

Протитечієні насадкові апарати широко використовуються для проведення процесів тепломасообміну в газорідних системах. До цих процесів відносяться абсорбція, хемосорбція, перегонка, ректифікація, культивування мікроорганізмів, очищення і охолодження газів і рідин, а також процеси переробки великих об'ємів газових сумішей з метою виділення з них цінних компонентів та знешкодження перед викидом в атмосферу, що стає дедалі більш важливою проблемою з точки зору забезпечення екологічної безпеки.

Насадки – це фасонні тіла спеціально підібраної форми, призначені для створення умов тісного контактування фаз. Вони повинні мати розвинену поверхню та створювати умови для збільшення поверхні контактування фаз і її інтенсивного оновлення, займати невеликий об'єм і чинити малий гідравлічний опір. В насадкових апаратах застосовують нерегулярні (неупорядковані, засипані внавал) і регулярні (укладені в певному порядку з періодично повторюваних елементів) насадки.

Від будови і орієнтації в апараті насадок залежать їх гідродинамічні і масообмінні характеристики, тобто вартість енергетичних ресурсів, що витрачаються на прокачування газової фази крізь апарати і забезпечення умов тісного контактування газу з рідиною. Оскільки кількість енергетичних ресурсів обмежена і вартість їх безперервно зростає, то зменшення витрат на проведення тепломасообмінних технологічних процесів є важливим завданням не тільки для України, але й для світової спільноти.

Енергія газового потоку в насадках використовується на створення тісного контактування фаз (міжфазне перенесення), турбулізацію фаз (перенесення субстанції в межах окремих фаз), на необґрунтовані звуження і розширення газового потоку, на тертя з незмоченими ділянками поверхні насадки. Останні дві складові практично не сприяють підвищенню інтенсивності перенесення, вважаються некорисними і з метою економії енергоресурсів повинні бути якнайменшими.

Закономірно, що окремі тіла засипаних внавал нерегулярних насадок розміщуються таким чином, що перекривають канали для проходу рідини і газу, створюючи додатковий гідравлічний опір і застійні зони. Регулярні насадки конструюють і розміщують так, щоб енергія газового потоку використовувалась найповніше. Для зручності обслуговування і прискорення монтажу регулярні насадки встановлюють в апаратах не окремими елементами, а скріплені в пакети (наприклад, зібраними з профільованих листів). Тому регулярні насадки за зручністю використання і обслуговування доцільніші за нерегулярні. Регулярні насадки мають на порядок нижчий гідравлічний опір, забезпечують у 3...4 рази більшу пропускну спроможність по газу і в 1,5...2,0 рази по рідині, вдвічі більшу кількість перенесеної речовини на одиницю об'єму апарата.

Основним недоліком, який стримує широке застосування регулярних насадок і заміну ними нерегулярних насадок, є те, що висота еквівалентна одиниці перенесення маси в апаратах з регулярними насадками приблизно в 1,5...2,0 рази перевищує цей показник для апаратів з нерегулярними насадками, тобто висота апаратів з регулярними насадками приблизно у півтора-два рази більша. Цей недолік намагаються усунути розробленням більш досконалих конструкцій регулярних насадок.

З метою забезпечення умов тісної взаємодії газу і рідини при якнайменших витратах енергії на контактування фаз та надійної експлуатації насадки повинні мати розвинену поверхню і малий об'єм одиниці поверхні, зручну обтікальну форму без надмірних виступів і порожнин, які можуть утворювати застійні зони, забезпечувати інтенсивне оновлення поверхні контакту фаз та турбулізацію потоків, мати малу утримуючу здатність щодо рідини, мало забруднюватися, легко монтуватися і замінюватися, мати достатню механічну міцність, необхідну термічну і корозійну стійкість.

