

INTENSIFICATION OF ABSORPTION PROCESSES USING THE REGIME METHODS

A. Martseniuk

National University of Food Technologies

Key words:

*Intensification of
absorption processes
Vibration-wave
phenomena
Transients*

Article history:

Received 15.11.2015
Received in revised form
29.11.2015
Accepted 08.12.2015

Corresponding author:

A. Martseniuk
E-mail:
npnft@ukr.net

ABSTRACT

Regime methods for intensifying the processes of absorption, in contrast to stationary technological methods, are based on violation of a stationary process by causing singular or repeated disturbances of system parameters, which change phase equilibrium. During the subsequent non-durable recovery phase at a new level of thermodynamic equilibrium, an intensive energy conversion takes place in the system, along with the acceleration of heat and mass transfer processes. The main directions of the regime intensification of the processes are the development of new and improvement of existing hardware with a spontaneous onset of the vibration-wave phenomena, the immediate imposition of vibrations and pulsations in the operating system and its elements, as well as the combination of oscillatory phenomena of different physical nature. The implementation of these methods requires a deep and sufficiently long-term study with significant economical costs. Therefore, in the near future, an effective way to intensify the processes of absorption will be to apply well-known design solutions that best meet the requirements of the process.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ АБСОРБЦІЇ РЕЖИМНИМИ СПОСОБАМИ

О.С. Марценюк

Національний університет харчових технологій

Режимні способи інтенсифікації процесів абсорбції, на відміну від стаціонарних технологічних способів, ґрунтуються на порушенні стаціонарності процесів внесенням у систему окремих або повторюваних збурень її параметрів, які змінюють фазову рівновагу. Під час наступного нетривалого відновлення фазової рівноваги на новому термодинамічному рівні у системі відбуваються інтенсивні енергетичні перетворення, які супроводжуються прискореним перебігом тепломасообмінних процесів. Основними напрямками режимної інтенсифікації процесів є розроблення нових і удосконалення існуючих апаратних рішень зі спонтанним проявом коливально-хвильових явищ, безпосереднє накладання коливань і пульсацій на робочі системи та їх окремі елементи, а також суміщення коливальних явищ різної фізичної природи. Реалізація цих напрямків вимагає глибоких високоякісних і досить тривалих дослід-

жень, тому на найближчу перспективу дієвим способом інтенсифікації процесів абсорбції є застосування відомих конструктивних рішень, які найповніше відповідають вимогам проведення процесу.

Ключові слова: інтенсифікація процесів абсорбції, коливально-хвильові явища, перехідні режими.

Постановка проблеми. Розвиток харчової промисловості України вимагає інтенсифікації технологічних процесів, зокрема процесів абсорбції. Ці процеси використовуються для виготовлення високоякісних харчових продуктів, очищення викидів відходів у навколишнє середовище, сприяють впровадженню безвідходних технологій виробництва з повною комплексною переробкою сировини.

Під інтенсифікацією процесів розуміють збільшення швидкості їх перебігу (виходу продукту з одиниці об'єму апарата). Закони збереження енергії і маси вказують на те, що інтенсифікацією процесів не можна створити додаткову теплову енергію чи масу продукту, проте можна за рахунок збільшення швидкості перебігу процесів зменшити розміри апаратів, теплові і продуктові втрати, заощадити капітальні й експлуатаційні витрати.

Розрізняють два основні способи інтенсифікації безперервних процесів: технологічні і режимні. Технологічні способи полягають переважно у створенні і підтриманні більш високих рушійних сил (перепадів тисків, температур, концентрацій) між вхідними й вихідними потоками і зниженні опорів перенесенню субстанції у стаціонарних процесах. Режимні способи інтенсифікації передбачають використання інтенсивних режимів взаємодії потоків за рахунок порушення стаціонарності процесів внесенням у систему збурень певних її параметрів за допомогою механічних (перехідних явищ, використання вібрацій, пульсацій, посиленого перемішування, змін параметрів середовища, які призводять до утворення перехідних режимів) та фізичних (електричних і магнітних полів, акустичних коливань) способів впливу.

Під перехідними режимами розуміють [1] обмежені в часі процеси переходу систем від одних станів термодинамічної рівноваги до інших, тобто перебування систем у неусталеному стані після виведення їх із рівноваги. Зміни стану рівноваги можна визвати цілеспрямованою зміною будь-якого параметра системи або кількох її параметрів одночасно. Найдоступніше створювати перехідні режими зміною тисків, температур і параметрів руху середовищ, проте всі параметри системи нерозривно зв'язані між собою і зміна будь-якого параметра супроводжується змінами всіх інших параметрів системи. Обмежений час перебігу перехідних процесів супроводжується гідродинамічними змінами, енергетичними перетвореннями та інтенсифікацією процесів перенесення.

Використання вібрацій і пульсацій робочих середовищ за своєю природою відноситься до періодично повторюваних перехідних режимів. У ряді випадків неможливо точно відокремити технологічні і режимні способи, оскільки, наприклад, при більшій витраті продукту змінюється режим його руху і спонтанно створюються пульсації, які посилюють масоперенесення.

