

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.

УДК 66.0:664.011

О.С. Марценюк, А.В. Копиленко,
Л.М. Мельник, Н.А. Жестерева,
кандидаты техн. наук

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ АБСОРБЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ КОЛИВАНЬ РІЗНОГО МАСШТАБНОГО РІВНЯ

Перенесення компонента в процесі абсорбції із газової фази у рідкий сорбент (система газ—рідина) складається з послідовного проходження чотирьох стадій: перенесення компонента всередині потоку газової фази до прилежого шару газу біля поверхні поділу фаз; перехід компонента крізь прилежувальний шар газової фази; перехід крізь прилежувальний шар рідкої фази; перенесення компонента (вирівнювання концентрації компонента) всередині рідкої фази від прилежого шару в ядро потоку. Усі стадії здійснюються послідовно, тому загальна швидкість процесу встановлюється на рівні швидкості найповільнішої стадії. Завдання інтенсифікації зводиться до прискорення перенесення компонента у найповільніших стадіях процесу.

Коефіцієнти дифузії (компонента) у газовій фазі на кілька порядків перевищують коефіцієнти дифузії у рідинах, тому повільніше перенесення компонента частіше спостерігається у рідкій фазі. Щоб прискорити процес, рідку фазу приводять у рухливий стан (турбулізують) переважно перемішуванням. Якщо процес масообміну стримується опором перенесенню компонента у газовій фазі, то слід турбулізувати газову фазу.

Як правило, при абсорбції добре розчинних газів опір зосереджується переважно у газовій фазі, а погано розчинних — у рідкій. Співвідношення опорів на різних стадіях процесу залежить також від концентрації компонента. При малих концентраціях (відносно рівноважної) рівняння фазової рівноваги розчинення газів описується відрізком прямої лінії і гази можна вважати добре розчинними. У разі збільшення концентрації компонента в рідкій фазі опір його розчиненню у рідині зростає.

На розподіл опору впливають також гідродинамічні умови контактування. Наприклад, якщо у плівковому апараті опір перенесенню речовини зосереджений у рідкій фазі (абсорбція CO_2 водою із суміші з повітрям), то додаткова турбулізація газового потоку не дає відчутного результату. Але якщо швидкість руху газової фази збільшити настільки, щоб газ інтенсивно впливав на течію рідини (режим інтенсивної взаємодії фаз), то масообмін у рідкій фазі також прискориться; проте цей варіант супроводжується невиправдано високою витратою енергії.

Щоб перенесення маси проходило однаково швидко в усіх точках апарата, перемішування має бути однаково інтенсивним в усьому об'ємі. Завдання перемішування

полягає не просто у створенні турбулентності, а й у забезпеченні однакового ступеня турбулентності в усіх зонах контакту фаз. Проте досягти такого стану, як правило, дуже важко.

При турбулентному режимі течії перенесення маси є результатом перебігу одночасно двох різних за масштабним рівнем процесів: 1) конвективного перенесення великих елементів потоку зі спрямованою течією середовища; 2) накладання на нього рухів різного масштабу [1]. Залежно від переважаючої довжини шляху (або часу) існування окремих елементів потоку (струменів, пульсацій) і їхнього впливу на перенесення енергії та маси розрізняють макро- і мікромасштабні пульсації та, відповідно, макро- і мікрорівні перемішування.

При пульсаціях на мікрорівні розмір окремих елементів потоку нехтовно малий порівняно з розмірами апарата, але сумірний з розмірами дисперсних частинок і товщиною прилежувальних шарів. Пульсації на мікрорівні проникають крізь прилежувальний шар, активізують і оновлюють поверхню контакту фаз, збільшують градієнт концентрації (рушійну силу процесу масообміну) поблизу прилежого шару.

Розмір елементів потоку макрорівня сумірний з розмірами апарата. Макропотоки вирівнюють концентрацію компонента в ядрі потоку, збільшують рушійну силу в об'ємі апарата впливаючи на структуру потоків, яка може змінюватись від режиму ідеального витіснення до режиму ідеального перемішування. Проміжні значення структури потоків характеризують критерієм Пекле.

Щоб охарактеризувати масштабний рівень масообміну, можна скористатись подібністю з роботою насоса. У цій подібності більша продуктивність насоса (макрорівень) відповідає більшій кратності циркуляції макропотоків, а вищий напір — вищому ступеню турбулентності. Щоб інтенсифікувати макроперенесення, вибирають пристрої з більшою кратністю циркуляції, а мікроперенесення — з більшим ступенем турбулентності.

