

**В.А. ПІДДУБНИЙ**, доктор технічних наук  
**О.А. БІЛИК**, кандидат технічних наук  
Національний університет харчових технологій

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ МАСООБМІНИХ ПРОЦЕСІВ В ГАЗОРІДИННИХ СЕРЕДОВИЩАХ

*Виконано аналіз сучасних методів інтенсифікації масообміну в газорідних системах, наведено схеми-класифікації впливів на середовища.*

**Ключові слова:** інтенсифікація, масообмін, процеси, середовища, сорбція, коаліценсія.

*Выполнен анализ современных методов интенсификации массообмена в газожидкостных системах, приведены схемы-классификации воздействий на среды.*

**Ключевые слова:** интенсификация, массообмен, процессы, среды, сорбция, коалиценсия.

Завданням цього дослідження обрано аналіз сучасних методів інтенсифікації масообмінних процесів в газорідних середовищах, характерних для харчової, мікробіологічної і фармацевтичної промисловостей [1-5]. . .

Газорідні системи у значній кількості технологій складають основну частину культуральних середовищ. В кінцевому результаті швидкості реакцій життєвих процесів залежать від швидкості подавання живильних речовин у сполученні зі швидкістю видалення продуктів життєдіяльності мікроорганізмів. Важливим чинником таких процесів є кисень і гази приймають участь в процесах синтезу лише у випадку, коли вони присутні в розчиненому стані у водному розчині.

Щодо існування біологічних систем слід відзначити важливість форм системи вторинного обміну і системи циркуляції, які визначають наявність різниці концентрацій речовин в різних точках організму і системи. В якійсь мірі аналогічні явища мають місце при вирощуванні культур клітин, в умовах мікробіологічного синтезу одноклітинних мікроорганізмів в середовищах низької в'язкості тощо.

Деякі процеси промислового бродіння відбуваються виключно в анаеробних умовах, однак відношення до кисню з боку мікроорганізмів суттєво

змінюється на різних стадіях процесів. Так на ранніх стадіях спиртового виробництва аерація має позитивні впливи, оскільки сприяє швидкому нарощуванню біомаси, аналогічно аерація пивного суслу на початку бродіння суттєво скорочує лаг-фазу. До речі, це єдиний випадок в технології виробництва пива, у якому дозволеною і бажаною є присутність кисню. На більш пізніх стадіях з метою уникнення зайвого окислення субстрату аерація припиняється, на поверхні середовища утворюється газова подушка з діоксиду вуглецю.

В умовах анаеробного бродіння синтезований  $\text{CO}_2$  утворює газові бульбашки, які приймають участь у створенні циркуляційних потоків і забезпечують вирівнювання концентрацій речовин мікроорганізмів у об'ємі апарата. Очевидно, що швидкість зброджування визначається фізіологічними властивостями мікрофлори і параметрами середовища, а спроби інтенсифікувати такі процеси за рахунок механічного перемішування успіху не мали. Головною причиною цієї невдачі є відсутність аналізу щодо лімітуючих факторів масообміну в системі середовище — клітина. З невдалих спроб інтенсифікації прирощування біомаси слід зробити висновок про те, що не масообмін між середовищем — клітина є тому причиною.

Розповсюдженою є гіпотеза про те, що причиною невдачі є малі розміри клітин і питома вага, яка мало відрізняється від такого ж показника середовища. В результаті не вдається збільшити швидкості відносного руху клітин і середовища. Переміщення рідини у мікрзоні має головним чином ламінарний характер, який не вдається змінити шляхом помірної зміни швидкості.

Звичайно в робочих умовах бродильне середовище вміщує по кілька мільйонів клітин у одному мілілітрі, а тому відстань між молекулами субстрату дуже мала, а адсорбувальна поверхня клітин порівняно велика.

Розвиток аеробної ферментації, виробництво хлібопекарських і кормових дріжджів, очищення стічних вод, розвиток рибного господарства тощо обумовили використання повітря для створення газорідних систем з інтенсивним масообміном. У більшості випадків використовують повітря з початковим тиском, близьким до атмосферного. Проте існують вказівки і на те, що підвищена концентрація розчиненого кисню може бути токсичною для мікроорганізмів.