Мета статті. Проаналізувати основні способи режимної інтенсифікації процесів абсорбції і визначити найбільш дієві, які найповніше відповідають вимогам перебігу процесу.

Виклад основних результатів дослідження. Застосування режимних способів інтенсифікації абсорбції пов'язано з організацією впливу збудуючих факторів на процес у цілому або на окремі його стадії. У процесах газорідної сорбції маса компонента послідовно переноситься спочатку в ядрі потоку першої фази до примежового шару, проходить крізь примежовий шар цієї фази і поверхню поділу фаз, після цього проходить крізь примежовий шар суміжної фази і розподіляється в ядрі її потоку. На кожній стадії перенесення компонента (за винятком проходження крізь міжфазну поверхню, яка не має товщини і за відсутності на ній хімічних перетворень не чинить дифузійного опору) існує відповідний дифузійний опір. Загальний дифузійний опір дорівнює сумі окремих опорів на кожній стадії перенесення. Інтенсифікація процесу пов'язана зі зниженням цих опорів, причому передусім потрібно намагатись знизити ті опори, які мають найбільші значення.

Знизити дифузійні опори в ядрі потоків газу й рідини можна накладанням вібрацій і пульсацій, а також турбулізацією потоків за допомогою більш інтенсивного перемішування, внаслідок чого посилюються турбулентні пульсаційні імпульси. У більшості випадків газова і рідка фази рухаються в турбулентних режимах, що забезпечує досить велику інтенсивність перенесення в ядрі потоку турбулентними пульсаційними струменями. У цих випадках переважна частка дифузійних опорів залишається зосередженою у міжфазних примежових шарах. Поблизу примежових шарів турбулентні пульсації інтенсивно згасають і перенесення компонента в прилеглих до поверхні поділу фаз малорухомих або взагалі нерухомих прошарках відбувається лише молекулярною дифузією.

Товщину прошарків з молекулярним перенесенням маси можна зменшувати загальним підвищенням турбулентності внаслідок того, що турбулентні пульсації в міру турбулізації ядра потоку все глибше проникають у примежові шари. Проте при цьому переважна частина витраченої на турбулізацію енергії буде втрачатись на дисипацію у межах ядра потоку і значно менша частина — на проникнення турбулентних пульсацій у примежові шари.

Значне підвищення швидкості руху потоків з метою їх турбулізації у багатьох випадках не доцільне, оскільки гідравлічні опори і витрати на їх подолання внаслідок дисипації енергії зростають значно інтенсивніше, ніж підвищується швидкість міжфазного перенесення. З точки зору економії енергетичних витрат доцільно створювати пульсації безпосередньо у примежових шарах і на межі поділу фаз.

Одноразове створення таких пульсацій реалізується спонтанно при формуванні нової міжфазної поверхні у перші моменти витікання газових струменів у рідину в барботажних процесах, у перші моменти розпилення рідин у газах, під час об'єднання дрібних краплинок або бульбашок газу в крупніші та при їх розпаді. Доцільно створювати й удосконалювати апарати, в яких би реалізувалось почергове повторення процесів диспергування і об'єднання елементів дисперсної фази. Прикладами таких апаратів є колони, на тарілках яких реалізується прямотечійний рух фаз у струминно-пінному режимі, емульгаційні колони, розпилювальні контактні пристрої з послідовним розпиленням і коалесценцією рідкої фази.

Для інтенсифікації абсорбційних процесів режимними способами можуть бути використані фізичні методи впливу (збільшення поверхні контакту фаз шляхом тонкого диспергування струменів рідин або газів, збільшення швидкостей руху взаємодіючих потоків, поверхнева конвекція і турбулентність, вібрації, пульсації, перехідні явища, додавання ПАВ, накладання електромагнітних, електростатичних, ультразвукових полів тощо), конструктивне удосконалення окремих елементів обладнання (насадок, тарілок, розподільних, розпилювальних і сепараційних пристроїв тощо) та створення принципово нових конструкцій абсорбційних апаратів. Підвищення ефективності процесів не повинно супроводжуватись різким збільшенням гідравлічного опору апаратів, зростанням їх матеріаломісткості і складності виготовлення, зниженням продуктивності і надійності роботи.

Стратегія інтенсифікації конкретних процесів, у тому числі й режимних, полягає в проведенні глибоких досліджень процесу з метою виявлення обмежень, що заважають їх інтенсивному перебігу, і подальшому підбору комплексу заходів, які дозволяють зняти ці обмеження. Розроблення таких заходів вимагає сучасних теоретичних і практичних знань, застосування досить точних вимірювальних приладів і обчислювальної техніки з алгоритмами й програмами, які дозволяють провести цей аналіз, причому бажано в автоматичному режимі. Проте більшість сучасних алгоритмів містить значну кількість спрощувальних допущень, не має узагальнювальних рішень і внаслідок складності досліджуваних систем не може бути використана для отримання оптимальних висновків.

