

УДК 66.0: 66.071.4

В.Л. Юшко, В.В. Ведь, В.А. Карпенко

## РОЗВИТОК КОНСТРУКЦІЙ ТАРИЛОК З ДВОМА ЗОНАМИ КОНТАКТУ ФАЗ І ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ. ПОВІДОМЛЕННЯ 2

ДВНЗ „Український державний хіміко-технологічний університет”, м. Дніпропетровськ

Розглядаються розроблені конструкції тарілок з двома зонами контакту фаз, обладнані переливними пристроями із сітчастими сепараторами. Показані переваги та перспективи використання таких тарілок у колонних апаратах низькотемпературної абсорбції й ректифікації.

У повідомленні [1] нами були розглянуті напрями розвитку конструкцій тарілок з двома зонами контакту фаз, обладнаних переливними пристроями з глухими переливними поріжками.

Приводом же до дослідження та конструювання тарілок з двома зонами контакту фаз, обладнаних переливними пристроями із сітчастими сепараторами, стали наші роботи в області низькотемпературного очищення газів методом фізичної абсорбції [2]. Тут, окрім всіх переваг відомих тарілок з двома зонами контакту фаз, обладнаних переливними пристроями з глухими переливними поріжками, важливим питанням є забезпечення максимально можливої компактності тарілок і тарілчастих апаратів. А це останнє забезпечує більш низьке теплоприпливання до холодного абсорбенту, дозволяє вести процес за невисоких енергетичних витрат, зменшити металомісткість тарілчастих апаратів, а відтак, і вартість їх виготовлення. Не треба забувати, що для виготовлення апаратів, які працюють за умов низьких температур, використовують високовартісні високолеговані сталі.

Використання сітчастих сепараторів у переливних пристроях тарілок з двома зонами контакту фаз забезпечує: необхідний запас рідини на тарілці завдяки деякому гідравлічному опору сітки та сепарацію рідкої фази від газової на вході в переливний пристрій.

Звернемо увагу на те, що на відмінну від переливних пристроїв з глухими переливними поріжками (патрубками), де переливання газорідного шару відбувається через верх переливних поріжків завдяки бодай невеликому градієнту газорідного шару на тарілці, при роботі переливних пристроїв із сітчастими сепараторами у формі відкритих циліндрів перелив рідини відбувається через всю змочену поверхню сітки сітчастого сепаратора. При цьому основне зливне на-

вантаження припадає на нижню притарілкову частину сітчастого сепаратора. Зауважимо, що при введенні рідини зверху на тарілку у вигляді «роздутих» плівкових зондів і нижнім (притарілковим) відводі рідини, незважаючи на інтенсивне перемішування, з'являється деяка складова протитечійного режиму руху рідини і газу в барботажному шарі тарілки. А це, як відомо, забезпечує зростання інтенсивності масообміну між рідкою і газовою фазами, що нами було експериментально підтверджено.

Запропонована нами тарілка з двома зонами контакту фаз [2] надана на (рис. 1)

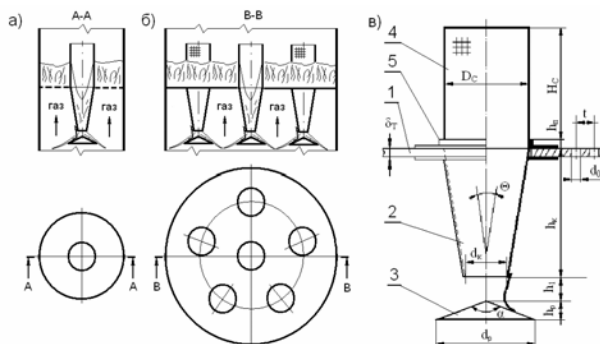


Рис. 1. Досліджувана тарілка і переливний пристрій із сітчастим сепаратором: а) тарілка діаметром 0,215 м з одним переливним пристроєм; б) тарілка діаметром 0,525 м із шістьма переливними пристроями; в) переливний пристрій із сітчастим сепаратором: 1 – сітчасте полотно тарілки; 2 – конусний зливний патрубок; 3 – конусний розподільник рідини; 4 – сітчастий сепаратор; 5 – поріжок