Інтенсифікація стадії перенесення компонента всередині фази здійснюється переважно завдяки посиленню макроперемішування (макропульсації), а стадії перенесення крізь прилежувальні шари — за допомогою мікроперемішування.

Кожен масштабний рівень перемішування дає змогу вирішити свої технологічні завдання і, у свою чергу,

може бути ефективно реалізований за допомогою створення турбулентних пульсацій (коливань) відповідної частоти і природи в апаратах відповідного типу. Останнє пояснюється тим, що в кожній конструкції апарата створюється своє співвідношення між макро- і мікропотоками. Неідеальність гідродинамічних режимів контактування фаз збільшує тривалість процесу.

Турбулентні пульсації мають найбільшу інтенсивність всередині (у ядрі) потоку, зменшуються на його периферії і практично повністю згасають у прилежній плівці біля поверхні поділу фаз (якщо вона не турбулізована). У нерухомій пристінній прилежній плівці речовина переноситься лише внаслідок молекулярної дифузії, швидкість якої на кілька порядків менша від швидкості турбулентної дифузії.

Із збільшенням турбулізації потоку зменшується товщина прилежних плівок, внаслідок чого прискорюється перенесення речовини крізь прилежні шари [2].

Основною проблемою створення ефективних апаратів є пошук надійних і економічно доцільних способів підведення додаткової енергії для турбулізації потоків і її рівномірного розподілу в усьому об'ємі апарата. Якщо транспортувальні та перемішувальні пристрої не забезпечують рівномірно розподіленої високої турбулентності потоків, то застосовують додаткове підведення енергії за допомогою вібрації (коливань елементів апарата чи контактних пристроїв) або пульсації (коливання об'єму робочих продуктів чи окремих фаз).

Пульсаційний рух поширюється в об'ємі апарата досить упорядковано з майже однаковою швидкістю, тому його інтенсифікувальна дія у різних зонах апарата проявляється рівномірніше, ніж у разі застосування механічного або барботажного перемішування. Накладання додаткових пульсацій на контактуючі фази істотно змінює гідродинамічні умови процесу. Інколи це дає можливість збільшити швидкість і зменшити економічні витрати на здійснення як періодичних, так і безперервних процесів [3].

Колівання слід накладати на ту фазу, у якій зосереджено основний опір масопередачі [4, 5]. Вибірково створюючи макро- або мікроколивання у відповідних фазах, можна цілеспрямовано прискорювати перебіг найповільніших стадій процесу, інтенсифікуючи роботу сорбційного апарата.

Класифікація методів застосування коливань для інтенсифікації процесів абсорбції в апаратах різних типів наведена в таблиці, з якої випливає, що для кожної конс-

трукції апарата можна використати коливання різної природи з дещо відмінним спектром масштабного рівня. Остаточний вибір масштабних і частотних характеристик коливань та методу їх створення здійснюється на основі техніко-економічних розрахунків.

Вплив коливань на рух потоку можна пояснити [1] на основі висновків теорії локальної анізотропної турбулентності Колмогорова—Обухова. Кожний окремий коливальний рух являє собою накладання на осереднений спрямований рух потоку пульсаційної зміни швидкості із змінними напрямком і амплітудою. Цей коливальний рух характеризується пульсаційною швидкістю V'_λ і масштабом λ — відстанню, на якій миттєве значення швидкості змінюється на величину V'_λ . Період T_λ пульсації масштабу λ — тривалість зміни швидкості на величину V'_λ — за порядком дорівнює приблизно λ/V'_λ . Максимальним значенням пульсаційних швидкостей у потоці відповідає максимальний масштаб $\lambda = l$, що характеризує розмір ділянки, на яку поширюється пульсація (якщо вона не обмежується стінками апарата). За порядком значення пульсаційна швидкість V'_λ відповідає різниці значень середньої швидкості на відстані l . Такі пульсації мають назву макромасштабних. Вони несуть основну частину кінетичної енергії коливання і характеризуються найбільшим періодом або найменшою частотою $\nu_1 = 1/T_1$.

Макромасштабні (первинні) пульсації розпадаються на пульсації з більш високими частотами, які характеризуються меншими значеннями V'_λ і λ . Отже, стосовно коливального руху, як і турбулентного режиму руху взагалі, можна говорити про безперервний спектр пульсаційних швидкостей і масштабів. У разі штучного створення коливань ми задаємо коливання з потрібними характеристиками або накладаємо на систему інтенсивніші коливання, які, розпадаючись, забезпечують спектр коливань потрібного масштабу.