Аналіз науково-технічної та патентної літератури [10-12, 14-25] дозволив виділити наступні конструктивні методи підвищення ефективності регулярних листових пакетних насадок: перфорування листів (сприяє оновленню поверхні контактування, покращує розподіл і перерозподіл рідини та газу); гофрування листів (збільшує шлях і тривалість контактування рідини і газу, сприяє оновленню поверхні контакту, кращому розподілу і турбулізації потоків); рифлення (турбулізує плівку рідини, сприяє рівномірному розподілу фаз); використання сітчастих і просічно-витяжних листів

(активізує руйнування примежового шару рідини біля твердої стінки і забезпечує турбулізацію всього шару рідини); застосування перегородок (збільшує поверхню контакту фаз, дозволяє секціонувати потоки, підвищує міцність елементів насадки); встановлення турбулізуючих вставок, завихрювачів, зовнішніх лопаток (сприяє турбулізації стікаючої рідини, завихрюванню газового потоку, створює додаткові зони контактування); оснащення відбортками, ободами, козирками (забезпечує жорсткість листів насадки, чим збільшує її вільний об'єм і розширює діапазон роботи, а також поліпшує розподіл і турбулізацію потоків).

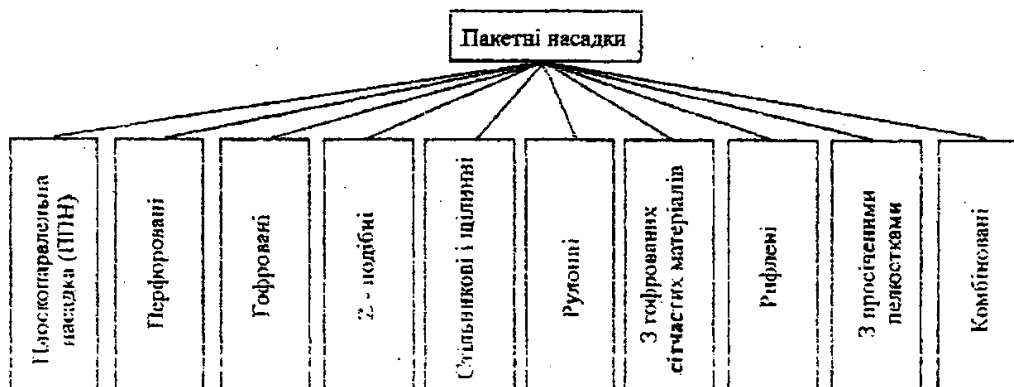


Рис.1. Класифікація пакетних насадок за конструктивними ознаками.

Нами запропоновано додаткові конструктивні методи збільшення ефективності насадок [1,6-8]: виконання в листах насадки висічених отворів із зубчастими верхніми краями; виконання нахилених вниз упорядковано розміщених прорізнених з трьох сторін пелюсток. Обидва методи спрямовані на організацію періодичного розривання плівки рідини з утворенням крапель і наступного формування (після падіння крапель) нових ділянок плівки рідини, що забезпечує додаткову турбулізацію рідкої фази та газового потоку.