Ураховуючи можливість масштабного переходу для тарілок з двома зонами контакту фаз [3], для дослідження нами була вибрана сітчаста таріл-

ка діаметром 0,215 м з одним переливним пристроєм із сітчастим сепаратором циліндричної форми, розташованим у центрі тарілки (рис. 1,а). Така тарілка дозволила виконати необхідні дослідження її гідродинаміки та масопередачі.

Важливою задачею було визначитись з конструкцією та розмірами основних елементів переливного пристрою із сітчастим сепаратором, використаного для дослідження.

Дамо деякі пояснення. В основу конструкції переливного пристрою покладено вертикально розташований зливний патрубок 2 (рис. 1,в) у формі зрізаного конуса з кутом при вершині  $13^{\circ}24'$  з більшою основою, розташованою на рівні барботажного полотна тарілки. Така форма конусного зливного патрубку забезпечує йому максимальну перепускну здатність за рідиною. Висоту  $h_k$  зливного патрубку 2 вибрано з урахуванням загального гідравлічного опору  $\Delta P_{\text{зар}}$  тарілки. З деяким запасом  $h_k$  вибрано рівним 0,095 м діаметр  $d_k$  (нижня основа) зливного конічного патрубку 2 був визначений з умов забезпечення перепускну здатності по рідині за необхідної щільності зрощення  $L$  тарілки вибраного розміру. У результаті діаметр  $d_k$  був вибраний рівним 0,030 м. За такого діаметра  $d_k$  діаметр верхньої основи зливного конічного патрубку 2 виявився рівним 0,050 м. Конусний зливний патрубок 2 такої форми і розмірів є достатньо технологічний при виготовленні і дає можливість його безпроблемного виготовлення з трубної заготовки методом штампування заготовки за один прохід пуансона. Розміри та форма конусного розподільника рідини 3 були вибрані, виходячи з умов суцільного розподілення рідини, що стікає з вище розташованої тарілки. За відстані між тарілками 0,3 м,  $h_k=0,095$  м і  $h_1=0,015$  м кут  $\alpha$  при вершині розподільного конуса 3 склав  $120^{\circ}$ , діаметр його основи  $d_p$  визначається з урахуванням діаметра монтажного отвору переливного пристрою в барботажному полотні і має бути в межах 0,048–0,050 м. Цей розподільник може бути легко виготовлений з листового матеріалу методом штампування. Діаметр  $D_c$  циліндричного сітчастого сепаратора 4 конструктивно взято рівним діаметру верхньої основи конусного зливного патрубку 2, що дає можливість зручного їх поєднання в єдиний модуль. Як показали наші наступні дослідження, прийняте значення  $D_c$ , рівне 0,050 м, задовольняє роботу переливного пристрою (тарілки) у необхідному діапазоні навантажень за рідинною та газовою фазами.

Що стосується питання відстані  $h_1$  між вершиною розподільного конуса 3 і нижнім зрізом конусного зливного патрубку 2, то при її визначенні нами були здійснені попередні дослідження впливу  $h_1$  на верхню межу стійкої роботи тарілки при постійних значеннях  $h_k$ ,  $d_k$ ,  $\omega_c$  та  $d_n$  і рівних відповідно 0,095 м, 0,03 м, 56,5% та 0,00076 м.

Результати досліджень показали, що в інтервалі досліджуваних навантажень по рідині і газу верхня межа стійкої роботи тарілки збільшується зі збільшенням відстані  $h_1$  і досягає максимального значення при  $h_1$ , рівному 0,015 м подальше збільшення значення  $h_1$  на верхню межу стійкої роботи тарілки помітного впливу не спричиняє. Таким чином, відстань  $h_1$ , що дорівнює 0,015 м можна вважати оптимальною в досліджуваному інтервалі навантажень за рідиною та газом.