Можна виділити три способи режимної інтенсифікації процесів абсорбції: 1 — розроблення нових й удосконалення існуючих контактних пристроїв з вираженим спонтанним проявом коливально-хвильових явищ та з елементами, що вібрують під впливом динамічних сил потоків, і подальша заміна традиційних контактних пристроїв на більш ефективні); 2 — безпосереднє накладання коливань різних частот, амплітуд і закономірностей зміни амплітудних характеристик на робочу систему чи її окремі елементи; 3 — суміщення коливальних явищ різної фізичної природи.

1. Нові або удосконалені контактні пристрої й апарати з інтенсивними режимами роботи повинні бути нескладними у виготовленні [2], мати широкі межі зміни навантажень по рідині і газу, малу тривалість перебування потоків в апаратах і такі режими руху, що забезпечують максимальне наближення до режимів повного витіснення і створення найбільшої рушійної сили процесів масообміну. Ще не всі конструкції описаних контактних пристроїв досить обґрунтовані й вивчені з установами оптимальних режимів їх роботи і збільшеної пропускну здатності.

Широкий діапазон зміни навантажень і різна необхідна кількість одиниць перенесення вимагають застосування апаратів різних типів і розмірів з різною роздільною здатністю. Порівняння доцільності застосування абсорбційних апаратів різних типів і рекомендації щодо їх вибору наведені в [3, 4]. За необхідності отримати велику кількість одиниць перенесення при порівняно невисоких витратах робочих середовищ перевагу слід віддавати тарілчастим і насадковим апаратам, а якщо навпаки — швидкісним розпилювальним.

У ряді випадків інтенсифікація процесу може бути досягнута заміною традиційних апаратів на більш сучасні, правильним підбором типу апарата і застосованих у ньому відомих контактних пристроїв відповідно до технологічних вимог: відносних витрат рідкої і газової фаз, допустимого гідравлічного опору і швидкостей потоків, вартості виготовлення, зручності експлуатації тощо.

Наприклад, при розширенні виробництва в умовах необхідності збільшення щільності зрошення понад $100 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$ при низьких швидкостях газу ($0,1 \dots 0,5 \text{ м/с}$) тарілчасті колони втрачають ефективність унаслідок наявності переливних пристроїв, які не дозволяють збільшувати продуктивність колон, а використання швидкісних прямотечієвих тарілок неприйнятне, оскільки піднімальна здатність газового потоку недостатня для транспортування великих об'ємів рідини.

У цих умовах доцільною може виявитись заміна тарілчастих ковпачкових колон на струминні зі спіралями Архімеда [5], можуть бути застосовані апарати з вертикальними контактними пристроями, здатні працювати при щільностях зрошення до $300 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$ і підвищеній поглинальній здатності. Замість тарілчастих колон можуть бути використані насадкові колони з регулярною насадкою, зокрема Гліч-грід (фірма Чамплін петроліум, США), Спрей-пак, Зульцер, апарати типу АВР тощо [6].

Регулярні насадки доцільно використовувати в колонах, що працюють під розрідженням. Енергія гравітаційного поля найкраще використовується в розроблених автором [7] перфорованих регулярних пакетних насадках, листи яких обладнані видовженими в горизонтальному напрямку прямокутними отворами, верхні краї яких виконані зубчастими, а нижні горизонтальні краї мають незначні потовщення або короткі кромки, відігнуті в горизонтальне положення. При гравітаційному стіканні рідини листами насадки формується краплинно-плівковий режим течії. На звисаючих вниз зубцях формуються краплі, які згодом відриваються, падають на потовщені нижні краї отворів, де внаслідок удару розплющуються, а потім знову формуються в плівки і краплі. Безперервне послідовне повторення цих актів сприяє оновленню поверхні контакту фаз. Насадки мають мінімальний гідравлічний опір і можуть бути використані в апаратах, що працюють під розрідженням і за необхідності дотримання мінімальних перепадів тиску, зокрема у градирнях. Фрагменти регулярних насадок, наприклад, гофрованої насадки типу «зиг-заг», використовують як краплеуловлювачі.

Основною перевагою колон з регулярними насадками порівняно з колонами з насипними насадками і тарілчастими є підвищена пропускна спроможність і значно нижчий гідравлічний опір (у $5 \dots 10$ разів), що дозволяє суттєво на $30 \dots 40 \%$ знизити енергомісткість і підвищити відбір цільових компонентів та їх якість. Проте це досягається не безкоштовно. Габарити вакуумних колон з регулярними насадками порівняно з тарілчастими приблизно однакові, а трудомісткість виготовлення і вартість регулярних насадок разом з опорними конструкціями, збірною тарілкою і розподільвачем зрошення суттєво дорожчі, ніж тарілчастих колон. Через це використання регулярних насадок не завжди економічно виправдане, і тому не використовувати контактні пристрої тарілчастого типу недоцільно.

У [8] проаналізована комбінована математична модель варіантів руху рідини на суміжних тарілках при прямотечії і протитечії за умови повного перемішування пари і визначені значення ККД тарілок. Проведений аналіз дозволив зробити висновок, що зусилля вчених і конструкторів в галузі інтенсифікації масообмінних тарілчастих апаратів не дадуть бажаного результату при використанні протитечійного руху рідини на суміжних тарілках, тому при конструюванні барботаажних апаратів зі зливом потрібно суміщати ідеальну структуру пінного шару на тарілці (ідеальне витіснення) з односпрямованим рухом рідини. При цьому кількість тарілок можна знизити на 40...50 %.

