

УДК 66.021.3:664

REGIME METHODS OF THE MASS TRANSFER INTENSIFICATION

A. Sokolenko, A. Shevchenko, A. Martseniuk

National University of Food Technologies

Key words:

*The intensification of mass transfer
Transitive regime
Sharp pressure decrease
Creation of underpressure
Cavitation
A discrete-pulse supply of energy*

ABSTRACT

The regime methods of mass transfer intensification for food technology are considered, to which single or repeated use of transient regimes is related, by the change of hydrodynamic conditions of motion of the environments, sharp decline of pressure, creation of rarefaction, cavitation and discretely-impulsive supply of energy. Regime ways of intensification are based on the existence of indissoluble communications between all parameters of technological systems owing to what change of any parameter of the system leads to the reorganization of all others parameters and to the acceleration of the transfer processes. Single and repeated creation of transfer regimes and cavitation allow using the internal energy of technological systems more completely. The discrete-pulse supply of energy based on the substantial increase repeated with the big frequency and subsequent sharp decrease of pressure requires an intensive supply of external energy.

Article history:

Received 14.01.2016
Received in revised form
01.02.2016
Accepted 19.02.2016

Corresponding author:

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

РЕЖИМНІ СПОСОБИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ МАСООБМІНУ

A.I. Соколенко, O.I.Y. Шевченко, O.C. Марценюк

Національний університет харчових технологій

З урахуванням специфіки харчових виробництв у статті проаналізовано режимні способи інтенсифікації масообміну, до яких віднесене одно- або багаторазове використання перехідних режимів за допомогою зміни гідродинамічних умов руху середовищ, різкого зниження тиску, створення розрідження, кавітації та дискретно-імпульсного підведення енергії. Режимні способи інтенсифікації базуються на існуванні нерозривних зв'язків між усіма параметрами технологічних систем, унаслідок чого зміна будь-якого параметра системи призводить до перебудови всіх інших її параметрів і прискорення процесів перенесення. Одно- і кількарразове створення перехідних режимів і кавітація надають можливість найповніше використати внутрішню енергію технологічних систем. Дискретно-імпульсне підведення енергії, основане на повторюваному з великою частотою значному підвищенні і подальшому різкому зниженні тиску, вимагає інтенсивного підведення зовнішньої енергії.

Ключові слова: інтенсифікація масообміну, перехідні режими, різке зниження тиску, створення розрідження, кавітація, дискретно-імпульсне підведення енергії.

Постановка проблеми. 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 енергію чи масу, проте можна, за рахунок збільшення швидкості перебігу процесів, зменшити розміри апаратів, теплові і продуктові втрати, капітальні й експлуатаційні витрати.

Є два основні способи інтенсифікації безперервних процесів: технологічні і режимні.

Технологічні способи полягають у створенні і підтриманні більш високих рушійних сил (перепадів тисків, температур, концентрацій між вхідними й вихідними потоками) і зниженні опорів процесам перенесення у стаціонарних процесах.

Режимні способи інтенсифікації передбачають порушення стаціонарності процесів внесенням у систему збурень певних її параметрів за допомогою механічних (вібрації частин апаратів, пульсації середовищ, зміна інтенсивності перемішування) або фізичних (електричні і магнітні поля, акустичні коливання) способів впливу.

Застосування режимних способів базується на існуванні нерозривних зв'язків між усіма параметрами технологічних систем, включаючи і конструкційні параметри, тому зміна будь-якого параметра системи, згідно з принципом Ле-Шательє, призводить до перебудови всіх інших параметрів і встановлення їх на інших значеннях, які відповідають новим умовам рівноваги системи. Під час нетривалого встановлення рівноваги на новому термодинамічному рівні у системі відбуваються інтенсивні енергетичні перетворення, які супроводжуються прискореним перебігом процесів перенесення.

