

МАСООБМІН У ГАЗОВІЙ ФАЗІ В АПАРАТАХ ІЗ РЕГУЛЯРНИМИ НАСАДКАМИ, ЩО ПЕРФОРОВАНІ ЗУБЧАСТИМИ ОТВОРАМИ

У тепломасообмінних апаратах з регулярними пакетними насадками непотрібні розширення і звуження каналів для руху газової фази зведені до мінімуму, внаслідок чого втрати напору газового потоку майже повністю зумовлюються тертям між газом і рідиною і використовуються безпосередньо на участь у міжфазному перенесенні речовини. У цих умовах найповніше справджується принцип потрібної аналогії, з якого випливає, що масовіддача у газовій фазі, як і рух газу, може бути досить повно охарактеризована критерієм Рейнольдса, розрахованим за абсолютною (Re_r) або відносною ($Re_{гв}$) швидкістю газу, причому визначальним геометричним розміром є еквівалентний діаметр каналу $d_e = 2(h - \delta_{сп})$, де h — відстань між листами насадки, m , $\delta_{сп}$ — середня товщина плівки рідини, що стікає насадкою, m .

Перехід від ламінарного режиму руху до турбулентного у видовжених каналах плоскопаралельної насадки (ППН) відбувається при $Re_r \approx 2300$. Перелом на кривих

залежності коефіцієнта масовіддачі β_r від швидкості газу $W_{гв}$ при цьому значенні Re_r спостерігається не завжди, а якщо спостерігається, то у діапазоні $600 \leq Re_r \leq 3000$. Практично рух газу в апаратах з пакетними насадками вважають турбулентним і масообмін у газовій фазі описують критеріальним рівнянням $Nu_r = A Re_r^m Pr_r^n$, яке справедливе для стабілізованого потоку без кінцевих ефектів.

Кінцеві ефекти підвищують локальні значення коефіцієнтів масовіддачі біля кінців каналів, що збільшує середнє значення β_r . Отже, зменшуючи висоту пакетів, можна інтенсифікувати процес масовіддачі. Значення коефіцієнтів A , m , n для різних випадків наведені в роботі В.М. Рамма [5].

Вплив кінцевих ефектів, що виникають у трубах і каналах ППН, враховують введенням у розрахункові рівняння відношення довжини каналу до його діаметра (l/d). Цей вплив суттєвий при $(l/d) < 10$ і практично зникає при $(l/d) > 40$ [1]. В.М. Олевський і В.Р. Ручинський [7] узагальнили результати ректифікації дев'яти сумішей у труб-

ках різних діаметрів (10...25,7 мм) і висоти (0,5...2,4 м) при зміні чисел Рейнольдса для рідини від 35 до 200, чисел Прандтля для газу (пари) від 0,5 до 0,8 і відношення витрат рідкого і газового потоків від 0,2 до 5,0. Для трубок без ділянок стабілізації потоків вони вивели рівняння

$$h = 1,6d Re_{r,a}^{0,22} Pr_r^{0,67} (l/d)^{0,33} \quad (1)$$

Для трубок з ділянками гідродинамічної стабілізації замість коефіцієнта 1,6 підставляють коефіцієнт 2,5, що враховує інтенсифікацію масовіддачі у газовій фазі на ділянках неусталеного руху.

У разі використання плоскопаралельної насадки кінцеві ефекти створюються у місцях дотикання розміщених один на одному набраних у пакети листів насадки через місцеві опори, пов'язані з потовщенням плівки рідини. Зависання рідини на стиках пакетів звужує канали для проходження газу, додатково турбулізуючи газовий потік.

Щоб ефекти зависання рідини повторювались частіше, запропоновано в листах плоскопаралельної насадки виконувати розміщені у шаховому порядку видовжені в горизонтальному напрямку отвори. Верхні краї отворів мають зубці, що звисають, для утворення крапель. Внаслідок цього одержали насадку із зубчастими отворами (НЗО), ефективність якої виявилася вищою, ніж ППН, при масообміні як у рідкій, так і у газовій фазах.

