

ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ МАСООБМІННИХ КОЛОННИХ АПАРАТІВ В ЦИКЛІЧНОМУ РЕЖИМІ

Булій Ю.В.¹, канд. техн. наук, **Ободович О.М.**², д-р техн. наук., **Сидоренко В.В.**², канд. техн. наук

¹ - Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, 01601, Україна

² – Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

Визначені нижні і верхні критичні значення швидкості пари в отворах сітчастих і лускоподібних тарілок без переливних пристроїв, розраховані відносні величини бризковиносу на верхні тарілки. Експериментально встановлені гідродинамічні режими стабільної роботи провальних тарілок в режимі затримки рідини на їхніх полотнах та інтенсивного переливу рідини на нижче розташовані тарілки. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні масообмінних апаратів циклічної дії.

Ключові слова: тарілки, швидкість, рідина, циклічний режим, пара, масообмінний апарат.

«Бібл. 4».

Определены нижние и верхние критические значения скорости пара в отверстиях сетчатых и чешуйчатых тарелок без переливных устройств, рассчитаны относительные величины уноса жидкости на верхние тарелки. Экспериментально установлены гидродинамические режимы стабильной работы провальных тарелок в режиме задержки жидкости на их полотнах и интенсивного перелива жидкости на нижележащие тарелки. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании массообменных аппаратов циклического действия.

The lower and upper critical values of the steam velocity in the openings of the mesh and scales without the overflow devices are determined, the relative values of the velocity of the velocity on the upper plates are calculated. Experimentally established hydrodynamic modes of stable operation of the failure plates in the delayed mode of the native on their canvases and the intense overflow of liquid on the lower located plates. The results of the studies can be used in the design of mass-exchange devices of cyclic action.

Ефективність роботи провальних тарілок в циклічному режимі залежить від прийнятих гідродинамічних режимів, що визначають межі стабільної роботи масообмінних колонних апаратів. Загальні методи розрахунку меж гідродинамічних режимів роботи провальних тарілок в циклічному режимі відсутні. Тому при проектуванні таких тарілчастих колонних апаратів розрахунковим шляхом необхідною умовою є визначення швидкості пари, що відповідає нижній і верхній межі роботи тарілки, і робочої швидкості пари у вільному перерізі колони та в щілинах контактних пристроїв.

В апаратах з провальними тарілками, дія яких відбувається в стаціонарному режимі, пара і рідина безперервно рухаються назустріч через одні й ті ж отвори або щілини. Їх контакт відбувається під час провалювання рідини через отвори або щілини, тому тарілки такого типу отримали назву «провальні». До них відносяться сітчасті, ґратчасті, трубчасті та хвилясті тарілки. В типових масообмінних апаратах на кожній ділянці провальної тарілки встановлюється динамічна рівновага

між кількістю рідини, що знаходиться на полотні, та швидкістю парового і рідинного потоків. Живий переріз провальних тарілок становить 10-30 %. Відсутність зливних пристроїв спрощує їх конструкцію і дозволяє збільшити площу контакту пари і рідини на 15-20 %. Перевагою провальних тарілок є простота конструкції, низька вартість виготовлення і монтажу, порівняно невеликий гідравлічний опір. Їх використання дозволяє збільшити продуктивність брагоректифікаційних установок в 1,5-2 рази. До недоліків їх роботи відносять недостатній проміжок часу контакту пари і рідини, невеликий діапазон зміни швидкостей пари для забезпечення динамічної рівноваги, а також перемішування рідини на суміжних тарілках.

Відомо, що ефективність ступінчастого контакту визначають за ступенем досягнення фазової рівноваги між рідиною та парою. Практично така рівновага на провальних тарілках не досягається. Як наслідок цього, їх коефіцієнти корисної дії (ККД) не перевищують 0,4...0,6. Для підвищення ККД провальних тарілок, ефективності масообміну між рідиною і парою, зменшення витрати пари на процеси перегонки спиртової бражки і очистки етилового спирту від супутніх летких органічних домішок доцільно здійснювати затримку рідини на їх полотні до стану контактуючих фаз, близького до рівноважного. Відомі способи затримки рідини на полотні провальних тарілок шляхом організації течії окремих паро-рідинних струменів із взаємним зіткненням або додаткової установки перегородок і відбивачів. Пристрої для гальмування руху рідини виконуються у вигляді отворів, насадок тощо. Площа вільного перерізу отворів із зустрічним потоком пари становить 2-3 % від загальної площі тарілки. Для подовження часу контакту пари і рідини та інтенсифікації масообміну на окремих ділянках тарілки встановлюють вертикальні перегородки. Такі контактні пристрої були вперше досліджені А.Н. Прохоровим [1].

