

Колонні апарати з пакетною регулярною насадкою мають низький гідравлічний опір, що особливо важливо в умовах високої вартості енергетичних ресурсів. Підвищити ефективність роботи цих апаратів можна застосуванням регулярних насадок нових типів, у тому числі перфорованих із зубчастими отворами [1]. Недостатня інформація про режими і закономірності течії рідини в цих насадках стримує практичне застосування їх.

В апаратах з перфорованими насадками із зубчастими отворами реалізується краплинно-плівкова течія рідини, режим якої в умовах одно- і двофазного потоків в протіччю газу (повітря) вивчали на установці, що подібна до описаної в праці [2].

У пакет насадку збирали з однакових сталевих листів 0,8 мм завтовшки, що розміщені на відстані 10,2 мм (крок 11 мм), в яких у шаховому порядку були виштамповані видовжені в горизонтальному напрямку отвори із зубчастими верхніми краями (рис. 1). Для створен-

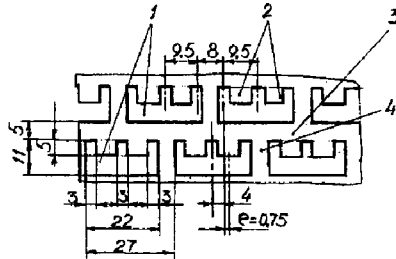


Рис. 1. Розміщення і форми отвори в листах перфорованої насадки:  
1 - зубчасті отвори; 2 - зубці; 3 - поверхня листа; 4 - проміжки між отворами

ня зубців у верхній частині отворів виконували по три вирізи (два на краях і один посередині), висота яких 5 і ширина 3 мм.

Пакет насадки монтували в колону перерізом 200×200 мм з прозорим корпусом із органічного скла.

Висота дослідної ділянки 0,8 м. Газ у колону подавали знизу вентилятором, зрошування (вода) надходило зверху через тканинний розподільник. Витрати рідини і газу заміряли лічильниками.

Щільності зрошування  $\Gamma$ , кг/(м·с), числа Рейнольдса в рідкій фазі  $Re_r$  і швидкості газового потоку  $w_g$  визначали так, як це прийнято для плоскопаралельної насадки, тобто без врахування наявності отворів на листах насадки.

Дослідження показали, що у разі однофазної течії рідини по насадці із зубчастими отворами в межах щільності зрошування

$$0,00172 \leq \Gamma \leq 0,0596 \text{ кг/(м·с)} \quad (7 \leq Re_r \leq 238)$$

реалізується краплинно-плівкова течія, при якій, проходячи крізь отвори кожного горизонтального ряду, більша частина рідини (до 76 %) стікає у вигляді крапель, а решта - у вигляді коротких плівок (рис. 2). Зро-

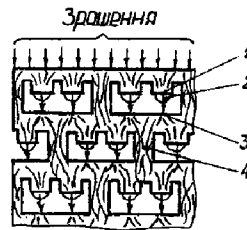


Рис. 2. Схеми краплинно-плівкової течії:

1 - ділянки формування крапель; 2 - краплі; 3 - ділянки розлягуюваних крапель; 4 - зони плівкової течії

шення щільності зрошування в зазначених межах не змінює співвідношення кількості рідини, що стікає у вигляді краплинної і плівкової потоків. Підвищення  $\Gamma$  сприяє пропорційному збільшенню кількості утворених крапель; це забезпечує стабільну ефективність масообміну в рідкій фазі.

При краплинно-плівковій течії відбувається постійний перерозподіл рідини від одного до сусіднього вертикального ряду зубців отворів, що сприяє вирівнюванню розподілу рідини по ширині листів насадки і стабільності краплинно-плівкової течії у разі нерівномірної подачі зрошування або у випадках порушення течії (дефекти насадки).