Посиленої турбулізації газового потоку досягають, наприклад, гофруванням листів ППН у горизонтальному напрямку. А.О. Конончук [2], дослідивши такі насадки (типу зигзаг) з кутом при вершинах гофрів 90 і 120°, одержала підвищення ефективності масовіддачі у газовій фазі порівняно з ППН у кілька разів. Чим менший кут при вершинах гофрів, тим вища ефективність масовіддачі у газовій фазі, але і відповідно більший гідравлічний опір, причому опір зростає інтенсивніше, ніж ефективність масовіддачі. Висота гофрів відносно осі листів була взята такою, щоб виступи гофрів перекривали відстань між листами, що створювало занадто великий гідравлічний опір.

Метод додаткової турбулізації газового потоку за допомогою горизонтальних гофрів використано для подальшого підвищення ефективності НЗО. З цієї метою між горизонтальними рядами отворів розміщували ділянки подвійного горизонтального гофра: один гофр мав виступ в один бік від осі листа, другий — у протилежний. Для того щоб гідравлічний опір зростає не занадто, висоту виступів вершин гофрів відносно площини листа взяли 1,5 мм — при цьому турбулізуються переважно пристінні шари газового потоку, які чинять основний опір процесу перенесення. Утворилася насадка із зубчастими отворами і гофрами (НЗОГ) [6], лист якої показано на рис. 1. Насадка НЗО, з якою порівнювали НЗОГ, мала таке саме розміщення і такі самі розміри отворів, як і НЗОГ, але була без гофрів.

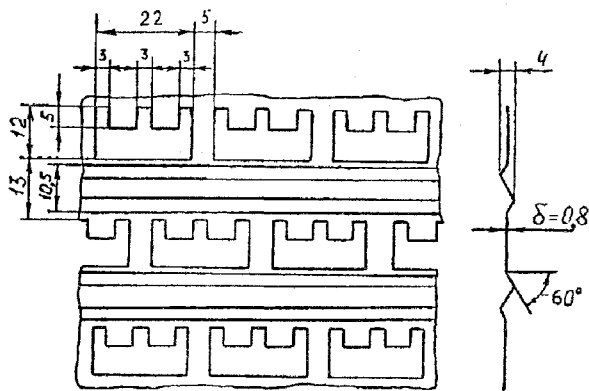


Рис. 1. Лист насадки із зубчастими отворами і гофрами (НЗОГ)

Дослідження насадок проведені в повністю аналогічних умовах на прикладі абсорбції водою пари етанолу із її

суміші з повітрям при температурі 20 °С у режимі проти-течії фаз. Рідина стікала по досліджуваній насадці, а парогазова суміш, піднімаючись угору, контактувала з рідиною. Опис експериментальної установки наведено в праці [4].

Одержані в результаті досліджень значення гідравлічних опорів насадок ППН, НЗО і НЗОГ залежно від відносної швидкості газу при різних щільностях зрошування наведені в роботі [3]. Як і слід було чекати, найбільший опір має НЗОГ, найменший — ППН. Опір насадок зростає з підвищенням щільності зрошування Г, яка змінювалась від 0,011 до 0,104 кг/(м·с), що відповідало значенням чисел Рейнольдса від 41 до 416 для плівки, що стікає плоскими неперфорованими листами.

Режими краплинно-плівкової течії рідини по листах НЗО описані в праці [4]. Наявність гофрів у НЗОГ змінює характер течії рідини. Головними особливостями двофазної течії рідини по НЗОГ порівняно з НЗО є настання режимів відчутної, інтенсивної та сильної взаємодії фаз при нижчих швидкостях газової фази, а також потовщення плівки на гребенях гофрів, її відхилення в бік руху повітря; із збільшенням швидкості повітря та витрати рідини це відхилення переходить у відривання крапель від вершин гофрів. Початок відривання окремих крапель від вершин гофрів спостерігався, наприклад, при швидкості газу $W_r = 3,7$ м/с для щільності зрошування $\Gamma = 0,045$ кг/(м·с); $W_r = 3,9$ для $\Gamma = 0,033$ і $W_r = 4,1$ м/с для $\Gamma = 0,01$ кг/(м·с). Відчутнішим було також гальмування швидкості течії рідини. Це свідчить про інтенсивнішу взаємодію потоків у разі застосування НЗОГ порівняно з НЗО.