Наприклад, зміна температури проведення абсорбції призведе до зміни тиску, густини і в'язкості продуктів, поверхневого натягу, хімічних і енергетичних потенціалів, закономірностей фазової рівноваги, об'єму системи тощо, а також до зміни характеру течії середовища, турбулізації потоків і, як наслідок, до посилення тепло- та масообміну в період переходу параметрів до нових значень. Обмежене в часі перебування системи у стані інтенсивної перебудови її параметрів після внесення збурень є перехідним станом її функціонування [1]. Режимні способи інтенсифікації тепломасообміну базуються на використанні перехідних станів.

Збурення систем відбувається внаслідок взаємодії керуючої сили і сил інерційного опору, причому кожна система характеризується своєю інерційністю і пружністю, тому після першого імпульсу зміни параметрів системи до нових значень відбувається часткове повернення цих параметрів упродовж певного часу до початкових значень. Повертаючись до початкових значень, параметри системи за інерцією минають рівноважні значення, досягають максимальних зворотних амплітуд і знову рухаються в напрямку початкових змін, тобто відбувається коливальний процес. Отже, перехідні стани нерозривно пов'язані з коливальними явищами, тому, накладаючи на систему коливання, можна створювати і підтримувати перехідні режими.

У фазі розгону коливання енергія збурюючого параметра витрачається на роботу, пов'язану з подоланням сил інерційного опору і зростанням кінетичної енергії системи. У фазі досить рівномірної зміни параметрів (проходження

амплітуди поблизу точки рівноваги) має місце приблизна рівновага діючих сил, а кінетична енергія витрачається лише частково переважно у формі дисипативних явищ, пов'язаних з нагріванням середовища. У фазі гальмування кінетична енергія переходить у потенціальну.

Для створення первинних коливань можна використовувати будь-які параметри системи, проте в реальних умовах зручно створювати баричні та механічні коливання, які найбільше турбулізують потоки і прискорюють тепломасообмін. Ступінь інтенсифікації процесів перенесення обумовлюється амплітудою і частотою коливань, однак існує певна межа інтенсифікації, оскільки зростання рівня турбулентності призводить до більш інтенсивного збільшення дисипативних втрат.

Інтенсифікація процесів перенесення вимагає додаткового введення у систему енергії: механічної (кінетичної і потенціальної), теплової, електричної, магнітної, хімічної, поверхневої (енергії поверхневого натягу). Енергія витрачається на підтримання перехідних явищ, причому кожна форма енергії може перетворюватись в іншу, зокрема в енергію механічних пульсацій. Перетворення форм енергії в інші і в теплову відбувається без втрат, за винятком теплової енергії, яка згідно з другим законом термодинаміки перетворюється в інші форми лише частково. Оскільки тепла енергія на даний час залишається основним першоджерелом енергії, то слід дотримуватися мінімальних її втрат, викликаних енергетичними перетвореннями.

До основних режимних способів інтенсифікації масообміну на основі використання перехідних станів відносять перехідні режими, технології різкого зниження тиску, створення розрідження, кавітацію, дискретно-імпульсні технології.

Мета дослідження. З урахуванням специфіки харчових виробництв проаналізувати режимні способи інтенсифікації масообміну, зокрема одно- або багаторазове використання перехідних режимів за допомогою зміни гідродинамічних умов руху середовищ, різкого зниження тиску, створення розрідження, кавітації та дискретно-імпульсного підведення енергії.

Викладення основного матеріалу. Інтенсифікація процесів перенесення у перехідних станах досягається не за рахунок зовнішнього джерела енергії, хоч на внесення збурень теж витрачається енергія, а переважно внаслідок вивільнення раніше накопиченого внутрішнього енергетичного потенціалу, який досить рівномірно розподілений у системі, забезпечуючи при цьому її однорідну активацію [1]. Вивільнення великої кількості енергії впродовж обмеженого часу перехідних станів сприяє значній інтенсифікації технологічних процесів. Вплив перехідних станів на середовище оцінюють за кількістю виділеної питомої (віднесеної до одиниці маси) енергії, кДж/кг.