Оскільки в будові масообмінних апаратів уже закладено спонтанне використання коливально-пульсаційних режимів, причому з частотами, близькими до власних коливань елементів системи, то можна прогнозувати лише незначне підвищення ефективності масообміну за рахунок удосконалення конструкції тарілок.

З метою визначення можливості удосконалення тарілчастих контактних пристроїв було проведено порівняння [9] приведених витрат на розділення в ректифікаційній колоні, обладнаній найбільш ефективними базовими тарілками та «ідеальною» тарілкою. При цьому було враховано, що при проектуванні колон для забезпечення ефективної їх роботи в робочому діапазоні навантажень приймають мінімальні значення ККД і максимальні значення гідравлічного опору. Як базова прийнята клапанна баластна тарілка «ВНИИНЕФТЕМАШ» [10] з дещо ширшим діапазоном роботи, ніж клапанна тарілка Глітч [11], а як «ідеальна» тарілка — гіпотетична конструкція, що має 100 % ефективність розділення в усьому робочому інтервалі навантажень, мінімальний гідравлічний опір і відрізняється простотою виготовлення, низькою металомісткістю і вартістю на рівні звичайної ситчастої тарілки.

Розрахунки за програмою оптимізації на прикладі атмосферної колони розділення сирої нафти показали, що використання “ідеальної” тарілки дозволяє знизити виробничі витрати на розділення на 15,5 % порівняно з базовою моделлю. Це підтверджує думку про те, що резерви підвищення ефективності тарілчастих апаратів за рахунок удосконалення будови тарілок незначні, тому потрібно ретельно оцінювати витрати на розроблення нових конструкцій і освоєння виробництва та порівнювати їх з можливим економічним ефектом.

Ефективність використання об'єму міжтарілчастого простору значною мірою залежить від структури потоків і напрямку їх руху на тарілках. Ральф Кіршбаум і Річард Льюїс у 1935 р. на основі теоретичного аналізу показали переваги використання прямотечійного, порівняно з протитечійним, руху рідини на суміжних тарілках за умови реалізації моделі ідеального витіснення потоків рідкої і газової фаз [12]. Перемішування фаз на тарілках існуючих конструкцій завадило впровадженню цієї ідеї.

Подальше удосконалення структури потоків на тарілках дозволило перейти до прогресивного циклічного режиму руху потоків [13—16], за якого на кожній тарілці в робочий період циклу реалізується повне перемішування фаз, а в період короткої затримки подачі парової фази рідина повністю стікає на нижню тарілку в режимі ідеального витіснення. Удосконалення цикліч-

ного режиму з точки зору більш повного використання об'єму колон повинно здійснюватись у напрямку створення більш ефективних масообмінних пристроїв контактної зони тарілок, визначення оптимальних розмірів контактної зони і шлюзової камери.

З метою інтенсифікації процесу у ряді випадків доцільно застосовувати барботажні апарати із затопленою насадкою [17], в яких унаслідок пульсацій потоків створюється міжфазна турбулентність з інтенсивним завихренням і подрібненням обох фаз. Інтенсивна експлуатація насадкових колон у режимах, близьких до режиму емульгування, призводить до руйнування керамічних насадок. Отже, необхідно створювати нові хімічно стійкі ефективні насадкові тіла з високою механічною міцністю, малою засипною масою, низьким гідравлічним опором, які здатні працювати в широкому діапазоні навантажень. Одночасно потрібно розробляти і впроваджувати методи механізованого завантаження насадок в абсорбційні апарати. При цьому повинні бути забезпечені однакові гідродинамічні умови (швидкість газового потоку, щільність зрошення, гідравлічний опір тощо) в усіх точках об'єму апарата.

Розроблення нових насадок (унаслідок властивості апарата як єдиної системи) повинно супроводжуватись удосконаленням будови зрошувачів і пристроїв для ефективного розподілу газу, що особливо важливо для апаратів великої одиничної потужності. Для високошвидкісних апаратів слід ширше застосовувати ефективні методи розділення потоків (наприклад, відцентрові), здатні працювати в широкому діапазоні газових навантажень. Для пустотілих розпилювальних апаратів потрібні надійні розпилювальні пристрої, що працюють при значній зміні витрат, забезпечують рівномірне дрібнодисперсне розпилення і не забиваються відкладаннями. Для інтенсифікації апаратів слід ширше застосовувати принцип розділення потоків. Потрібні також високоефективні бризкоуловлювальні пристрої, здатні працювати в широких діапазонах газових навантажень.