Подальше зростання W_r і Γ призводить до поступового заповнення завислою рідиною і краплями, що відірвалися від вершин гофрів та зубців насадки, все більшої частини вільного перерізу колони, швидкого зростання гідравлічного опору і переходу до захлинання колони.

На рис. 2 а, б показано залежність загальної висоти одиниці перенесення маси в газовій фазі $h_{g,y}$ від чисел Рейнольдса $Re_{y,a}$, розрахованих за відносною швидкістю газу при різних щільностях зрошування НЗО і НЗОГ, а на рис. 3 а, б — залежність $h_{g,y}$ від щільності зрошування при різних витратах газу. Наведені графіки свідчать, що величини $h_{g,y}$ для обох насадок мають близькі значення і зростають (ефективність насадки за цим показником зменшується) із збільшенням $Re_{y,a}$ (швидкості газового потоку) і зменшенням щільності зрошування. Лінії

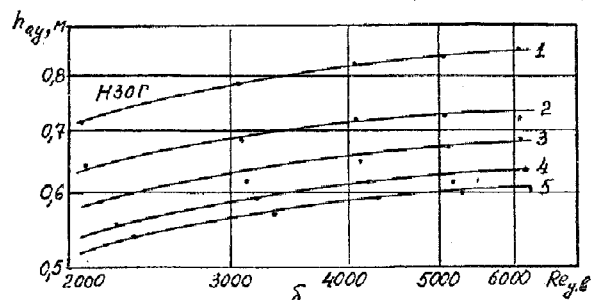
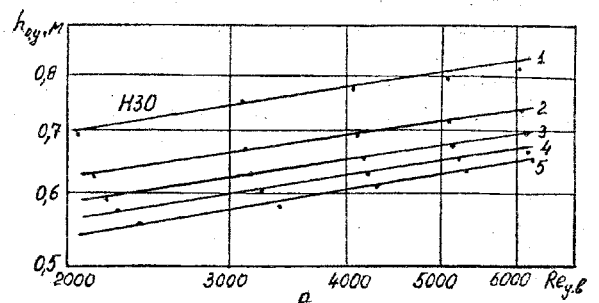


Рис. 2. Залежність $h_{g,y}$ від чисел $Re_{y,a}$ при різних щільностях зрошування для Γ , кг/(м·с), для а — НЗО; б — НЗОГ: 1 — 0,0113; 2 — 0,0196; 3 — 0,0341; 4 — 0,0596; 5 — 0,104

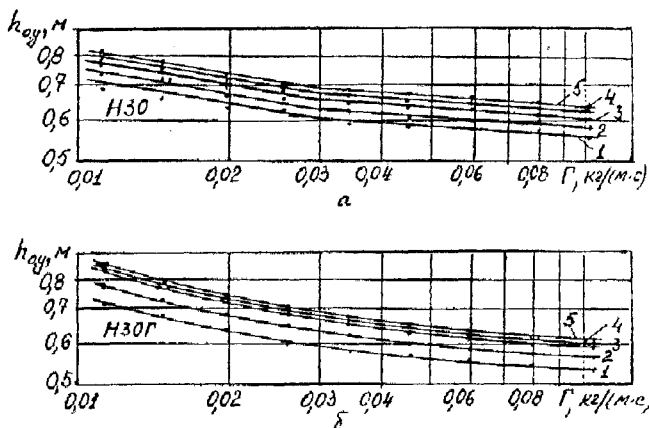


Рис. 3. Залежність h_{oy} від щільності зрошування Γ при різних витратах газу G , $m^3/\text{год}$, для а — НЗО; б — НЗОГ: 1 — 200; 2 — 300; 3 — 400; 4 — 500; 5 — 600

$h_{oy} = f(\Gamma)$ НЗО мають перелом в області значення щільності зрошування $\Gamma = 0,03 \text{ кг}/(\text{м}^3)$, яка відповідає переходу режиму течії рідини на цій насадці від ініційованої окремими краплями до ланцюгової [4].