Крім того, азот і невикористаний кисень відіграють важливу роль у десорбції  $\text{CO}_2$ , що попереджує його накопичення в межах концентрацій інгібування.

Перехід від анаеробних до аеробних умов культивування мікроорганізмів вимагає точного технічного забезпечення засобів контролю, оскільки обмеження газообміну може змінити умови нарощування біомаси багатьох мікроорганізмів і зробити їх анаеробами і навпаки. Саме це викликає труднощі масштабних переходів на промислові зразки обладнання і ці труднощі стосуються процесів аерації, оцінки їх інтенсивності і ефективності, інтенсифікації тощо.

Оцінка придатності систем, очевидно, повинна ґрунтуватися на балансі доставки кисню в розчиненому вигляді у культуральні середовища і споживання його біомасою мікроорганізмів.

Накопичені дані щодо розчинності газів в основному стосуються води, проте існує можливість введення певних поправок на особливості культуральних середовищ.

Розчинені речовини також знижують розчинність кисню. Так для морської води з вмістом солей 3,4 % розчинність кисню складає біля 80 % розчинності у чистій воді. Інші речовини дають подібні ефекти, а моделювання їх впливів здійснюється на молярній основі.

Окрім чисто хімічних впливів на розчинність кисню слід врахувати також зростання осмотичних тисків солевмістких, а також цукровмістких розчинів, хоча їх дія швидше зорієнтована на мікроорганізми. У зв'язку з необхідністю обмеження впливів на розчинність газів і осмотичних стресів щодо мікроорганізмів у промисловості відмовляються від завантаження живильних речовин у середовище на

весь цикл роботи і переходять на «приточне» живлення, розраховане у відповідності з динамікою приросту біомаси.

Відомо, що стосовно процесів ферментації існує критична концентрація лімітуючого субстрату, яка часто має незначну величину. Це ж положення стосується і кисню.

Абсорбційні властивості води і її розчинів визначаються дипольною будовою молекул першої, завдяки якій вона має унікальну здатність утворювати багатомолекулярні сполуки, що нагадують рідкі кристали. Різні структури утворюються завдяки і в залежності від наявності у природній воді певної кількості молекул з короткими диполями. В разі дії на воду змінних електричних і магнітних полів або радіоактивних випромінювань має місце руйнування короткодипольних молекул води, внаслідок чого змінюється її структура і деякі властивості на мікрорівні.

Електромагнітне та іонізуюче оброблення води можуть сприяти інтенсифікації сорбційних процесів. Проте руйнування короткодипольних молекул перетворює воду у «мертву» і шкідливу для біологічних систем.

На сорбційні властивості води, в тому числі і на розчинність в ній газів, впливають її лужно-кислотні характеристики. За абсорбції водою малорозчинних газів відношення кількості молекул газу до кількості молекул води невелика і молекули газу розміщуються переважно на межах структурних утворень води без проникнення всередину і руйнування останніх. Такий процес нагадує адсорбцію.

На відміну від цього молекули добре розчинних газів проникають всередину молекулярних структур води, перебудовують їх і створюють нові комплекси із слабкими хімічними зв'язками.

Для динамічних газорідних систем важливою складовою впливу є явища коаліценсії бульбашок, оскільки вони можуть помітно впливати на величину міжфазної поверхні. У зв'язку з цим існує умовний поділ середовищ і до групи А відносять рідини, у яких бульбашки мало коалісцують. До таких рідин відносяться чисті органічні речовини, прості ефіри, тетрахлорциклогексан, водні розчини гідрофільних з'єднань, зокрема спирти, в'язкі рідини, концентровані сольові розчини. В рідинах групи В бульбашки газів легко коалісцують. До них відносяться дистильована і водопровідна вода, розбавлені сольові розчини.

З точки зору інтересів рівня дисперсності газової фази у рідинному середовищі має швидкість введення їх у контактування за барботажного режиму.

В значній кількості досліджень, що стосуються інтенсифікації розчинення кисню, наводяться дані щодо пошуків взаємозв'язків між геометрією барботерів, отворів, швидкостями підведеної газової фази, рівнем диспергування останньої, та щодо моделювання процесів аерації.