Особливу увагу було приділено дослідженню сепаруючих властивостей сіток сітчастих сепараторів у залежності від еквівалентного діаметра  $d_n$  чарунок сітки та їх вільного перерізу  $\omega_c$ . У цілому вибрана конструкція та розміри переливного пристрою виявились зручними для здійснення досліджень і стали основою для розроблення й упродовження його промислового зразка без істотних змін основних конструкційних елементів.

При дослідженні використовувались сітки для виготовлення сітчастих сепараторів з різними значеннями вільних перерізів  $\omega_c$  та еквівалентних діаметрів чарунок  $d_n$  (таблиця).

#### Характеристика використаних при дослідженні сіток

Сітки	$\omega_c, \%$	$d_n \cdot 10^3, \text{ м}$
1	60,0	0,370
2	62,0	1,590
3	55,0	0,806
4	48,2	0,456
5	55,4	0,450
6	60,0	0,699
7	48,6	0,576

Тарілки, вибрані для дослідження, мали таку характеристику: діаметр і шаг отворів  $d_0=0,0038$  м і  $t=0,015$  м; товщина полотна  $\delta=0,006$  м; вільний переріз  $w_1=4,75\%$ . При цьому площа тарілки, зайнята переливними пристроями, складала 5,5%. Характеристика барботажного полотна тарілки в процесі досліджень не змінювалась. Придатність отриманих при цьому залежностей для розрахунку тарілок великих діаметрів за необхідності перевірялась експериментально на тарілці аналогічної характеристики діаметром 0,525 м із шістьма аналогічними за конструкцією рівномірно розподіленими переливними пристроями із сітчастими сепараторами. Конструкція такої тарілки зрозуміла з рис. 1,б.

Експериментальне дослідження роботи тарілки з двома зонами контакту фаз, обладнаної переливними пристроями із циліндричними сітчастими сепараторами, показало, що за наявності в переливних пристроях сітчастих сепараторів останні істотно впливають на роботу цих пристроїв і тарілки в цілому. Чим краща сепарація газорідинної емульсії на сітці сепаратора переливного пристрою, тим більш освітлена рідина буде по-

падати в переливні пристрої і тим вищою буде перепускна здатність за рідиною переливного пристрою та тарілки в цілому, а, таким чином, і вище верхня межа стійкої роботи тарілки.

Результати досліджень свідчать про те, що величина еквівалентного діаметра  $d_{\text{я}}$  чарунок сітчастих сепараторів переливних пристроїв істотно впливає на верхню межу роботи тарілки. Оптимальна область значень  $d_{\text{я}}$  сітки сепаратора в умовах роботи барботажної тарілки знаходиться в межах від 0,2 до 0,4 мм. Варто думати, що при  $d_{\text{я}}$  сіток сепаратора в межах до 0,4 мм має місце практично повне відокремлення газу від рідини.

Для практичних цілей для виготовлення сітчастих сепараторів переливних пристроїв можна рекомендувати сітки з  $d_{\text{я}}$ , рівним 1,5–2,0 мм, за яких ще забезпечується достатній сепараційний ефект.

Дані досліджень свідчать про те, що верхня межа стійкої роботи тарілки із сітчастими сепараторами мало залежить від живого перерізу  $\omega_c$  сіток сітчастих сепараторів, значення якого змінювалось в межах від 26 до 53%. Таке явище можна пояснити тим, що зменшення  $\omega_c$  автоматично спричиняє деяке зростання висоти газорідного шару  $H_{\text{п}}$  і запасу рідини  $h_{\text{ст}}$  на тарілці до моменту забезпечення необхідної площі зливу, починаючи з якої робота тарілки стабілізується.