Інтенсивність перенесення енергії пульсаційними рухами масштабу λ оцінюють критерієм Рейнольдса $Re_\lambda = V_\lambda d/\nu$, який є мірою відношення інерційних сил до сил в'язкого тертя при перенесенні імпульсу на відстань λ (l — визначальний геометричний розмір пульсаційного руху, ν — кінематичний коефіцієнт в'язкості). Для макропульсацій масштабу $\lambda \approx l$ значення Re_λ суттєво перевищують одиницю і перенесення на відстань порядку λ здійснюється практично без участі в'язких сил, тобто без розсіювання (дисипації) енергії. У міру зменшення масштабу руху критерій Re_λ зменшується і при певному критич-

Класифікація методів застосування коливань для інтенсифікації процесів абсорбції

Масштабний рівень коливань	Частота коливань	Природа коливань	Типи абсорберів
Молекулярний (мікрорівень)	Висока	Акустична, кавітаційна, електрична, магнітна, попередня дія електричних і магнітних полів, використання магнітних частинок	Поверхневі, плівкові
Прилежні шари (мікрорівень)	Висока	Електричні поля і розряди, кавітаційна, п'єзоефект, магнітострикція, створення міжфазної турбулентності за допомогою теплових і концентраційних градієнтів, застосування феромагнітних тіл	Плівкові, механічні, роторні, насадкові, поверхневі
Плівка, що стікає, контактний пристрій (зонний рівень)	Висока, середня	Накладання електричних і магнітних полів, механічна, використання енергії потоків, автоколивання контактних пристроїв, перерозподіл потоків рідини і газу	Плівкові, тарілчасті з протитечією та прямотечією
Контактний ступінь (зонний рівень, макрорівень)	Середня, низька, пульсація витрати рідини	Механічний вібропривід, імпульсна взаємодія фаз, використання клапанів, автоколивання контактних пристроїв, вібрувальна насадка, крапельно-плівкова течія, режим емульгування	Насадкові, тарілчасті
Апарат (макрорівень)	Середня, низька, суміщення коливань різних частот	Магнітні поля, вібропривід, автоколивання, імпульсна та циклічна подачі фаз, вібрувальна та псевдо-зріджена насадка, рециркуляція потоків, емульгування	Плівкові, тарілчасті, пульсаційні, вібраційні

ному значенні масштабу λ_0 (так званий внутрішній масштаб турбулентності) стає близьким до одиниці. В області масштабів $\lambda \leq \lambda_0$ (дисипативні масштаби) вплив в'язкості суттєвий і мікротурбулентні рухи супроводжуються переходом кінетичної енергії в теплову. Отже, кінетична енергія пульсаційних рухів, проходячи серію перетворень від крупних до дрібніших пульсацій, перетворюється в енергію теплового руху молекул. Тому коливальний рух (або турбулентну течію) можна підтримувати лише при безперервному підведенні енергії іззовні.

Якщо розмір зони l_3 , яка підлягає інтенсифікації за допомогою коливань, відповідає умові $\lambda_0 < l_3 < l$, то у потоці завжди існують пульсації, масштаб яких дорівнює розміру зони. Проте енергія вторинних пульсацій, що утворилися внаслідок розпадання пульсацій великого масштабу, може бути недостатньою для відчутного впливу на потік. Тому на потік доцільно накладати коливання потрібних характеристик, а не турбулізувати його в цілому, сподіваючись, що якісь вторинні частотні характеристики, відповідаючи масштабу і частотам зони, сприятимуть інтенсифікації.

Масштаб коливань має відповідати масштабу тих ділянок системи, які підлягають інтенсифікації. У свою чергу, переважаюча частота коливань має відповідати частоті власних коливань системи і тому частотному рівню, на якому досягається максимальна інтенсифікація режиму взаємодії.

У строгому викладенні теорія стосується розвинутих однорідних ізотропних турбулентних потоків, в яких усереднені характеристики турбулентних пульсацій в усіх точках однакові й усі статистичні характеристики руху не залежать від напрямку. Ці умови не виконуються в течіях із зсувом внаслідок переважаючої орієнтації середнього руху, проте для рухів малих масштабів ($\lambda_0 < \lambda \ll l$) висновки теорії можуть бути застосовані.

У масштабах $\lambda > \lambda_0$ пульсаційна швидкість V_λ залежить лише від масштабу λ і локального значення потоку енергії ϵ_0^* та описується формулою, яку називають "законом двох третин" Колмогорова—Обухова

$$(V')^2 = (\epsilon_0^* \lambda)^{2/3},$$

де ϵ_0^* — локальне значення дисипації енергії в одиниці маси рідини, Вт/кг.