Спроби використання барботажних елементів з кераміки, металокераміки, на основі спечених матеріалів тощо привели до висновку про недоцільність організації аераційних систем промислових апаратів на їх основі. Подібний висновок ґрунтується на тому, що для таких локальних аераційних елементів складно забезпечити задані режими подавання повітря і рекомендовані швидкості введення в контакт газової і рідинної фаз.

Після утворення поверхні подлу фаз має місце стабілізація швидкості піднімання газових бульбашок і така стабілізація досягається на висоті 0,15-0,25 м.

Важливим показником двофазної системи є її утримувальна здатність по газовій фазі, яка залежить від рівня аерації і відносної швидкості газової фази. У свою чергу утримувальна здатність за інших рівних умов визначає величину поверхні масопередавання. Очевидно, що гідродинамічний режим, який характеризується фізико-хімічними властивостями середовища і газової фази та рівнем енергетичного забезпечення, є параметром впливу на інтенсивність масообміну.

У зв'язку з цим барботажні системи доповнюють різними перемішувальними пристроями. Досвід промисловості свідчить про ефективність використання потужних мішалок, які підвищують рівень турбулентності. Саме турбулентність впливає на структуру висхідного потоку газової фази. Помічено, що кращі результати досягаються в крупногабаритних промислових установках, а масштабні переходи потребують додаткових уточнень.

Ступінь дисперсності газової фази за інших рівних умов визначається величиною питомої енергії, яка вводиться в середовище за рахунок механічного перемішування культуральних середовищ.

За сучасними уявленнями методи інтенсифікації сорбційних та інших масообмінних процесів поділяють на конструктивні, механічні, фізичні, комплексні та технологічні. Вибір типу масообмінного пристрою залежить від особливостей технологічного процесу, його масштабів, необхідної інтенсивності, кількісних показників тощо. Наприклад, відомо, що до числа найбільш інтенсивних по масообміну апаратів відносяться ежекційні контактні пристрої. Оскільки їх робота ґрунтується на використанні однофазних або двофазних середовищ, то поруч з виконанням функцій підвищення тиску, транспортування середовищ тощо мають місце інтенсивний тепло- і масообмін.

Однак для вирішення задачі забезпечення киснем культуральних середовищ апаратів великої місткості ежекційні пристрої мало придатні. Режимні методи зорієнтовані на зміну гідродинамічних умов контактування фаз, використання псевдорозрідження, створення вихрових рухів, використання перехідних процесів, елементів дискретно-імпульсних технологій. Помічено існування потрійної аналогії, за якою зростання рівня гідроди-

намічної взаємодії супроводжується інтенсифікацією тепло- і масообміну. Однак за певних умов може мати місце втрата ефективності таких систем за рахунок дисипативних явищ. Спроби зовнішнього втручання, в тому числі за рахунок використання локальних зон енерговведення, також повинні враховувати розсіювання енергії в двофазних середовищах. Проте у випадку правильного вибору і упорядкування форми обтічних тіл, коли турбулізації підлягають приміжові шари потоків, можливе суттєве прискорення масообмінних процесів без наростання дисипативних явищ.

Відступ від усталених режимів і стану двомасових систем приводить до переорієнтації циркуляційних контурів, збільшення утримувальної здатності по газовій фазі. У значних об'ємах середовищ з барботажною системою аерації можливо є регулярна зміна зон різної інтенсивності повітропостачання, що також забезпечує зменшення швидкості газорідинної суміші в циркуляційних контурах і обмежує швидкість «винесення» газової фази. Накладання пульсацій, вібрацій порушує рівномірність перенесення маси, спричиняє екстремальні зміни супровідних фізичних параметрів (концентрацій, тисків, температур).

Підвищення тиску, у тому числі і за рахунок зміни геометричних параметрів ізооб'ємних апаратів приводить до підвищення русійних факторів масообміну.

В залежності від частоти збурень розрізняють коливання циклічні, низькочастотні, високочастотні (акустичні та ультразвукові), імпульсні. За масштабом рівня дії коливання можливо здійснити на молекулярному рівні, на рівні контактних пристроїв, апаратів, схем.