Пакетні насадки

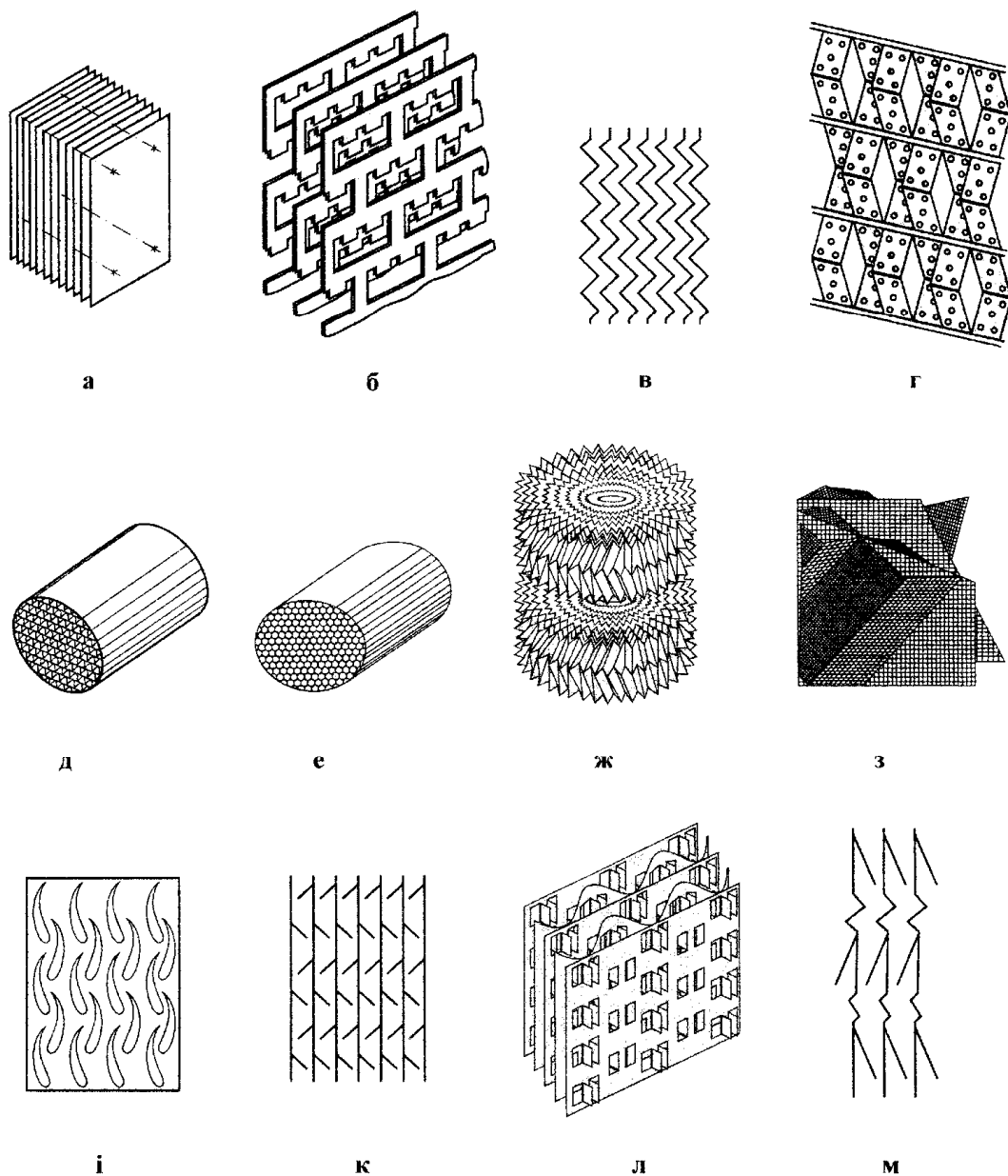


Рис.2. Основні типи регулярних пакетних насадок:

а - ППН; б - перфорована; в - гофрована; г - z-подібна; д - щілинна;
 е - стільникова; ж - рулонна; з - з гофрованого сітчастого матеріалу;
 і - рифлена; к - з просіченими пелюстками; л, м - комбіновані:
 щілинна з пелюстками і гофрована з пелюстками

За конструктивними ознаками, які суттєво впливають на характер руху та ефективність контактування фаз, запропонована класифікація основних видів пакетних насадок – рис. 1. Основні типи насадок за цією класифікацією подані на рис. 2. Чітка класифікація регулярних насадок може стати основою їх стандартизації, сприяти уточненню методів розрахунку і пошуку нових шляхів їх удосконалення. Це дозволить організувати на спеціалізованих підприємствах крупносерійне виробництво

стандартних блоків пакетних насадок і розширити їх використання, що сприятиме підвищенню техніко-економічних показників роботи тепломасообмінних колон.

Особливості основних видів пакетних насадок заведеною класифікацією описані в праці [18]. Детальніше зупинимось на недостатньо описаних в літературі і мало досліджених пакетних насадках з просіченими пелюстками, різновидам яких, змінюючи форму і кут нахилу пелюсток, можна легко надавати широкий спектр технологічних характеристик.

Насадки з просіченими пелюстками є різновидністю перфорованих насадок. У перфорованих насадках отвори висікають (виштамповують), видаляючи у відходи частину листів, внаслідок чого фіксована поверхня насадки зменшується на площу, вилучену отворами. Пелюстки отримують просіканням отворів з трьох сторін і відхиленням просіченої частини листа під певним кутом. Тому в насадках з просіченими пелюстками фіксована площа поверхні не зменшується. Для ефективної роботи цих насадок слід узгодити функціональне призначення пелюсток з їх формою і розташуванням.

Відома насадка [24] з розміщеними рядами вузькими паралельними одна одній пелюстками, які за призначенням названі "турбулізаторами". Відрізки металу між пелюстками вигнуті почергово в протилежні сторони під кутом 45° . Профільний переріз двох сусідніх відігнутих елементів являє собою квадрат, діагональ якого співпадає з площиною листа.