Рис. 2 і 3 показують, що величини h_{oy} для обох насадок змінюються при зміні витрат як рідкої, так і газової фаз, що свідчить про наявність опору перенесенню маси як у газовій, так і у рідкій фазі при поглинанні водою пари етанолу із суміші з повітрям при температурі 20°C у дослідженій області низьких об'ємних концентрацій етанолу у рідині (від 0,3 до 3 %).

Результати графічного розкладання значень h_{oy} на складові з метою визначення h_y наведені в таблиці.

Значення висот одиниці перенесення маси в газовій фазі h_y , м, для досліджених насадок

Насадка	Витрати газу G , $m^3/\text{год}$				
	200	300	400	500	600
НЗО	0,54	0,57	0,60	0,62	0,63
НЗОГ	0,52	0,54	0,56	0,58	0,59
ППН (для порівняння)	0,77	0,86	0,94	1,01	1,07

Наведені в таблиці значення h_y слід розглядати як приблизні, оскільки при постійних витратах газу режими руху рідини дещо змінювались (хоч це і була краплинноплівкова течія) [4]. Одержане підвищення ефективності НЗОГ порівняно з НЗО становить лише 4...8 %, що перебуває в межах точності експерименту і не дає підстав стверджувати про відчутне зростання ефективності масовіддачі у газовій фазі внаслідок додаткового застосування невисоких гофрів. Водночас застосування гофрів підвищило гідравлічний опір приблизно в півтора рази.

Дослідні дані з масообміну в газовій фазі можна подати у вигляді емпірично-критеріального рівняння типу $h_y = A Re_{y,b}^m$, у якому коефіцієнт A , як і h_y , виражається у метрах. Тоді дістанемо такі вирази, справедливі у межах $2065 \leq Re_{y,b} \leq 6270$ і $0,011 \leq \Gamma \leq 0,104 \text{ кг}/(\text{м}^3)$:

$$\text{НЗО: } h_y = 0,17 Re_{y,b}^{0,15};$$

$$\text{НЗОГ: } h_y = 0,19 Re_{y,b}^{0,13};$$

$$\text{ППН: } h_y = 0,055 Re_{y,b}^{0,34}.$$

Загальноприйнятною є інтерпретація дослідних даних у вигляді критеріального рівняння $h_y = A_d Re_{y,b}^n Pr_y^p$. Взявши у цьому рівнянні за літературними даними $n = 0,67$, дістанемо:

$$\text{НЗО: } h_y = 0,77 d Re_{y,b}^{0,15} Pr_y^{0,67};$$

$$\text{НЗОГ: } h_y = 0,85 d Re_{y,b}^{0,13} Pr_y^{0,67};$$

$$\text{ППН: } h_y = 0,25 d Re_{y,b}^{0,31} Pr_y^{0,67}.$$

Враховуючи, що зафіксоване зростання ефективності масовіддачі у газовій фазі НЗОГ порівняно з НЗО не-

значне, а гідравлічний опір НЗОГ зростав відчутніше, зроблено порівняння питомих втрат енергії в насадках, тобто гідравлічних опорів насадок, віднесених до одиниці висоти перенесення маси в газовій фазі $\Delta P = \Delta P / \text{ЧОП}$ (ЧОП — число одиниць перенесення маси), показане на рис. 4.

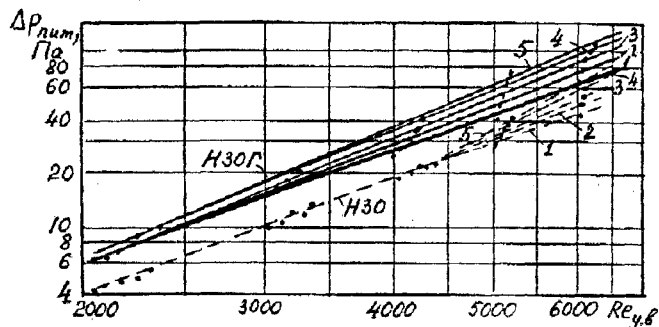


Рис. 4. Залежність питомих гідравлічних опорів ΔP , насадок НЗО і НЗОГ від чисел Re_y при щільностях зрошування Γ , $\text{кг}/(\text{м}^3)$: 1 — 0,0113; 2 — 0,0196; 3 — 0,0341; 4 — 0,0596; 5 — 0,104