Використання тарілок з частковою компенсацією прямого потоку не вирішує проблему. Перспективним напрямком для її вирішення є використання циклічного режиму роботи тарілок, заснованого на почерговій зміні періодів пропускання пари і переливу рідини. 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 досліджень, відомі способи і моделі не знайшли практичного використання. Дослідження фазової рівноваги бінарних і багатокомпонентних систем, проведені в КТІХП під керівництвом проф. Шияна П.Л., показали, що в ідеальних умовах контакту пари і рідини, при яких виключається ефект дефлегмації, фазова рівновага досягається протягом 30-40 хв. [3]. Виходячи з вищевказаного, авторами була поставлена задача визначити гідродинамічні режими роботи масообмінних колонних апаратів, оснащених провальними тарілками, дія яких відбувається в режимі контрольованих циклів затримки рідини на тарілках і переливу рідини через всі отвори або щілини. Для досліджень були обрані сітчасті та лускоподібні тарілки з лусками арочного типу без переливних пристроїв.

Метою роботи було визначення гідродинамічних режимів роботи сітчастих і лускоподібних тарілок без переливних пристроїв в циклічному режимі затримки та переливу рідини, встановлення нижньої і верхньої критичної швидкості пари в отворах сітчастих і лускоподібних провальних

тарілок, лінійної швидкості пари у вільному перерізі масообмінного колонного апарата та відносної величини бризковиносу рідини на верхні тарілки.

Матеріали і методи. Об'єкт досліджень – провальні (безпереливні) сітчасті і лускоподібні тарілки. Методи досліджень – аналітичні, фізико-хімічні, розрахункові. Витрати рідини контролювали за допомогою витратоміру РМ, швидкість повітря у вільному перерізі колони - анемометром МС-13.

Виклад основних результатів досліджень. Сітчасті тарілки відрізняються простотою будови, легкістю монтажу, огляду та ремонту, невеликим гідравлічним опором. Вони стало працюють у досить широкому інтервалі швидкостей пари, причому в певному діапазоні навантажень за парою і рідиною ці тарілки мають високу ефективність. Разом з тим сітчасті тарілки чутливі до забруднень та осадів, які забивають їх отвори. При раптовому припиненні надходження пари або значного зниження її тиску із полотна сітчастих тарілок зливається вся рідина і для відновлення процесу потрібно знову запускати колону. При великих навантаженнях гідравлічний опір тарілки дуже зростає, причому спостерігається значне винесення рідини. Останнім часом все більш широкого розповсюдження набувають лускоподібні тарілки, особливо для роботи в умовах значних змін швидкостей пари. Їх переваги: порівняно висока пропускна можливість за парою, постійна і висока ефективність в широкому інтервалі навантажень, більш рівномірна робота при високих швидкостях пари в барботажному і струменевому режимах без бризковиносу рідини на верхні тарілки.

Гідродинаміка провальних тарілок вивчалась багатьма авторами. Дослідниками встановлені наступні гідродинамічні режими. *Режим змоченої тарілки* – спостерігається за низьких швидкостях пари. Потоки пари і рідини вільно проходять через отвори або щілини. Кількість рідини, яка затримується на тарілках, незначна. Контакт між фазами відбувається на поверхні плівок і краплин, що стікають. Опір тарілки малий. *Барботаажний режим* – виникає при збільшенні швидкості пари, при якій рідина зависає на тарілці, що пов'язано із збільшенням опору. На тарілці утворюються дві зони: зона світлої рідини. Через яку барботує пара, і зона піни. При збільшенні швидкості пари висота світлої рідини зменшується, а висота піни зростає. *Режим емульгування (аерації)* – характерний тим, що світла рідина майже повністю зникає. На тарілці спостерігається турбулізована, рухома піна. Опір і виніс піни при збільшенні швидкості залишаються постійними. *Хвильовий режим* – виникає при подальшому збільшенні швидкості пари, особливо при зменшенні інтенсивності зрошення. Струмені пари прориваються через шар піни. Рідина і піна на тарілці приходять у хвилеподібний рух. За верхньої критичної швидкості пари рідина перестає переливатися на нижні тарілки і викидається на верхні тарілки. Відбувається захлинання колони [4].