Саморегулювання в широкому діапазоні витрат рідини через переливні пристрої – характерна особливість тарілок з переливними пристроями із сітчастими сепараторами. Ця особливість тарілки запропонованої конструкції гарантує їй необхідну роботу в умовах часткового блокування чарунок сітчастих сепараторів як за рахунок газових бульбук, так і за рахунок емульсійних і дисперсійних зависів. Верхня межа стійкої роботи такої тарілки на 40–50% вища, ніж в аналогічних тарілках без сітчастих сепараторів. Це дозволяє в запропонованій тарілці зменшити частку її площі, зайнятої під переливні пристрої до 5–7% і забезпечує максимальну щільність зрошення тарілки на рівні 60–75 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·г).

Аналіз результатів досліджень масовіддачі на тарілці з двома зонами контакту фаз, обладнаної переливними пристроями із сітчастими сепараторами у формі відкритих циліндрів показує, що на величину коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі барботажної зони тарілки  $\beta'_{\text{Гф}}$  впливають наведені швидкість газу  $W_{\text{к.пр}}$  і щільність зрошення  $L$ . Зі збільшенням цих параметрів у дослідженій області  $\beta'_{\text{Гф}}$  незмінно зростає. При цьому величина коефіцієнта масовіддачі всього контакту ступеня (тарілки)  $\beta'''_{\text{Гф}}$  за різних  $W_{\text{к.пр}}$  приблизно дорівнює сумі коефіцієнтів масовіддачі барботажної  $\beta'_{\text{Гф}}$  і плівкової  $\beta''_{\text{Гф}}$  зон. При цьому величина  $\beta''_{\text{Гф}}$  складає 25–27% від  $\beta'_{\text{Гф}}$ . Як свідчать експериментальні дослідження запропонована тарілка має високу ефективність масообміну у газовій фазі.

Так, ефективність барботажної зони тарілки  $\eta'$  досягає 82–85%, плівкової зони  $\eta''$  – 40–50%, а загальна ефективність  $\eta'''$  становить 90–95%. Показники  $\eta'$ ,  $\eta''$ ,  $\eta'''$  у дослідженні області параметрів мало залежать від швидкості газу в колоні  $W_{\text{к.пр}}$ , тобто ефективність тарілки за газовою фазою є стабільною в широкому діапазоні  $W_{\text{к.пр}}$ .

При обробленні експериментальних даних з метою отримання рівнянь для визначення  $\beta'_{\text{Гф}}$  були отримані рівняння для барботажної зони тарілки (1):

$$\beta'_{\text{Гф}} = 7,69 \cdot w_{\text{к.пр}}^{0,67} \cdot h_{\text{ст}}^{0,39} \quad (1)$$

і для барботажної та плівкової зон (2):

$$\beta''_{\text{Гф}} = 7,13 \cdot w_{\text{к.пр}}^{0,67} \cdot h_{\text{ст}}^{0,32} \quad (2)$$

Оцінювання масообміну в газовій фазі запропонованої тарілки показало, що за аналогічних умов значення  $\beta_{\text{Гф}}$  для цієї тарілки на 20–30% вищі, ніж для звичайних сітчастих.

Дослідження масовіддачі в рідинній фазі барботажної зони тарілки показало, що коефіцієнт масовіддачі  $\beta'_{\text{Лф}}$  для цієї зони в межах  $W_{\text{к.пр}}$  від 0,3 до 1,0 м/с мало залежить від величини  $W_{\text{к.пр}}$  і зростає зі зростанням щільності зрошення тарілки  $L$ . Це дало можливість при обробленні експериментальних даних використати функцію залежності  $\beta'_{\text{Лф}}$  від  $h_{\text{ст}}$  і газонаповнення  $\phi$ , що не суперечить літературним даним. У результаті одержано рівняння вигляду (3):

$$\beta'_{\text{Лф}} = 0,317 \cdot h_{\text{ст}}^{1,11} \cdot \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right)^{0,78} \cdot \psi, \quad (3)$$