Краплинно-плівкова течія за характером відривання крапель від зубців має два режими:

I – краплинно-плівковий з ініційованою течією крапель, який реалізується за умови

$$0,00172 \leq \Gamma \leq 0,0196 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)} \quad (7 \leq Re_x \leq 78);$$

II – краплинно-плівковий з ініційованою течією крапель і ділянками ланцюгової течії, який реалізується за умови

$$0,00196 \leq \Gamma \leq 0,0596 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)} \quad (78 \leq Re_x \leq 238).$$

У краплинно-плівковому режимі з ініційованою течією крапель відривання від зубців кожної наступної краплі ініціюється дією сил інерції краплі, що стікає зверху. Це приводить до значного відхилення маси окремих крапель від середнього значення. Кожна крапля, що відривається від зубця верхнього ряду отворів, практично завжди спричинює утворення каскаду крапель, що по черговою збігають униз і рухаються змайкоподібною траєкторією по вертикальних рядах зубців. Змайкоподібна траєкторія зумовлена тим, що зубці у вертикальних рядах розміщено з ексцентриситетом  $e = 0,75$  мм по чергово в праву і ліву сторони. Кожна крапля утворюється протягом певного відрізка часу і стікає окремо.

На ділянках ланцюгової течії краплі відриваються від зубців нерозривними ланцюжками, тобто утворення кожної наступної краплі відбувається настільки швидко, що попередня крапля не встигає повністю відокремитись від краплі, яка стікає за нею.

Перехід від краплинної до ланцюгової течії відбувається поступово, починаючи із щільності зрошування  $\Gamma = 0,0198 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ . При  $\Gamma = 0,0596 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$  практично всі краплі стікають ланцюжками. В межах  $0,0196 \leq \Gamma \leq 0,0596 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$  на окремих вертикальних рядах зубців періодично виникають і зникають то краплинні, то ланцюгові смужки течії, змінюючись і в часі, і в просторі.

У межах  $0,0596 \leq \Gamma \leq 0,0786 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$  ( $238 \leq Re_x \leq 314$ ) відбувається поступовий перехід від краплинно-плівкової до струменевої течії. Це III режим. У цьому режимі на поверхні листів насадки на загальному фоні ланцюгової течії крапель утворюються окремі вертикальні стійкі струмінці завширшки в один-два зубці (9...18 мм), що стікають, не перериваючись, по всій висоті насадки. Стікаючи вниз, струмінці затягують плівкою ту частину отворів, яка лежить на їхньому шляху. В проміжках між струмінцями реалізується краплинно-плівкова течія з періодичною зміною на окремих ділянках смужок ініційованої і ланцюгової течії крапель.

По ширині листів насадки ( $b = 190$  мм) утворюються два-три струмінці. Збільшення щільності зрошування сприяє не зростанню кількості струмінців, а збільшенню їхньої ширини до трьох - чотирьох зубців (крок зубців 9,5 мм).

З подальшим збільшенням  $\Gamma$  настає струменева течія, що характеризується появою великих струменів, які стікають, звужуючись зверху вниз. Отже, IV режим – струменева течія настає при  $\Gamma > 0,0786 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$  ( $Re_x > 314$ ). Верхня частина струменів має ширину порядку 80...100 мм і являє собою досить рівномірну по ширині суцільну плівку, що затягує отвори на шляху своєї течії. Затягнуті плівкою зубці й отвори вже не сприяють рівномірному розподілу рідини, і течія втрачає стійкість. Плівка, що затягнула отвори, об'єднує потоки рідини, які стікають по передній і задній площинах

листа, в один суцільний потік. Цей потік, стікаючи вниз, швидко звужується і на відрізку шляху по висоті порядку 100...200 мм стягується в потужний струмінь з постійною шириною 10...25 мм.

На ділянці звуження струменя рідина з периферійної його частини перетікає до центра, внаслідок цього під правою і лівою розширеними частинами струменя виникають зони, дуже збіднені зрошуваною рідиною, на яких практично немає краплинно-плівкової течії. Оскільки шахове розміщення зубців і отворів сприяє перерозподілу рідини по ширині листів, то в міру стікання струменя вниз поступово відновлюється краплинно-плівкова течія біля його бокових ділянок.

При  $\Gamma = 0,104 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$  ( $Re_x = 416$ ) по ширині листів насадки можна бачити один або два широкі суцільні струмені, які у верхній частині займали всю ширину листа. Якщо при коливаннях щільності зрошування спостерігались випадки об'єднання двох струменів в один або роз'єднання одного широкого струменя на два. Об'єднання та роз'єднання струменів відбуваються лише у верхній частині листів насадки – в місцях формування струменів із суцільного потоку рідини, що стікає в режимі затягування отворів плівкою.