Нижня межа застосовуваності співвідношення зумовлюється значенням критерію Рейнольдса

$$Re_{\lambda_0} = V'_{\lambda_0} \lambda_0 / \nu \approx 1.$$

Звідси внутрішній масштаб турбулентності

$$\lambda_0 \approx (\nu^3 / \epsilon_0^*)^{1/4}.$$

Масштаб λ_0 не є найменшим масштабом пульсацій. У турбулентному потоці існують пульсації швидкості також у дисипативному діапазоні масштабів ($\lambda < \lambda_0$). Для таких пульсацій характерне швидше затухання із зменшенням масштабу

$$V'_\lambda = V'_{\lambda_0} / (\lambda / \lambda_0)$$

і постійність частоти

$$1/T_\lambda = \nu_\lambda = V'_\lambda / \lambda = V'_{\lambda_0} / \lambda_0.$$

Масообмін у системі газ—рідина супроводжується виникненням коливань різних частот не лише в наслідок гідродинамічної взаємодії фаз і зміни швидкості їхнього руху механічними пристроями, а й за рахунок безпосереднього впливу масообміну: просторово-часових змін концентрацій і витрат компонентів, теплових ефектів, змін поверхневого натягу і порушення стабільності поверхонь поділу фаз, створення міжфазної турбулентності. Елементи структури газорідної системи можна уявити як нез'язані між собою резонатори з різними власними частотами.

У цьому разі основна задача інтенсифікації масообміну методом накладання зовнішніх коливань полягає у виборі спектра дії, узгодженого з коливальними властивостями системи [4].

За спектральним складом розрізняють вузько- і ширококутову дію коливань. Вузькосмугові коливання ефективні лише у смузі чутливості системи, коли настає явище резонансу і від зовнішнього джерела відбирається максимальна кількість енергії. Для систем з широким спектром власних частот ефективною виявляється ширококутова дія близького спектра або вузькосмугова дія зовнішнього джерела з частотами, що відповідають частотам коливань окремих переважаючих елементів системи.

Щоб характеризувати складні коливання систем з багатьма ступенями вільності, використовують спектральне подання функцій. При цьому характеристику процесу в часі τ зображають розкладанням у ряд Фур'є постійної складової і нескінченного ряду складників, що характеризують гармонічні коливання з частотами, кратними основній частоті:

$$f(\tau) = A_0 \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos 2\pi k \frac{\tau}{T} + b_k \sin 2\pi k \frac{\tau}{T} \right)$$

де A_0 — константа; $k = 1, 2, 3, \dots$; $a_k = \frac{2}{T} \int_{-\tau/2}^{+\tau/2} f(\tau) \cos 2\pi k \frac{\tau}{T} d\tau$; T — період коливань; $b_k = \frac{2}{T} \int_{-\tau/2}^{+\tau/2} f(\tau) \sin 2\pi k \frac{\tau}{T} d\tau$.

Цей ряд повністю визначає періодичну функцію $f(\tau)$, якщо задано всі амплітуди.

Зображення газорідної системи як системи нез'язаних резонаторів досить умовне і занадто спрощує коливальні явища у ній. Наприклад, турбулентні вихори, що характеризуються порівняно невисокими значеннями власних частот, можуть бути джерелом високочастотних шумів, споріднених кавітаційному, який виникає, наприклад, при роботі високошвидкісного вихрового насоса.

У газорідних системах коливання затухають інтенсивніше, ніж у чистих рідинах, особливо із збільшенням вмісту газової фази. Це слід враховувати при застосуванні вібраційної техніки, намагаючись накладати коливання в зонах зосередження основного опору перенесенню маси.

Висновок. Інтенсифікуючи процеси сорбції за допомогою коливань, слід враховувати масштабний рівень тих зон апаратів, у яких гальмується процес, і накладати коливання з частотою, близькою до частоти спонтанних коливань у цих зонах. Запропонована класифікаційна таблиця може бути використана для орієнтовного визначення масштабних і частотних характеристик коливань в абсорбційних апаратах різних типів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Брагинский Л.Н., Бегацев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах. — М.: Химия, 1984. — 336 с.
2. Кафаров В.В. Основы массопередачи. — М.: Высшая шк., 1979. — 439 с.
3. Карпачева С.М., Рябчиков Б.Е. Пульсационная аппаратура в химической технологии. — М.: Химия, 1983. — 224 с.
4. Задорский В.М. Интенсификация газожидкостных процессов в химической технологии. — К.: Техніка, 1979. — 198 с.
5. Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности: В 2 ч. — К.: Полиграфкнига, 1997. — Ч. 1. — 839 с.

Надійшла до редколегії 08.04.02 р.