тут  $\psi$  – поправковий коефіцієнт Герстера, що ураховує вплив на  $\beta'_{\text{Лф}}$  в'язкості рідини і дифузії газу в рідині (4):

$$\psi = \left( \frac{D_i}{D_{\text{CO}_2}} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{\mu_{\text{Л}}}{\mu_{\text{а}}} \right)^{-0,25} \quad (4)$$

Оцінювання кінетики масообміну в рідкій фазі барботажної зони запропонованої тарілки була виконана в порівнянні значень  $\beta'_{\text{Лф}}$  даної тарілки із сітчастою тарілкою з перехрестною течією рідини і закритим переливом. Показано, що за аналогічних умов значення  $\beta'_{\text{Лф}}$  для барботажної зони запропонованої тарілки не на багато поступаються  $\beta'_{\text{Лф}}$  для звичайних сітчастих тарілок з перехрестною течією рідини.

При узагальненні експериментальних даних з дослідження кінетики масообміну в рідкій фазі плівкової зони тарілки одержано рівняння (5):

$$\beta''_{L_f} = 0,525 \cdot 10^{-4} \cdot L^{1,06} \cdot W_{к.пр}^{0,39} \quad (5)$$

Як показує аналіз експериментальних даних, значення  $\beta''_{L_f}$  становлять 14–15% від значень  $\beta'_{L_f}$ .

У результаті видно, що запропонована тарілка в цілому має високу ефективність у широкому діапазоні навантажень за газом і рідиною і не поступається тарілкам із закритими переливними пристроями [2].

Незважаючи на всі переваги тарілки з двома зонами контакту фаз, обладнаної переливними пристроями із циліндричними сітчастими сепараторами (рис. 1), звернемо увагу на те, що такі сепаратори займають деяку частку барботажного полотна тарілки хоч і бодай невелику (5–7%), що викликає необхідність збільшення діаметрального розміру тарілки. Окрім того, циліндрична конфігурація сітчастих сепараторів спричиняє утворення в зливних патрубках рідинних лійок, через які засмоктується деяка частина газової фази, а це знижує перепускную здатність зливних патрубків за рідиною та обумовлює необхідність збільшення їх розмірів. У циліндричних сітчастих сепараторах ефективно працює тільки їх нижня частина. А це обумовлює нераціональні витрати вартісної сітки на виготовлення сепараторів.

У результаті збільшуються габаритні розміри тарілки, підвищується її металомісткість, зростає вартість її виготовлення і колонного тарілкового апарата в цілому.

Виходячи з вищенаведеного, автори пропонують замість циліндричних сітчастих сепараторів у переливних пристроях тарілок використати «затоплені» конічні сітчасті сепаратори, висота яких не перевищує висоту барботажного шару на полотні тарілки, з вершинами, направленими вгору від барботажного полотна. Для відводу газової фази, що може накопичуватись у вершинах конічних сепараторів, пропонується обладнання сепараторів відкритими міні-патрубками висотою, що перевищує висоту барботажного шару на полотні тарілки, як це показано на (рис. 2).

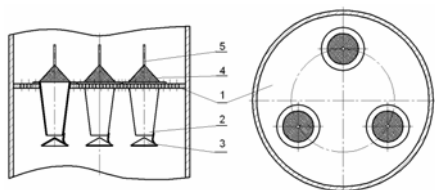


Рис. 2. Тарілка з двома зонами контакту фаз, обладнана переливними пристроями із затопленими конічними сітчастими сепараторами з відкритими міні-патрубками:

1 – барботажне полотно; 2 – зливні патрубки; 3 – розподільники рідин; 4 – конічні сітчасті сепаратори; 5 – міні-патрубки

Щільність зрошення і діапазон стійкої роботи такої тарілки фактично не відрізняється від

таких тарілок з двома зонами контакту фаз, обладнаних переливними пристроями із циліндричними сітчастими сепараторами. А, з іншого боку, практично все полотно тарілки (за винятком незначної сумарної площі, зайнятої міні-патрубками) використовується під барботажну зону.