Дослідження проводили в системі рідина-повітря на лабораторній установці, яка включала ректифікаційну колону з провальними тарілками, напірну ємність, з якої рідина (вода) самопливом надходила на дослідну тарілку на зрошення, витратомір РМ, мірний збірник, з якого рідина відцентровим насосом перекачувалась в напірний збірник, ротаційну повітродувку з розподільною

решіткою для нагнітання повітря і анемометр МС-13 для визначення швидкості повітря у вільному перерізі колони.

На першому етапі визначали гідродинамічні режими стабільної роботи сітчастих тарілок в циклічному режимі. Технічна характеристика лабораторної установки: діаметр колони – 300 мм; кількість тарілок – 5; відстань між тарілками – 300 мм; діаметр барботаєжних отворів – 2,4 мм; товщина тарілки – 2 мм; живий переріз тарілки – 2,6 %; висота шару рідини – 35 мм. Витрати повітря змінювали в інтервалі 1-15 дм³/с, що відповідає зміні швидкості в отворах 1,5-10 м/с. Щільність зрошення становила 4-11 м³/м²·год.

Спочатку визначали швидкість повітря в отворах ($V_{омв}$) та лінійну його швидкість у вільному перерізі колони ($V_{лин}$), при якій припиняється провал рідини. Експериментальні дані порівнювали з розрахунковими, які знаходили за рівнянням:

$$V_{min} = \frac{1}{3} \cdot \frac{S_o}{S_{роб}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \rho_x \cdot h_o}{\xi \cdot \rho_y}}; \quad (1)$$

де V_{min} – мінімальна швидкість повітря, віднесена до вільного перерізу тарілки (дм³/год); S_o – вільний переріз тарілки або сумарна площа всіх отворів (м²); $S_{роб}$ – поперечний переріз тарілки (м²); g – прискорення вільного падіння (м/с²); ρ_x – щільність рідини (кг/м³); h_o – висота рідини на тарілці; ξ – коефіцієнт опору сухої тарілки; ρ_y – щільність повітря (кг/м³).

Експериментально доведено, що нижня критична швидкість повітря в барботаєжних отворах ($V_{омв}$) становила 5,4 м/с; лінійна швидкість повітря у вільному перерізі колони ($V_{лин}$) – 0,25 м/с. Швидкість повітря в отворах, при якій розпочинається бризковиніс рідини на верхні тарілки ($V_{бр}$) становить 8 м/с; при цьому ($V_{лин}$) дорівнює 0,7 м/с. Гранично допустиму швидкість повітря в отворах (верхню критичну швидкість) розраховували за рівнянням:

$$V_{бр} = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0,2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_x - \rho_y}{\rho_y}} \cdot \frac{S_{cen}}{S_o}; \quad (2)$$

де σ – поверхневий натяг (мН/м);

ρ_y – щільність повітря (кг/м³);

S_{cen} – поперечний переріз сепараційного простору (м²);

для сітчастих тарілок приймаємо $\kappa_1=0,207$; $\kappa_2=0,225$.

Максимальну робочу швидкість повітря ($V_{max}^{роб}$) визначали за залежністю:

$$V_{max}^{роб} = 0,8 \cdot V_{вин}; \quad (3)$$

де ($V_{вин}$) – швидкість повітря, при якій спостерігається бризковиніс краплин рідини на верхні тарілки (м/с).

Відносну величину бризковини (е) на верхні тарілки розраховували за рівнянням:

$$e \cdot 10^2 = 0,014 \cdot \left(\frac{V_{\text{лин}}}{H}\right)^{2,56}; \quad (4)$$

де e – відносна величина бризковиносу (не перевищувала 0,01 кг рідини на 1 кг повітря); $V_{\text{лин}}$ – швидкість повітря у вільному перерізі колони (м/с); H – висота сепараційного простору (м).

Рівняння (4) перевірено в межах зміни комплексу $(V_{\text{лин}}/H) = 3,5-32$ при $H \leq 300$ мм.

На другому етапі визначали гідродинамічні режими стабільної роботи лускоподібних тарілок в циклічному режимі. Технічна характеристика лабораторної установки: діаметр колони – 300 мм; кількість тарілок – 5; відстань між тарілками – 300 мм; тип лусок – арочні; площа перерізу отвору лусок – 19,42 мм²; розташування лусок – коаксіальне; товщина тарілки – 2 мм; живий переріз колони – 2,6 %; висота шару рідини – 35 мм. Щільність зрошення становила 5-15 м³/м²·год. Коаксіальне розташування лусок дозволило виключити односпрямованість потоків пари і рідини і підвищити ефективність масообміну.