В іншій конструкції [2] використовуються пелюстки шестикутної форми, відігнуті в горизонтальне положення по верхній лінії шестикутного отвору і розміщені в шаховому порядку. В результаті над кожним отвором утворюється козирок, якому надається дещо випукла вгору форма. Стікаюча по поверхні листів рідина набігає на козирки і відхиляється ними, що сприяє оновленню поверхні контакту фаз і зростанню ефективності насадки.

У насадці [3] пелюстки в суміжних листах відхилені під кутом вгору або вниз назустріч один одному, утворюючи дифузори і конфузори, через які проходить частина газового потоку. Інша частина газу обтікає пелюстки, що сприяє турбулізації газового потоку і диспергуванню рідкої фази. Пелюстки (козирки) можуть дотикатися до сусідніх листів, забезпечуючи безперервну зміну напрямку руху контактуючих фаз. Відомі варіанти насадок з пелюстками, виготовлені з просічно-витяжного листа [22, 23].

Заслужують уваги різновиди насадок з просіченими пелюстками, призначеними для організації каскадного стікання рідини - рис.2, к, у тому числі насадки з нахиленими під кутом вниз пелюстками, нижні краї яких мають зубчасту форму [4, 8, 9] і забезпечують краплинно-плівкову течію рідини. Пелюстки можуть бути відхилені по горизонтальній лінії під гострим, прямим або тупим кутом, розміщені горизонтальними і вертикальними рядами, або в шаховому порядку, внаслідок чого можна конструювати насадки для самих різноманітних технологічних потреб.

На рис.3,а показано лист насадки [6] з вертикальними пелюстками 1, які мають таку ж форму, як і утворені ними отвори 2, і вертикальні бічні краї 3 і 4. Верхні краї отворів мають зубці 5, нижні - мають вирізи 6, які утворюють зубці на пелюстках. Відстань між отворами по вертикалі дорівнює висоті отворів, внаслідок чого контури вертикальних ділянок між отворами повторюють контури пелюсток і створюються однакові умови течії рідини вертикальними ділянками листів і пелюсток.

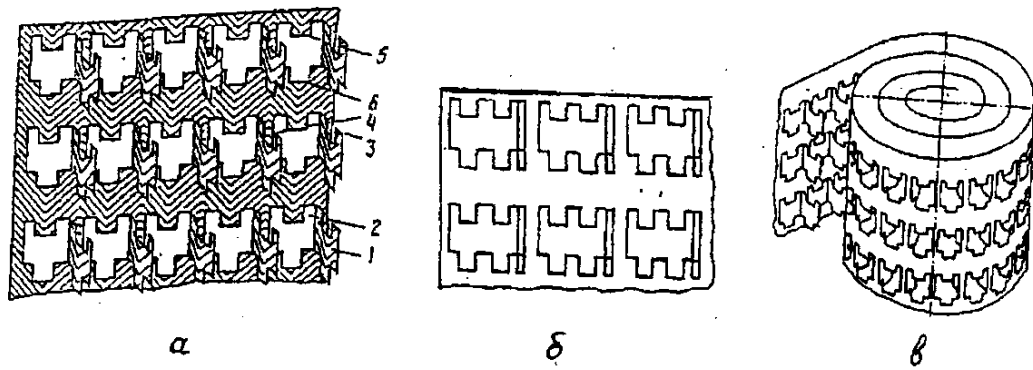


Рис.3. Насадки з вертикальними пелюстками:
а, б – листові з одно- і двозубчастими пелюстками; в – рулонна.