Утворення струменів різко погіршує рівномірність течії і розподіл рідини по ширині листів насадки, що, очевидно, має призводити до погіршення ефективності масообміну в рідкій фазі.

Газовий потік починає помітно впливати на краплинно-плівкову течію при швидкостях  $w_g \geq 2,3 \text{ м/с}$ . Розрахунки показують, що при цій швидкості газу маса крапель збільшується приблизно на 7 %, а швидкість газу при цьому становить близько 26 % швидкості, при якій настає захлинання. Для порівняння нагадаємо, що у разі чисто плівкової течії на листах плоскоступарельної насадки помітна взаємодія фаз спостерігається при швидкості газу, що становить 85...90 % швидкості захлинання.

За силою впливу газового потоку на течію рідини можна виділити такі зони інтенсивності взаємодії фаз:

слабка – при  $w_g < 2,3 \text{ м/с}$ ;

відчутна – при  $2,3 \leq w_g \leq 4,3 \text{ м/с}$ ;

інтенсивна – при  $4,3 \leq w_g \leq 6,0 \text{ м/с}$ ;

сильна – при  $w_g > 6,0 \text{ м/с}$ .

У зоні слабкої взаємодії фаз потік рідини поводиться себе, як однофазний.

Ознакою початку відчутної взаємодії фаз є збільшення звивистості траєкторій змійок ініційованих крапель, помітнішими стають перетяжки ланцюжків крапель, розсмоктуються дрібні струмінці, починається пульсація великих струменів.

При інтенсивній взаємодії фаз дещо змінюються межі існування режимів течії, відбувається часткова реверсія ланцюгової течії крапель до ініційованої течії, струменевої – до краплинно-ланцюгової, краплинна течія стає більш стійкою, розміри крапель збільшуються.

Сильна взаємодія фаз характеризується інтенсивним зависанням крапель на зубцях насадки і посиленою осциляцією їх. Краплі стають масивнішими, важко «пульсують», відриваються від зубців неохоче і падають з відхиленням від вертикальної траєкторії.

В умовах інтенсивної та сильної взаємодії фаз встановлено існування таких додаткових режимів течії рідини, які не реалізуються при однофазній течії:

V – рівномірна течія окремими краплями збільшеного розміру, яка реалізується в широкому діапазоні щільностей зрошування

$$0,005 \leq \Gamma \leq 0,07 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)} \quad \text{при} \quad 4,3 \leq w_g \leq 6,0 \text{ м/с};$$

VI – нерівномірна течія при високих щільностях зрошування і швидкостях повітря, а саме

$$\Gamma \geq 0,09 \text{ кг/(м·с) при } 5 \leq w_v \leq 6 \text{ м/с;}$$

VII – нестійка течія перед захливанням з інтенсивним зависанням і пульсацією крапель за умови  $w_v > 6 \text{ м/с}$ .

При рівномірній течії окремими краплями збільшеного розміру рідина інтенсивніше перетікає на сусідні зубці, внаслідок чого змійки та ланцюжки крапель, що збігають вниз, вироджуються в рівномірно розподілену течію окремими краплями. Краплі збільшеного розміру відриваються від зубців, розміщених по всій поверхні листів насадки, в хаотичному порядку через невеликий проміжок часу.

Встановлення рівномірної течії крапель, очевидно, є результатом адало вибраної висоти зубців ( $h_{зуб} \approx 5 \text{ мм}$ ), яка незначно перевищує висоту капілярного підняття рідини і сумірна з нею. При інтенсивній дії газового потоку висота капілярного підняття рідини осцилюючих крапель збільшеного розміру перевищує висоту зубців, частина рідини в умовах підвісання крапель перетікає на сусідні зубці і рівномірність течії зростає. Цей режим ще можна назвати течією з підвісання крапель.

Нерівномірна течія рідини при високих густинах зрошування, очевидно, є результатом високих швидкостей газу і пульсацій потоків, що зростають, а також успадкованої нерівномірності розподілу рідини при малих швидкостях газу в струменевій течії.