Слід продовжувати вивчення впливу поверхневого натягу і домішок поверхнево активних речовин на роботу абсорбційних апаратів і на цій основі розробляти оптимальні розміри насадкових тіл та їх елементів і оптимальні режими експлуатації апаратів, враховуючи роль капілярної сталості в забезпеченні максимальної поверхні контакту фаз в одиниці об'єму апарата при мінімальних витратах енергії. Оптимальні умови проведення процесу відповідають конструктивним розмірам контактних елементів, які близькі до розмірів капілярної сталості.

Поверхневі явища відповідають за циркуляційні рухи в рідині, які виникають при досягненні критичних значень чисел Марангоні і залежать від фізико-хімічних властивостей контактуючих фаз, їх концентрацій (співвідношення фазових опорів), величини адсорбції Гіббса, співвідношення часу релаксації адсорбційного шару і дифузії в рідині, геометричних розмірів контактних елементів і колон.

Оновленню поверхні контакту фаз і створенню нової міжфазної поверхні сприяє збільшенні відносної швидкості фаз та інтенсивне подрібнення дисперсної фази. З метою диспергування і рівномірнішого розподілу газової фази можна подавати у рідину вздовж тракту її руху крізь пористі металокерамічні елементи або крізь мембрани, які не пропускають рідку фазу, але пропускають

газову фазу (фільтраційна абсорбція). Суцільна фаза, що рухається з досить великою швидкістю в каналах невеликого діаметра, контактує з малорухомими дисперсними бульбашками біля стінок, що сприяє оновленню поверхні контакту, зменшенню шорсткості каналів стінок і зниженню гідравлічного опору порівняно з течією однофазного потоку. Наявність розподілених у рідині дрібних бульбашок знижує загальну в'язкість системи.

Металокерамічні фільтраційні трубки, особливо на основі титану, крізь які можна вдувати в рідину газ або повітря в дрібнодисперсному стані, можуть бути застосовані у пивоварній та виноробній промисловості для прискорення зброджування пивного суслу і виноматеріалів, для диспергування водню в процесі гідрогенізації масел і жирів, для насичення киснем фруктів, соків, квасів, молочних продуктів, лікарських настоянок, для насичення напоїв діоксидом вуглецю, використовуючи для цього процесу невисокі надлишкові тиски (до 20 кПа). Тривалість повного розчинення дрібних бульбашок газу не перевищує кількох десятків секунд [18]. Збільшення тиску газу та подача кожної з фаз з правильно підібраними параметрами пульсацій можуть значно прискорити процес.

Розроблення чіткої класифікації режимних способів інтенсифікації масообмінних апаратів і їх елементів може стати науковою основою стандартизації в галузі абсорбційної техніки з використанням стандартної технології і стандартного уніфікованого обладнання стосовно конкретних потреб виробництва. Це дозволить створити крупносерійне виробництво стандартних блоків абсорбції газів на спеціалізованих підприємствах, забезпечить підвищення продуктивності праці, скоротить терміни розробки і впровадження абсорбційної апаратури і поліпшить техніко-економічні показники роботи ділянок абсорбції.

2. Безпосереднім накладанням механічних коливань і коливань іншої природи з підібраними частотами й амплітудами, при правильному їх поєднанні з параметрами власних коливань робочих систем або їх контактних зон можна збільшити поверхню контакту фаз, інтенсивність дифузійного перенесення крізь приповерхневі шари і цим значно прискорити процес масообміну,

Найчастіше використовують механічні коливання з відносно малими амплітудами і частотами (5...100 Гц), які здійснюються за синусоїдальним (гармонічним) законом і дозволяють прискорити перебіг процесів без значного додаткового підведення енергії. За допомогою коливань краще забезпечується рівномірність розподілу введеної енергії в об'ємі апарата, особливо в апаратах з віброперемішувальними пристроями. Важливим засобом інтенсифікації є використання одиночних збурень і перехідних режимів [1]. Вібраційну дію на оброблюване середовище можна досить легко регулювати зміною амплітуд і частот, що дає змогу оптимізувати режими технологічного процесу.

Особливістю газорідинних систем є швидке затухання коливань унаслідок гальмувальної дії поверхневих сил на міжфазній поверхні, зі збільшенням об'ємного газомісту до 0,5 та зменшення швидкості поширення пружних динамічних хвиль (звуку) в гомогенному потоці газорідинної суміші за нормальних умов до мінімального значення 23 м/с [7, 19, 20]. До того ж, при зниженні тиску в системі швидкість динамічних хвиль знижується пропорційно кореню

квадратному від тиску, наприклад, зниження тиску від 10^5 Па до 10^3 Па призведе до зниження швидкості динамічних хвиль (звуку) до 2,3 м/с.

Унаслідок швидкого затухання накладати коливання доцільно не на всю газоріднину систему, а на її окремі обмежені за розміром зони. Враховуючи, що газорідинні системи внаслідок наявності в них газової фази мають пружні властивості, які рівномірно поширюються на всі зони, на системи збільшених розмірів доцільно накладати пульсаційні зміни тиску з витримкою впродовж часу, достатнього для релаксації цих змін, тобто використовувати перехідні нестационарні режими. У разі швидкого розчинення газу під час перекачування продукту трубопроводами нестационарність можна створювати змінами напрямків руху потоку або діаметрів трубопроводу.