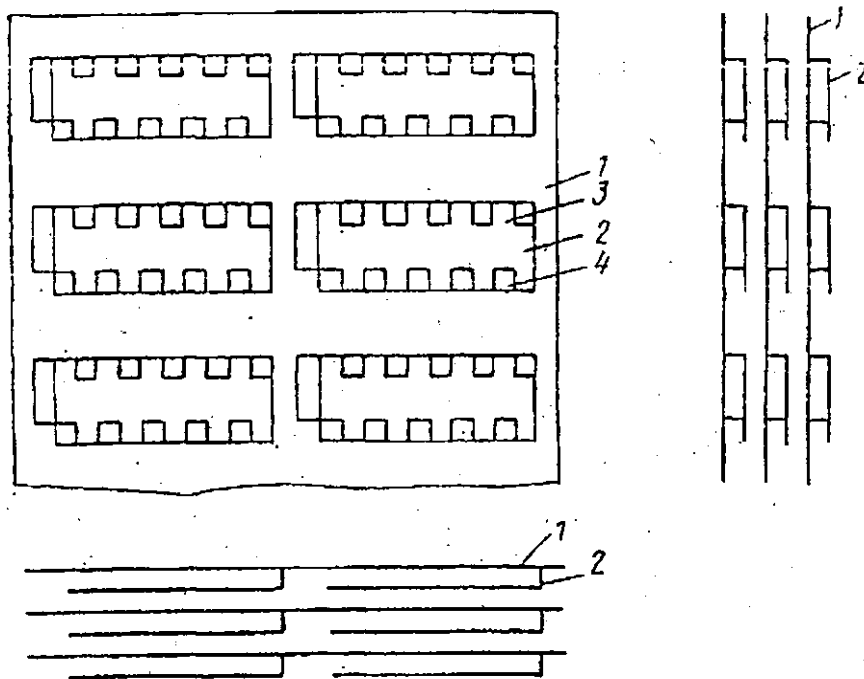


Рис.4. Насадка з багатозубчастими Г-подібними вертикальними пелюстками.

Відстань між листами при збиранні їх у пакети дорівнює ширині пелюсток, які одночасно виконують роль дистанційних елементів. Довгі листи насадки можуть бути згорнуті в рулон у вигляді спіралі Архімеда - рис. 3, в. Поверхня листів насадки з метою спрямування рідини на центри отворів може виконуватись рифленою – рис.3,а. Пелюстки (і отвори) можуть мати два зубці – рис.3, б – або більше. Пелюстки з кількома зубцями відгинають у вигляді літери Г – рис.4, або літери z - рис.5 [6, 9].

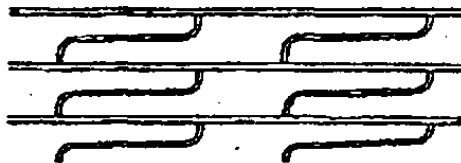


Рис.5. Насадка з z – подібними вертикальними пелюстками.

Насадка з Г – подібними пелюстками – рис.4 - складається з вертикальних листів 1 з видовженими пелюстками 2, які мають зубчасті верхні 3 і нижні 4 краї. Пелюстки відігнуті у вигляді літери Г з видовженою прямою ділянкою, паралельною

площині листів і розташованою посередині між листами. Краплинно – плівкова течія рідини і її контактування з газом відбувається як на поверхні листів, так і на поверхні пелюсток, що сприяє збільшенню поверхні контакту фаз.

Z – подібні пелюстки – рис.5 – доторкаються відігнутими кінцями до суміжних листів, що гарантує паралельність видовжених ділянок пелюсток і листів насадки.

Насадки з нахиленими пелюстками показана на рис.2, к. Нахилені пелюстки розташовують переважно вертикальними рядами так, щоб у зазорах між сусідніми листами забезпечити каскадне стікання більшої частини рідини з пелюстки на пелюстку у вигляді крапель або струминок окремими вертикальними потоками (при цьому менша частина рідини, що подається на зрошення, стікає поверхнею перфорованих листів і між обома типами потоків відбувається неперервний обмін певною кількістю рідини). Верхні і нижні краї пелюсток і отворів з метою дробіння рідини на краплі мають зубчасту форму. Кут нахилу пелюсток до вертикалі може бути різним (від 30° до 90°).

Зі збільшенням кута нахилу пелюсток зростає ефективність масообміну і, відповідно, гідравлічний опір насадки. При куті нахилу пелюсток 60° до вертикалі ефективність масообміну в апаратах з такою насадкою наближається до ефективності апаратів з засипаними внавал кільцями Рашига аналогічного еквівалентного діаметра, але, внаслідок доцільно організованого руху потоків, гідравлічний опір насадки з пелюстками приблизно вдвічі менший, що переконливо свідчить про переваги регулярної насадки.

Таким чином, змінюючи кут нахилу пелюсток можна отримати регулярні пакетні насадки з широким діапазоном технологічних характеристик, які змінюються в межах від характеристик регулярних насадок до характеристик нерегулярних насадок і при цьому регулярні насадки мають менший гідравлічний опір ніж нерегулярні насадки з такою ж ефективністю масообміну.