Нестійка течія перед захливанням характеризується настільки зрослим зависанням і пульсацією крапель, що, відриваючись від зубців, краплі падають не вертикально вниз, а під кутом, інколи перелітаючи на сусідні листи насадки.

Межі існування розглянутих режимів течії рідини у двофазному потоці показано на рис. 3. Слід зауважи-

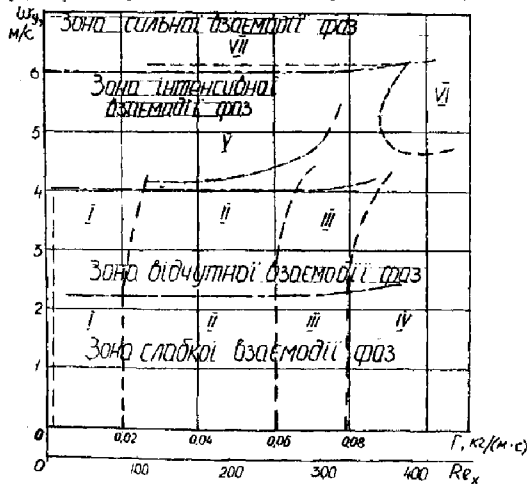


Рис. 3. Діаграма режимів краплинно-плівкової течії рідини в умовах двофазного потоку

ти, що ці межі окреслені нечітко і можуть змінюватись, якщо змінюються умови входу та рівномірності розподілу фаз.

Досліджену насадку складено із суцільних листів заввишки 1,2 м. У разі застосування пакетної насадки з пакетами 0,3...0,4 м заввишки швидкості газу, при яких встановлюються зазначені режими, будуть відповідно зменшеними на 12...8 %.

Робочим режимами з рівномірним розподілом рідини є I, II і V режими, що реалізуються в умовах слабкої, відчутної та інтенсивної взаємодії фаз. У межах цих режимів частка краплинної течії залишається практично незмінною незалежно від значення  $\Gamma$ , тобто із зростанням  $\Gamma$  пропорційно зростають кількість крапель і загальна площа їхньої поверхні, що забезпечує певну стабільність ефективності масообміну.

Зауважимо, що в разі чисто плівкової течії на неперфорованих насадках площа поверхні міжфазного контакту не змінюється і вважається такою, що дорівнює площі поверхні листів насадки. Результатом цього є зменшення поверхні контакту на одиницю об'єму рідини при зростанні  $\Gamma$ .

З точки зору класифікації режимів течії, дані Рейнольдсом, всі описані режими належать до розширеної перехідної зони між ламінарною і турбулентною течіями. Це підтверджується результатами осцилографічних записів реакції відгуку на введення в рідкий потік індикатора. Відношення максимальної швидкості потоку до середньої становило не 1,5, як це характерно для ламінарної течії, а змінювалося в межах від 1,45 до 1,20, наближаючись до значень, характерних для турбулентного потоку.

На прикладі десорбції повітрям вуглекислоти з водних розчинів показано, що в межах I, II і V режимів краплинно-плівкової течії при застосуванні насадки із зубчастими отворами ефективність масообміну в рідкій фазі при швидкості руху повітря 3,1...4,7 м/с зростає відповідно на 35...60% порівняно з плоскопаралельною насадкою.

**Висновки.** Доцільними для використання в масообмінних колонах є режими краплинно-плівкової течії, що реалізуються в межах щільності зрошування  $0,0017 \leq \Gamma \leq 0,060 \text{ кг/(м·с)}$  і відносних швидкостях руху повітря до 4,2 м/с: режим I з ініційованою течією крапель і режим II з ініційованою течією крапель і ділянками ланцюгової течії, а також режим V рівномірної течії окремими краплями збільшеного розміру, який реалізується при швидкості руху повітря від 4,2 до 6,0 м/с.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. А. с. 440147 СССР. Регулярная пластинчатая насадка / А.С. Марценюк. – Оpubл. 1974. Бюл. № 31.
2. Конончук А.А., Стабников В.Н. Гидравлические сопротивления массообменных аппаратов с регулярными пластинчатыми насадками // Изв. вузов. Пищ. технология. – 1968. – № 1.

Надійшла до редакції 18.03.97 р.