратора вуглекислого газу, спиртовловлювачів та сивушного спирту.

Фрагмент експериментальної розгінної колони представлений на рис. 5. Колона діаметром 426 мм, висотою 11300 мм була оснащена 30 ситчастими контактними пристроями з отворами діаметром 2,4 мм. Відстань між тарілками становила 300 мм. Вільний переріз тарілок дорівнював 5,5 %. Колона містить корпус 1, тарілки 5 з контактними елементами 7 та переливними трубами 3, що вставлені в стакани 6. На рухомих тягах 4 і 9 були закріплені клапани 2. Тяги приводились у рух відповідно до програми контролера завдяки дії приводних механізмів (пневмоциліндрів типу DNT 63-50-PPV-A фірми FESTO). Клапани 2 по чергово відкривали та закривали переливні отвори парних та непарних за порядком розташування тарілок. Конструкція переливних пристроїв запобігала прориву пари в період переливу рідини. Для щільності клапани піджимались пружинами 8. Всі конструктивні елементи ректифікаційної установки були виконані із нержавіючої харчової сталі марки 12X18H10T.

Спиртовмісні фракції безперервно подавались на 20-у тарілку живлення. Їх витрати становили 96 дм<sup>3</sup>/год. в перерахунку на абсолютний алкоголь (а.а.). На верхню тарілку колони надходила гаряча пом'якшена вода для гідроселекції домішок, в нижню її частину безперервно подавалась гріюча пара. Тиск в кубовій частині колони дорівнював 30 кПа, у верхній її частині 2...5 кПа, температура кубової рідини - 98° С, в парі над верхньою тарілкою – 85° С. Температура води на охолодження на вході в конденсатор дорівнювала 15° С, на виході після дефлегматора - 65° С. Робочий цикл процесу дорівнював 40 с.: час затримки рідини – 13 с., час її переливу – 7 с. Концентрація етилового спирту в кубовій рідині не перевищувала 8 %. Концентрат домішок відбирали із конденсатора колони в кількості 0,23...0,27 % від а.а. бражки. Очищену від головних та частини проміжних домішок кубову рідину повертали на верхню тарілку бражної колони. Управління рухомими клапанами та роботою пневмоциліндрів, контроль технологічних параметрів (температури, тиску) відбувався за допомогою автоматичних датчиків, сигнал від яких передавався на мікропроцесорний контролер. За критерій оптимізації процесу приймали ступінь вилучення та кратність концентрування домішок. Для їх

розрахунку здійснювали хроматографічний аналіз дослідних проб живлення, кубової водно-спиртової рідини та естери-сивушного концентрату.

Експериментально встановлено, що при використанні інноваційної технології в повній мірі видаляються альдегіди та естери, ступінь вилучення вищих спиртів (верхніх проміжних домішок) та метанолу зростає на 38 %, кратність концентрування головних домішок підвищується на 25 %, вищих спиртів – на 40 %, метанолу – на 37 %. Питомі витрати гріючої пари для вилучення спирту із спиртовмісних фракцій становить 11...13 кг/дал від а.а., що вводиться в колону. При цьому показники ректифікованого спирту відповідають вимогам для високоякісного спирту «Люкс».

Після проведення випробовувань запропонована авторами технологія ректифікації була впроваджена у виробництво і завдяки високій ефективності використовується по теперішній час.

**Висновки.** Використання інноваційної технології ректифікації в процесі розгонки спиртовмісних фракцій дозволяє підвищити ефективність масообміну між рідиною і парою: ступінь вилучення та кратність концентрування головних домішок спирту підвищуються на 25 %, вищих спиртів сивушного масла і метанолу на 38 %, витрати гріючої пари скорочуються на 40 % в порівнянні з типовими ректифікаційними установками завдяки зменшенню вільного перетину тарілок на 45...50 % та подовженню часу перебування рідини на тарілках розгінної колони до досягнення фазової рівноваги. Час затримки рідини на ступенях контакту визначається експериментально.

Перспективним напрямком роботи є проведення досліджень щодо підвищення експлуатаційних і технологічних характеристик брагоректифікаційних установок різної модифікації при використанні технології керованої ректифікації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. А.с. № 185847 (СРСР). Массообменный аппарат для процессов в режиме с контролируемыми циклами /А.В.Копыленко и В.М.Таран. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 44.
2. А.с. № 1360753 (СРСР). Теплообменный аппарат / А.В. Копыленко, В.М. Таран и В.А. Заднепрный. – Оpubл. в Б.И., 1987, № 47
3. А.с. № 1360753 (СРСР). Теплообменный аппарат / А.В. Копыленко, В.М. Таран и В.А. Заднепрный. – Оpubл. в Б.И., 1988, № 20.
4. *Патент України* 60566 А. Массообмінний контактний пристрій / Малета В.М., Щуцький І.В., Дмитрук А.П., Черняхівський Й.Б. - Заявлено 10.12.02; Оpubл. 15.10.03, Бюл. № 10.
5. *Патент України* 60565 А. Спосіб перетікання рідини на тарілках колонних масообмінних апаратів / Малета В.М., Щуцький І.В., Дмитрук А.П., Черняхівський Й.Б. - Заявлено 10.12.02; Оpubл. 15.10.03, Бюл. № 10.
6. *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; Оpubл. 10.03.10, Бюл. № 5.