Пелюстки можна відігнути в горизонтальне положення (тобто під кутом 90°) по контуру верхньої або нижньої горизонтальної лінії отворів. На рис.6 показаний варіант насадки [7], у якій пелюстки у горизонтальних площинах $x_1O_1y_1$ і $x_2O_2y_2$ відігнуті у горизонтальне положення і утворюють горизонтальні решітки, які за будовою нагадують решічасті провальні тарілки з барботажною контактною зоною. Між горизонтальними решітками по вертикалі розміщені листи з зубчастими отворами без пелюсток, які утворюють контактну зону з краплинно-плівковою течією. Колони з такою насадкою нагадують апарати з вертикальними контактними решітками.

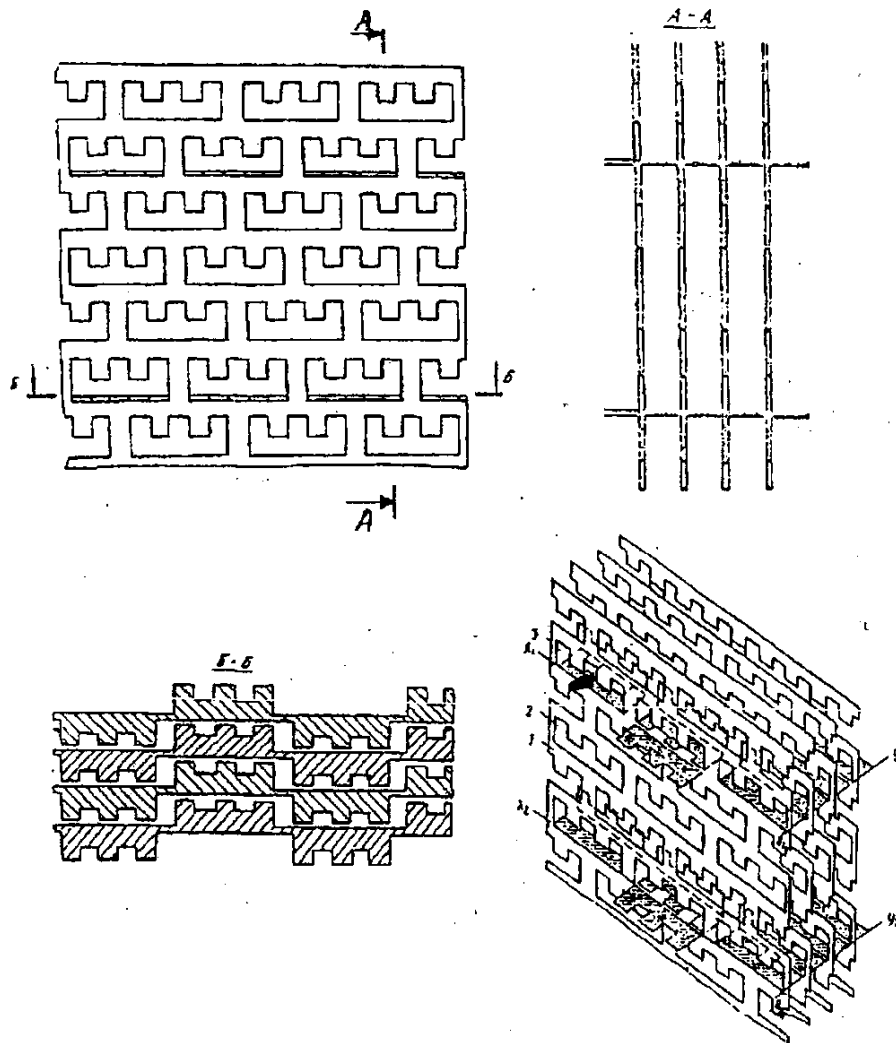


Рис.6. Насадки з зубчастими пелюстками, що утворюють горизонтальні решітки.

При зрошенні насадки рідина гальмується і затримується на горизонтальних решітках і поступово перетікає вниз крізь отвори решітки. Крізь ці ж отвори протитічно проходить газ, вступаючи в тісний контакт з рідиною. Залежно від витрат рідини і газу та вільного перерізу решіток на останніх утворюється газорідинний барботажний шар певної висоти, який є зоною ефективної взаємодії фаз.