В ході досліджень були встановлені гідродинамічні режими тарілок і відповідні для них значення швидкості повітря ($V_{\text{лин}}$) у вільному перерізі колони: в барботажному режимі ($V_{\text{лин}}$) становила 0,5-0,9 м/с, перехідному 0,9-1,3 м/с і струменевому 1,3-2,0 м/с. Експериментально доведено, що нижня критична швидкість повітря в отворах лусок ($V_{\text{омв}}$), нижче якої відбувається провал рідини, становить 6,5-7,0 м/с. Значення ($V_{\text{омв}}$) розраховували за рівнянням:

$$V_{\text{омв}} = 0,185 \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_z}{\rho_z}} \cdot F \cdot (1 - \tau); \quad (5)$$

де ρ_p і ρ_z – щільність рідини і повітря (кг/м³);

F – доля живого (вільного) перерізу тарілки (м²/м²);

τ – доля живого перерізу тарілки, зайнятої рідиною, що проливається (м²/м²).

Практично встановлено, що верхня критична швидкість повітря в отворах лусок, вище якої спостерігається бризковиніс рідни на верхні тарілки, становить 16 м/с. При цьому швидкість повітря у вільному переізі колони ($V_{\text{лин}}$) дорівнює 1,3-1,5 м/с. Значення ($V_{\text{вин}}$) розраховували за рівнянням:

$$V_{\text{вин}} = 0,416 \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_z}{\rho_z}} \cdot F \cdot (1 - \tau); \quad (6)$$

Відносну величину бризковиносу рідини (e) на верхні тарілки розраховували за рівнянням:

$$e \cdot 10^3 = 0,933 \cdot 10^{-6} \cdot V_{\text{омв}}^{5,67} \cdot L^{0,4}; \quad (7)$$

де $V_{\text{омв}}$ – швидкість повітря в отворах лусок (м/с);

L – навантаження колони по рідині (м³/м²·год).

Встановлено, що відносна величина бризковиносу в режимі стійкої роботи лускоподібних тарілок в барботажному режимі не перевищує 0,1 кг/кг повітря, в струменевому режимі не перевищує 0,2 кг/кг повітря.

Експериментально доведено, що інтенсивний перелив рідини через барботажні отвори провальних тарілок відбувається при швидкостях повітря, менших від нижньої критичної. Для сітчастих і лускоподібних тарілок ця швидкість (V_{ome}) не повинна перевищувати 1,5-1 м/с. Незначне проливання рідини через отвори тарілок відбувається в діапазоні значень швидкості повітря в отворах (V_{ome}): для сітчастих тарілок 1,5-5,3 м/с; для лускоподібних 1,5-6,4 м/с.

Висновки. Визначені гідродинамічні режими роботи провальних тарілок в циклічному режимі. Отримано експериментальні гранично допустимі значення швидкості пари для стабільної роботи сітчастих і лускоподібних з коаксіальним розташуванням лусок, які узгоджуються із розрахунковими. Визначені критичні значення швидкості пари у вільному перерізі масообмінного колонного апарата та в барботажних отворах, відносна величина бризковиносу рідини на верхні тарілки. Встановлено діапазон значень швидкості пари, при яких відбувається інтенсивний провал рідини через отвори або щілини тарілок. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні масообмінних апаратів циклічної дії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кривошеев В.П., Ануфриев А.В. Основы и эффективность циклических режимов процесса ректификации. Фундаментальные исследования. 2015. № 11-2. С. 267-271. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39322> (дата звернення 12.08.2019).
2. Kiss A. Cyclic distillation – Design, control and applications // Separation and Purification Technology. – 2014. – Vol. 125. – P. 326–336.
3. П.Л. Шиян. Фазовое равновесие в системе этанол-вода при давлениях ниже атмосферного (сообщение I). Устройство для определения фазового равновесия бинарных и многокомпонентных жидких систем [Текст] / Шиян П.Л., Ціганков П.С., Булий Ю.В. // Журнал «Известия вузов. Пищевая технология. Издательство: Кубанский государственный технологический университет (г. Краснодар), №1-3, 1991.- с. 181-182.
4. В.Н. Стабников. Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных и абсорбционных аппаратов / под ред. Стабникова В.Н. «Техніка», 1970. 208 с.