Якщо швидкість поширення динамічної хвилі, яка обумовлюється швидкістю руху коливального органу в період наростання амплітуди коливання, перевищить швидкість звуку в газоріднинному середовищі (число Маха перевищить одиницю), утворюється ударна динамічна хвиля (стрибок ущільнення). За фронтом стрибка ущільнення різко змінюються параметри потоку газоріднинної суміші: локальна швидкість, тиск, густина, температура. Після різкої зміни параметрів відбувається їх релаксація — відновлення стану рівноваги, тривалість якого залежить від характеристик системи. Використанням стрибків ущільнення можна значно інтенсифікувати процеси абсорбції, причому швидкість руху віброгенеруючих елементів може бути на порядок нижчою від швидкості звуку в повітрі. Для створення стрибків ущільнення можна використати пульсаційні пристрої та гідротаран.

Колівання на систему можна накладати як за допомогою спеціальних вібропристроїв, так і конструктивними змінами контактних елементів, наприклад, навивкою дроту на трубчасті елементи плівкових апаратів, використанням рифлень, застосуванням зубчастих отворів у листових насадках з метою переходу до краплинно-плівкової течії, використанням віброуючих насадок, конструюванням клапанів, які вібрують при проходженні газової фази.

Оскільки будь-який параметр системи має рівноправне значення і може бути використаний для інтенсифікації процесу, то очевидно повинні бути використані й такі характеристики коливань, як форма зміни імпульсу та величина зміщення фаз. У [18, 21] показана можливість утворення додаткових складових перенесення, що виникають унаслідок коливальних змін параметрів процесу. Інтенсивність процесу визначається сумою цих складових, знак яких обумовлюється фазовим ефектом — величиною зміщення фаз між параметрами, викликаними коливаннями. Внаслідок зміщення фаз при течії рідини в трубопроводах можуть виникати пульсаційні зворотні течії, які на тільки прискорюють процеси тепломасообміну, а й знижують гідравлічний опір системи.

При вивченні акустичних коливань встановлено [22], що пульсуючі кавітаційні мікробульбашки зменшуються приблизно у 5 разів швидше, ніж збільшуються, внаслідок чого вони переміщуються, наближаючись до розташованої поблизу твердої поверхні або зближуються з сусідніми бульбашками. Зміщення фази коливань розмішених поблизу газових бульбашок змінює характер їх руху. Бульбашки, що коливаються в протифазі, відштовхуються.

Під час гідродинамічної кавітації спостерігається інтенсивне випаровування рідини у внутрішню порожнину каверни, яке пояснюється [23, 24] утворенням біля межі каверни зворотних гідродинамічних і теплових шарів з хвилеутворенням і пульсацією на поверхні поділу, внаслідок чого поверхня поділу не має чіткої межі і являє собою зону невеликої товщини, що містить дво-трифазний шар з дрібнодисперсних крапель туманоподібного середовища великої питомої поверхні і парагазу, що циркулює вздовж рідкої поверхні, тобто на межі поверхні відбувається тонко дисперсне розпилення рідини та інтенсивне тепломасоперенесення. Цими явищами можна керувати зміною параметрів утворення каверн і будови кавітатора та накладанням на систему коливань.

Певну аналогію можна провести стосовно барботажних бульбашок газорідних середовищ. Під час руху газових бульбашок у рідкій фазі відбувається випаровування рідини всередину бульбашок, внаслідок чого знижується температура поверхневого шару бульбашок і створюється тепловий потік від більш глибоких шарів рідини до цієї поверхні, який за механізмом термодифузії сприяє перенесенню до поверхні компонентів з рідкої фази. Аналогічні явища відбуваються при випаровуванні рідини у внутрішню порожнину кавітаційної каверни. Випаровування значно посилюється при відбиранні пари з каверни.

Тривалістю стадій зменшення і збільшення розмірів бульбашок, а також дифузії компонентів газу всередину бульбашок при їх розширенні і з бульбашок у рідину при зменшенні розмірів бульбашок, очевидно, можна керувати тривалістю фаз наростання й зменшення амплітуди коливань або тривалістю зростання і зниження гідростатичного тиску.

При сорбції важкорозчинних газів, коли потрібно турбулізувати переважно рідку фазу, може виявитись доцільним використання ефекту розтікання рідини при ударі об тверду поверхню. Рідина в межах плями розтікання рухається в плівці, товщина якої вимірюється десятими частками міліметра, з великою швидкістю (до 10...25 м/с). У міру розтікання рідини в плямі товщина її шару [18] залишається незмінною і внаслідок цього зі збільшенням радіуса віддалення від точки удару струменя швидкість рідини знижується і створюються умови пульсаційного відриву примежового шару. Великі градієнти швидкостей і пульсацій не зривання примежового шару інтенсифікують перемішування в плівці.

Інтенсифікації масообміну можуть сприяти періодичні пульсаційні зміни напрямку руху потоків, за допомогою яких збільшується тривалість контактування фаз. Накладання на пульсаційні зміни коливань більшої частоти також може впливати на швидкість дифузійного перенесення.