Якщо рідина, що подається на горизонтальну решітку, розподілена нерівномірно, то пелюстки решіток у горизонтальне положення відтинають по лінії нижніх країв отворів. У цьому разі рідина з перевантажених ділянок решітки легше розтікається на менш завантажені ділянки і розподіляється більш рівномірно. Тому горизонтальні решітки можна використовувати у якості ефективних перерозподільвачів рідини і газу. Перевагою таких перерозподільвачів є суміщення перерозподільних властивостей з високою ефективністю контактування фаз, що дозволяє зменшити висоту апаратів з такими пристроями.

Особливістю решіток є періодичне чередування отворів більшого і меншого розмірів, що дозволяє краще організувати рух фазових потоків та сприяє збільшенню поверхні контакту і зменшенню гідравлічного опору.

Перфорування вертикальних листів насадки дає змогу поєднати дві важливі позитивні властивості: рівномірно розподілити рідину на поверхні листів; забезпечити сприятливі умови оновлення поверхні контакту за рахунок багаторазового повторення актів утворення крапель.

Дослідження показали, що перфоровані зубчастими отворами листи мають хороші сепаруючі властивості, тому їх наявність між решітками у разі утворення

барботажного шару дозволяє у 1,5...2,0 рази зменшити відстань між решітками за рахунок зниження висоти зони піни і бризок.

Діапазон стійкої роботи насадки розширюється внаслідок стабілізуючого впливу вертикальних перфорованих листів, як контактних елементів. У разі роботи насадки в режимі без утворення зон барботажу, дієздатність насадки забезпечується роботою вертикальних листів у краплинно-плівковому режимі і високим ступенем турбулізації газового потоку решітками. При утворенні зон барботажу стабілізуюча дія перфорованих вертикальних листів проявляється внаслідок уловлювання крапель рідини над барботажним шаром та додаткового диспергування газорідних струменів всередині барботажного шару.

Підвищити ефективність регулярних насадок з пелюстками можна також за допомогою поєднання їх з іншими конструктивними елементами так, щоб вони підсилювали дію один одного і загальне підвищення ефективності тепломасообміну супроводжувалось мінімальним зростанням гідравлічного опору. Прикладом такого поєднання можуть бути виконання горизонтальних гофрів між горизонтальними рядами пелюсток – рис.2, м - [8, 9, 13], застосування гофрованих листів між плоскими листами – рис.2, л, гофрування пелюсток, відгинання країв пелюсток або отворів [5].

Висновок. Змінюючи будову регулярних пакетних насадок із зубчастими пелюстками, зокрема змінюючи кут нахилу, форму і розміщення пелюсток та поєднуючи пелюстки з іншими конструктивними елементами можна отримати різновиди насадок з широким спектром технологічних характеристик від характеристик регулярних насадок до характеристик нерегулярних насадок, включаючи будь-які проміжні значення. Це дає змогу прогнозовано підбирати будову насадок згідно з технологічними умовами проведення тепломасообмінного процесу. Регулярні насадки з зубчастими пелюстками та в поєднанні з іншими конструктивними елементами можуть замінити практично всі типи нерегулярних насадок, зберігаючи при цьому свої переваги, зокрема основну перевагу – більш низький гідравлічний опір при однаковій ефективності тепломасообміну.