Відомо, що найбільш ефективна взаємодія фаз має місце за резонансних коливань. Проте вибір частоти, що відповідає можливості досягнення резонансних режимів, досягається лише в частковому діапазоні розмірів бульбашок газової фази.

Звичайно, що раціональне використання енергетичного потенціалу вхідного газового потоку пов'язують з клапанами, які в режимі барботажу генерують коливання з частотою 5-20 с<sup>-1</sup>. Однак ефективність цих пристроїв мала і пояснити це слід обмеженими швидкісними напорами газової фази. Технічні засоби впливів стосовно різних геометричних параметрів контактних пристроїв суттєво відмінні. Те, що задовольняє, наприклад, тарільчасті контактні пристрої, неефективне у використанні в об'ємних газорідинних реакторах і навпаки. Стосовно промислових апаратів знаходять використання контактні пристрої з кільцевою резонуючою камерою. До відомих конструкцій відносяться генератори Гартмана і Гальтона, які працюють за відносно високих перепадів тисків.

У дослідженні [6], присвяченому визначенню мінімального швидкісного напору газової фази, за

якого відбувається розрив вільної поверхні шару рідини, показано, що гідродинамічними засобами можливо зменшити винесення кисню у вільний простір, тобто підвищити ефективність технологічного процесу, затримуючи максимальну кількість дисперсної фази в об'ємі апарата.

Локалізація зон взаємодії потоків газу і рідини з метою інтенсифікації масообміну спрямовується на одержання кавітаційних ефектів. Набуває поширення метод кавітаційного оброблення для одержання стійких емульсій, нерозчинних одна в одній рідині, наприклад, для приготування вапняного молока і оброблення ним дифузійного соку.

**Висновки.** Виконаний аналіз літературних джерел і сучасного стану процесів, що мають місце в харчовій, мікробіологічній і ферментній промисловостях, дозволяє відмітити наступне.

Співіснування в системах газової і рідиної фаз пов'язано з утворенням циркуляційних контурів, що є проявом у дії Архімедових сил. Відносний рух фаз є фактором інтенсифікації масообміну. В певних межах цей фактор інтенсифікації можливо задіяти за рахунок рівня дисперсності газової фази, однак «калібрування» газових бульбашок досягти відносно складно у зв'язку з неможливістю впливу на фізико-хімічні властивості компонентів середовищ.

Абсолютна швидкість газової фази в рідинній визначається сумою швидкостей відносного руху і швидкістю газорідинної суміші в циркуляційних

контурах. Остання не впливає на масообмін на границі поділу фаз і супроводжується дисипативними енергетичними втратами.

Важливим елементом інтенсифікації масообмінних процесів є накопичення енергетичного потенціалу середовищ.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Басок Б.И., Шурчкова Ю.А. Вакуумная гомогенизация водно-жировых эмульсий // Докл. Международной конф. «Тепло- и массообмена в технологических процессах». — Юрмала, 1991. — С. 250.
2. Беккер М.Е. Введение в биотехнологию. — М.: Пищевая пром-сть. — 1978. с. 231.
3. Гандзюк М.П. Совершенствование процесса культивирования хлебопекарных дрожжей и его аппаратного оформления. — Дисс. на соиск. ученой ст. д.т.н., К. — 1984. — 485 с.
4. Дубінін О.О., Переяславцев О.М., Тахістова Г.О. Визначення динамічних параметрів висхідних потоків газорідинної суміші у шарі рідини // Харчова промисловість. — К.: НУХТ, — 2003. — № 3. — с. 92-94.
5. Дубінін О.О., Переяславцев О.М., Тахістова Г.О. Визначення швидкості внутрішньої циркуляції робочого середовища в ерліфтних апаратах // Харчова промисловість. — К.: НУХТ, — 2003. — № 2. с. 91-92.
6. Тахістова Г.О., Аністратенко В.О., Дубінін О.О. Аналітичне визначення мінімального швидкісного напору газової фази, при якому відбувається розрив вільної поверхні шару рідини // Наукові праці УДУХТ. — К.: УДУХТ. — 1998. — № 4. — С. 20-21.

*Одержана редколегією 04.07.08 р.*