При наближенні частот вимушених коливань до частот власних коливань системи амплітуда вимушених коливань різко зростає і наближається до резонансних значень. Використання режимів з резонансними частотами є дієвим способом підвищення дії коливань на середовище, проте при цьому зростають динамічні навантаження на будівельні конструкції і фундаменти, тому на практиці використовують частоти близькі до резонансних. У такому разі переважаюча частка витраченої на генерацію коливань енергії спрямовується на інтенсифікацію процесу, пов'язану з подоланням сил тертя внаслідок зростання інтенсивності відносного руху рідкої і газової фаз, а решта —

витрачається на дисипацію, пов'язану з перетворенням енергії мікромасштабних пульсацій у теплоту.

Значна інтенсифікація сорбційних процесів за допомогою накладання коливальних, очевидно, не передбачається, оскільки доступні пропозиції дослідників, що лежать на поверхні явищ, вже по можливості впроваджені, а використання додатково встановлених ефектів вимагає все більших ускладнень. До того ж, практично в усіх описаних типах сорбційних апаратів цілеспрямовано або спонтанно вже використовуються вібраційні впливи, причому спонтанні вібраційно-коливальні рухи відповідають власним (резонансним) коливанням систем або їх окремих ділянок, тому до подальшого накладання коливальних рухів потрібно підходити дуже зважено, щоб це не призводило до завишених витрат енергії.

3. Розроблення зручних, принципово нових конструкцій високопродуктивних сорбційних апаратів вимагає застосування нових фізичних явищ і ефектів і суміщення їх з уже відомими. При суміщенні явищ різної природи, наприклад, механічних коливальних зі змінними амплітудами, частотами та зміщеними фазами з такими змінюваними параметрами системи, як температура, тиск, витрати середовищ, напруженість фізичних полів, можуть виникати нові співвідношення інтенсивностей взаємодії контактуючих середовищ і навіть створюватись близькі до резонансних режими, які суттєво прискорюють процеси міжфазного перенесення.

Складність процесів, що проявляються при взаємодії явищ різної фізичної природи, і відсутність теорії їх перебігу вимагає багатогранних і глибоких досліджень кожного окремого випадку. Використовуючи потрібну аналогію Рейнольдса стосовно перенесення кількості руху, теплоти і маси, можна прогнозувати, що коли якийсь фактор інтенсифікує один із видів названого перенесення, то він аналогічно діє і на інші процеси перенесення.

У [18, 21] сформульовано два правила для встановлення ефекту посилення основного потоку перенесення за допомогою додатково діючого фізичного явища:

- перше (необхідне) — для посилення основного потоку перенесення взаємодією або накладанням фізичного поля іншої природи необхідно, але недостатньою умовою є наявність функціональної залежності (зв'язку) між параметрами градієнта рушійної сили поля, що накладається, і параметром градієнта основного потоку;

- друге (достатнє) — для того, щоб при накладанні двох фізичних явищ відбулось посилення основного потоку перенесення, достатньо, щоб зв'язок між параметрами рушійної сили поля, що накладається, і основних полів був прямий, тобто зі збільшенням параметра градієнта основного потоку збільшувався б і параметр градієнта поля, що накладається. Обидва правила дійсні, якщо складові параметрів поля, що накладається, утворюють лише градієнти за параметрами поля основного потоку.

Для пошуку ефектів взаємного посилення або гальмування перенесення у [18, 21] розглянуто можливість сумісної дії комбінації двох різних фізичних явищ: температури, концентрації, тиску, щільності потоків речовини, теплоти, електричного струму та потоків дифузійного перенесення речовини в магнітних і електричних полях.

Наведені два правила мають орієнтовний характер і дозволяють лише полегшити пошук можливих ефектів взаємодії двох явищ. Для більш глибокого пошуку способів інтенсифікації слід використовувати термодинаміку незворотних процесів і теорію перенесення Онсагера [1].

Висновки

Перспективи розробки і впровадження нових режимних способів інтенсифікації процесів абсорбції на найближчі кілька десятиріч оцінюються на рівні не вище 30...40 % і вимагають значних економічних витрат. Дієвим способом інтенсифікації на даний час є правильне застосування вже відомих апаратів з контактними пристроями, характеристики яких найкраще відповідають технологічним вимогам, та суміщення технологічних і режимних способів.