Питомі гідравлічні опори ППН (на рис. 4 не показані) і НЗО мають близькі значення і практично накладаються. Тобто для НЗО зростання (порівняно з ППН) гідравлічного опору на 20...30 % сприяло майже такому ж підвищенню ефективності масовіддачі (на 20...30 %) у газовій фазі. У цій насадці найдоцільніше використовується енергія газового потоку, зростання якої практично повністю витрачається на підвищення ефективності масовіддачі.

Питомі гідравлічні опори НЗОГ (рис. 4) приблизно у півтора рази вищі, ніж НЗО. Це свідчить про нераціональне використання приросту енергії газового потоку при додатковому застосуванні невисоких гофрів у насадці із зубчастими отворами. Пояснити це явище можна так. Використані у НЗОГ гофри виступали на 1,5 мм в кожний бік від площини листа. При товщині листів 0,8 мм загальна висота виступів гофрів становить 3,8 мм. Діаметр крапель, які формувались і зависали на зубцях отворів, дорівнює 3,5...4,0 мм, тобто сумірний з висотою гофрів. І гофри, і краплі можна розглядати як шорсткості каналів, всередині яких рухається газ, причому еквівалентна шорсткість їх приблизно однакова. У НЗО, яка не має гофрів, турбулізацію пристінних шарів газового потоку створюють краплі, причому завихрювання не встигають затухати до повторення збурень наступними краплями. Тому додаткове збурення потоку гофрами не дає відчутного впливу на підвищення масовіддачі у газовій фазі, але додаткова енергія на це витрачається.

Зауважимо, що за даними роботи [3] застосування гофрів (у НЗОГ) додатково турбулізує рідку фазу і супроводжується деяким підвищенням ефективності НЗОГ порівняно з НЗО при масообміні у рідкій фазі.

Висновки. Перфоровані насадки із зубчастими отворами та із зубчастими отворами і гофрами мають підвищену ефективність масообміну порівняно з плоскопаралельною насадкою. У насадці із зубчастими отворами енергія газового потоку використовується доцільніше і майже повністю витрачається на підвищення масовіддачі у газовій фазі. Застосування насадки із зубчастими отворами і невисокими гофрами не дає відчутного зростання масовіддачі у газовій фазі; цю насадку доцільніше використовувати для інтенсифікації процесу перенесення маси при переважанні дифузійного опору в рідкій фазі та при його розподілі в обох фазах.

З погляду економії енергетичних витрат на прокачування газової фази через тепломасообмінні колони застосування перфорованих регулярних насадок із зубчастими отворами, а також із зубчастими отворами і невисокими гофрами доцільніше, ніж застосування нерегулярних насадок.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Кадер Т.Л., Олевский В.М.* О формировании диффузионного пограничного слоя в тонких пленках жидкости // ТОХТ. — 1971. — Т. 5. — С. 152–153.

2. *Конончук А.А.* Исследование регулярных пластинчатых насадок применительно к условиям спиртового производства: Автореф. дис... канд. техн. наук / КТИПП, 1968. — 20 с.

3. *Марценюк О.С.* Гідравлічні опори і масообмін у рідкій фазі в апаратах з регулярними насадками // Харч. пром-сть. — Вип. 45. — 2000. — С. 211–217.

4. *Марценюк О.С.* Режимы капельно-пленочной течи рідини по регулярній насадці із зубчастими отворами // Наук. пр. УДУХТ. — № 4. — 1998. — С. 36–38.

5. *Рамм В.М.* Абсорбция газов. — М.: Химия, 1976. — 665 с.

6. *А.с. 1761251 СССР, МКИ ВО11 19/32.* Регулярная насадка для тепло- массообменных аппаратов / Марценюк. А.С. — Оpubл. 15.09.92, Бюл. № 34. — С. 3.

7. *Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии)* / Под ред. В.М. Олевского. — М.: Химия, 1988. — 240 с.

Надійшла до редколегії 18.10.2000 р.