У результаті вдається істотно зменшити всі недоліки відомої тарілки з двома зонами контакту фаз, обладнаної переливними пристроями із сітчастими циліндричними сепараторами.

Беручи до уваги ефект гідравлічного опору сіток сітчастих сепараторів і їх сепараційну здатність, з'явилась ідея використання в тарілках з двома зонами контакту фаз переливних пристроїв із «затопленими» сітчастими сепараторами, що повністю перекривають зливний патрубок переливних пристроїв без використання відкритих міні-патрубків. Конструкційна схема такої тарілки із затопленими сітчастими сепараторами надана на (рис. 3).

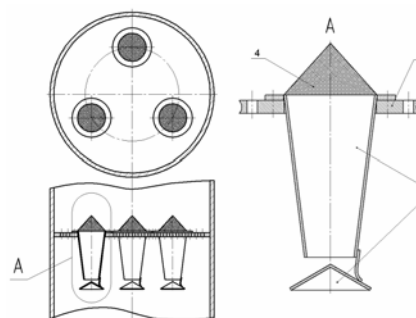


Рис. 3. Тарілка з двома зонами контакту фаз, обладнана переливними пристроями із затопленими конічними сітчастими сепараторами: 1 – барботажне полотно; 2 – зливні патрубки; 3 – розподільники рідини; 4 – сітчасті сепаратори

Як це видно з рис. 3, використання затоплених конічних сітчастих сепараторів забезпечує менш активний барботаж (менш газонаповнений) безпосередньо над затопленими конічними сітчастими сепараторами. У цьому випадку така гідродинаміка роботи тарілки сприяє процесу сепарації газорідинного шару на затоплених сітчастих сепараторах. Особливо відчутним стає протитиск газорідинного шару на зливні патрубки переливних пристроїв, що дозволяє за інших рівних умов зменшити висоту затворної рідини в зливних патрубках і, як наслідок – висоту зливних патрубків. А, ураховуючи використання затоплених конічних сітчастих сепараторів, загальна висота переливних пристроїв істотно зменшується. Лімітуючим фактором міжтарілкової відстані в апараті у такому випадку стає висота газорідинного шару на тарілці і висота зливних патрубків разом з конічними розподільниками рідини.

Важливим питанням для забезпечення ефективної роботи тарілки з переливними пристроями

із затопленими сітчастими сепараторами є забезпечення сепарації рідини і її «провалу» через сітки сепараторів. Ці умови визначаються живим перерізом і розміром чарунок сіток для виготовлення затоплених сепараторів. Дослідження, здійснені авторами, дозволяють рекомендувати виготовлення затоплених сітчастих сепараторів із сіток з еквівалентним діаметром чарунок 2–4 мм і живим перерізом 20–60%.

У цілому компактність тарілок з двома зонами контакту фаз, обладнаних переливними пристроями із затопленими сітчастими сепараторами при високій ефективності їх роботи зростає на 15–20%.

Автори сподіваються на те, що надана інформація про розвиток конструкцій тарілок з двома зонами контакту фаз, обладнаних переливними пристроями із сітчастими сепараторами, буде сприяти в подальшому науковим дослідженням у даній перспективній області.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Юшко В.Л., Ведь В.В., Карпенко В.А. Розвиток конструкцій тарілок з двома зонами контакту фаз та перспективи їх застосування. Повідомлення 1 // Вопр. химии и хим. технологии. – 2012. – № 2. – С.218–220.
2. Юшко В.Л. Апаратурно-технологічна розробка сумісного виробництва етилбензолу і кумолу на базі етиленпропіленових фракцій: Автореф. д-ра техн. наук: 05.05.13. – ДВНЗ УДХТУ. – Дніпропетровськ, 1999. – 50 с.
3. Чехов О.С. Исследование и промышленное внедрение тарелок для массообменных процессов, созданных по принципу продольно-поперечного секционирования потока в колонне: Автореф. д-ра. техн. наук: 05.17.08. – МИХМ. – М., 1969. – 60 с.

Надійшла до редакції 23.01.2013