Література

1. *Інтенсифікація* масообмінних процесів в харчових і мікробіологічних технологіях / А.І. Соколенко, О.Ю. Шевченко, В.А. Піддубний. — К.: ПП Люксар, 2007. — 443 с.
2. *Анистратенко В.А.* Прямоточные контактные устройства брагоректификационных установок. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. — 159 с.
3. *Рамм В.М.* Абсорбция газов. — М., Химия, 1976. — 665 с.
4. *Оборудование для санитарной очистки газов: Справочник / И.Е. Кузнецов, К.И. Шмат, С.И. Кузнецов; Под общей ред. д-ра техн. наук И.Е.Кузнецова.* — К.: Техника, 1989. — 304 с.
5. *Слободяник И.П.* Повышение эффективности массообмена струйных тарелок больших диаметров. // Тезисы докладов VI Всесоюз. конф. по теории и практике ректификации. — Северодонецк, 1991. — С. 200—202.
6. *Григорян Л.Г., Шафранский Е.Л., Прохоренко Ф.Ф. и др.* Проблемы и перспективы ректификации в нефтепереработке // Тезисы докладов VI Всесоюз. конфер. по теории и практике ректификации. — Северодонецк, 1991. — С. 23—29.
7. *Марценюк О.С.* Науково-технічні основи інтенсифікації масообміну в газорідних апаратах з регулярними насадками. Дис. ... докт. техн. наук: 05.18.2012 / Національний університет харчових технологій. — К., 2006. — 429 с.
8. *Комиссаров Ю.А.* Основы конструирования массообменных аппаратов // Тезисы докладов VI Всесоюз. конфер. по теории и практике ректификации. — Северодонецк, 1991. — С. 217—219.
9. *Лебедев Ю.Н., Мамонтов Г.В.* Возможности и пути совершенствования массообменных колонных аппаратов // Тезисы докладов VI Всесоюз. конфер. по теории и практике ректификации. — Северодонецк, 1991. — С. 214—216.
10. *Вольшионок Ю.З., Свеженцев В.С.* Колонные массообменные аппараты с клапанными балластными тарелками // Труды ВНИИНЕФТЕМАШ. — 1982. — С. 19.
11. *Бюллетень* фирмы Глитч (США) № 70—07.
12. *Mk Whirter J.R., Cannon M.R.* Controlled cycling distillation // *Industrial and Engineering Chemistry*. — 1961. — # 53. — P. 632—634.
13. *Патент* на винахід 81700 Україна, МПК B01D 3/30. Массообмінний контактний пристрій / Б.В. Малета, О.В. Малета. — Опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2.
14. *United States Patent US 8158073 B2, Mass Exchange Contact Device / B. Maleta, O. Maleta.* PCT/UA 2007/000021 on Apr. 3, 2007; Prior Publication Date US 2010/0221156A1 Sep. 2, 2010; Date of Patent Apr. 17, 2012
15. *Understanding process intensification in cyclic distillation systems / B. Maleta, A. Kiss, V. Taran, V. Maleta // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification (USA).* — July 2011. — Volume 50, Issue 7. — P. 655—664.
16. *Булій Ю.В., Шиян П.Л., Дмитрук П.А., Малигін А.І.* Іноваційна технологія вилучення та концентрування органічних домішок спирту в режимі керованої ректифікації // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2013. — № 43. — С. 38—50.

17. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и конструирования. — 3-е изд., перераб. М.: Химия, 1978. — 280 с.
18. Интенсификация технологических процессов пищевых производств / И.М. Федоткин, Б.Н. Жарик, Б.И. Погоржельский. — К.: Техніка, 1984. — 176 с.
19. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. Пер. с англ. / Под ред. И.Т. Аладьева. — М.: Мир, 1972. — 440 с.
20. Марценюк О.С., Дубінін О.О., Тахістова Г.О. Коливання в гетерогенних системах // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — К.: Національний університет харчових технологій. — 2002. — № 12 (Додаток) — 43 с.
21. Федоткин И.М. Интенсификация технологических процессов. — К.: Вища школа, 1979. — 342 с.
22. Агранат Б.А., Баширов В.И., Китайгородский Ю.И. Ультразвуковая очистка // В кн.: Физика и техника мощного ультразвука. Т. 3: Физические основы ультразвуковой технологии. — М.: Наука, 1970. — Т. 3. — С. 165—252.
23. Федоткин И.М., Гульий И.С. Кавитация. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. — К.: Полиграфкнига, 1997. — 839 с.
24. Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості / О.А. Литвиненко, О.І. Некоз, П.М. Немирович, З. Кондрат. — К.: РВЦ УДУХТ, 1999. — 87 с.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ РЕЖИМНЫМИ СПОСОБАМИ

А.С. Марценюк

Національний університет пищевых технологий

Режимные способы интенсификации процессов абсорбции, в отличие от стационарных технологических способов, основаны на нарушении стационарности процессов внесением в систему отдельных или повторяемых возмущений ее параметров, изменяющих фазовое равновесие. Во время последующего недлительного восстановления фазового равновесия на новом термодинамическом уровне в системе происходят интенсивные энергетические превращения, сопровождающиеся ускорением тепломассообменных процессов. Основными направлениями режимной интенсификации процессов является разработка новых и усовершенствование существующих аппаратных решений со спонтанным проявлением колебательно-волновых явлений, непосредственное наложение колебаний и пульсаций на рабочие системы и их отдельные элементы, а также совмещение колебательных явлений разной физической природы. Реализация этих направлений требует глубоких и достаточно длительных исследований со значительными экономическими затратами, поэтому в ближайшее время действенным способом интенсификации процессов абсорбции будет использование известных конструктивных решений, наиболее полно отвечающих требованиям проведения процесса.

Ключевые слова: интенсификация процессов абсорбции, колебательно-волновые явления, переходные режимы.