Література

1. А. с. 440147 СССР, МКИ ВО1 Д 53/20. Регулярная пластинчатая насадка / Марценюк А.С. – Оpubл. 25.08.1974 г., Бюл. №31.
2. А. с. 713581 СССР, МКИ ВО1 Д 53/20. Регулярная насадка / Лейбович Л.И., Любарский В.И. – Оpubл. 1980 г., Бюл. №5.
3. А. с. 814419 СССР, МКИ ВО1 Д 53/20. Насадка для тепломассообменных колонн / Нечаев Ю.Г., Олевский В.М., Ручинский В.Р., Михальчук Е.М. – Оpubл. 1981 г., Бюл. №11.
4. А. с. 1327939 А1 СССР, МКИ 4 ВО1 Д 53/20. Регулярная насадка для тепломассообменных аппаратов с пленочно-капельным течением дисперсной фазы / Марценюк А.С. – Оpubл. 06.12.1984 г., Бюл. №29.
5. А. с. 1369775 А1 СССР, МКИ 4 ВО1 Д 53/20. Регулярная насадка / Марценюк А.С. – Оpubл. 30.01.1988 г., Бюл. №4.
6. А. с. 1318269 А1 ССР, МКИ 4 ВО1 Д 53/20. Регулярная насадка для тепломассообменных аппаратов / Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н. – Оpubл. 21.11.1985 г., Бюл. №23.
7. А. с. 1291191 А1 СССР, МКИ ВО1 Д 53/20. Регулярная насадка / Марценюк А.С. – Оpubл. 18.07.1985 г., Бюл. №7.
8. А. с. 1443949 А1 СССР, МКИ 4 ВО1 Д 53/20, 11/04. Регулярная насадка с пленочно-капельным течением дисперсной фазы / Марценюк А.С. – Оpubл. 29.06.1987 г., Бюл. №46.
9. А. с. 1685502 А1 СССР, МКИ ВО1 І 19/32. Регулярная насадка для тепломассообменных аппаратов / Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н. – Оpubл. 19.06.1989 г., Бюл. №39.
10. Боярчук П.Г., Олевский В.М., Исследование гидродинамики и массообмена в колоннах с регулярными насадками // Химия и технология продуктов органического синтеза. Процессы и аппараты. – Труды ГИАП. – 1969. - Вып. 1, ч. 2, с. 53-69.
11. Гладильщиков С.В., Щелкунов В.А., Крутков С.А., Моложанов Ю.К. Насадки массообменных аппаратов для нефтепереработки и нефтехимии. Обзорная информация. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. – Серия ХМ-1. – 1983. - 48 с.
12. Гуляев Ф.А., Шпорхун В.М., Решетняк И.Д. Сравнительная оценка эффективности сотовых насадок для вакуумных массообменных колонн // Хим. и нефт. машиностроение. – 1969. - №2. - С.11-12.

13. Деклараційний патент України на корисну модель 10386, МПК 7 I 19/32. Регулярна насадка з зубчастими отворами і гофрами / Марценюк О.С. - Опубл. 15.11.2005р., Бюл. №11
14. Дорошенко А.В., Сикорская Е.М., Липа А.И. Теплообменная противо- и поперечноточная насадочная аппаратура для холодильной техники // Холод. техника. - 1984. - №2. - С.36-41.
15. Задорский В.М., Интенсификация газожидкостных процессов химической технологии. - К: Техника, 1979 - 198с.
16. Конончук А.А., Стабников В.Н. Гидравлические сопротивления массообменных аппаратов с регулярными пластинчатыми насадками // Изв. вузов СССР. Пищевая технология. - 1968. - №1. - С. 143-147.
17. Марценюк А.С. Разработка и применение регулярных насадок в противоточных пленочных массообменных аппаратах. - М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1975. - 32с.
18. Марценюк О.С. Науково-технічні основи інтенсифікації масообміну в газорідних апаратах з регулярними насадками // Дисертація ... д-ра техн. наук. - К: НУХТ. - 2006. - 429с.
19. Марценюк О.С., Гусейнов Р.Н. Интенсификация процесса массообмена в колоннах с регулярными насадками // Тепло- и массообменные процессы в пищевой промышленности : Тематич. сб. научных трудов. Под ред. П.С.Цыганкова. - К: УМК ВО - 1990. - С.151-161.
20. Марценюк О.С., Стабников В.Н. Пленочные тепло- и массообменные аппараты в пищевой промышленности. - М.: Легкая и пищевая промышленность. - 1981. - 160 с.
21. Олевский В.М., Ручинский В.Р. Ректификация термически нестойких продуктов. - М.: Химия. - 1972. - 200с.
22. Патент 1263479 Великобританії, В1R МКИ ВОІД 3/22. Distillation apparatus. - 1972.
23. Патент 1341981 Великобританії, В1R 3E, МКИ ВОІД. Heavy-duty exchangeable packing for columns. - 1973.
24. Патент 88621 ПНР, МКИ ВОІД 35/20. Wypełnienie kolumn do wymiany masy / Jan Kwasniak. - 1997.
25. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура. Под ред. В.М. Олевского. - М.: Химия, 1988. - 240с.