Перехідні режими [1] у газорідних системах найпростіше створювати за допомогою змін тиску, наприклад, при аерації (розчиненні кисню під час барботажу повітря) культурального середовища, що знаходиться в закритому циліндричному апараті. Збільшення зовнішнього тиску призводить до першої стадії перехідного процесу — стиснення середовища зі зміною всіх параметрів системи, серед яких найбільш помітними є зменшення об'єму середовища і висоти газорідного шару. Зменшення об'єму середовища відбувається внаслідок стиснення газової фази.

Тиск поширюється на весь об'єм системи, тому кожна газова бульбашка зазнає стиснення і її розміри зменшуються. Бульбашки менших розмірів спливають з меншими швидкостями відносно рідкої фази, частоти власних коливань менших бульбашок зростають, траєкторії їх спливання стають більш прямолінійними, що змінює швидкість оновлення поверхні контакту фаз. Зростання тиску всередині бульбашок супроводжується зміною розчинності кисню й азоту і перерозподілом співвідношень фазової рівноваги.

Зменшення загального об'єму системи супроводжується рухом пристінних шарів середовища відносно стінок апарата, причому швидкість відносного руху більша у верхній частині апарата, що впливає на пристінну й загальну циркуляцію середовища. Під впливом тиску збільшується загальна густина і зменшується об'ємний газовміст (відношення об'єму газової фази до загального об'єму системи) продукту, що призводить до зміни пружності і частоти власних коливань системи.

Зростання тиску супроводжується частковим нагріванням системи, що змінює густину і в'язкість її складових, величину поверхневого натягу, підвищує внутрішню енергію системи. Внаслідок пружних властивостей системи максимальне зростання тиску на момент найбільшої деформації досягає майже подвійного значення від величини зміни керуючого початкового збільшення тиску.

Імпульсна зміна тиску обумовлює імпульсний режим зміни всіх інших параметрів, що призводить до додаткової турбулізації потоків та інтенсифікації масообміну. Збільшення тривалості імпульсної зміни тиску знижує інтенсивність перехідних явищ і при досить повільних змінах тиску перехідні режими взагалі не утворюються.

Після досягнення максимальних збурень під впливом імпульсного збільшення тиску система внаслідок пружних властивостей переходить у другу стадію перехідного режиму, пов'язану зі зниженням тиску і розширенням середовища. Зміни середовища, характерні для першої стадії перехідного режиму, відбуваються в протилежному напрямку, але не в симетричному відображенні. Турбулізація потоку не спадає, а посилюється. Несиметричність змін пояснюється різними початковими й граничними умовами першої і другої стадій перехідного режиму, тому тривалість першої й другої стадій на момент досягнення максимальних значень параметрів різна.

Флуктуації зовнішнього тиску проявляються в усьому об'ємі газорідних середовищ, а не в окремих його зонах, і впливають як на газову, так і на рідку фазу. Інтенсифікація масообміну обумовлена головним чином турбулізацією рідких плівок на поверхні поділу рідкої і газової фаз, що важливо для масообміну у випадку важкорозчинних газів. Зміни об'єму і форм бульбашок посилюють перемішування всередині бульбашок, що сприяє абсорбції легко-розчинних газів. Коливання тиску супроводжується явищами об'єднання та подрібнення газових бульбашок і, відповідно, змінами поверхні контакту фаз та енергетичних співвідношень. Отже, флуктуації зовнішніх тисків є універсальним засобом інтенсифікації масообміну в газорідних середовищах як для важко-, так і для легко-розчинних газів.

Найбільший імпульсний вплив на середовище відповідає резонансній частоті, яка може бути розрахована за теоретично встановленою співробітниками кафедри теоретичної механіки і пакувальної техніки НУХТ формулою:

$$f = \frac{P_2 F}{3\pi \sqrt{u_1 m_{\text{пр}} (P_2 - P_1)}},$$

де F — площа перерізу циліндричної частини апарата, на яку діє зовнішній тиск; $m_{\text{пр}}$ — приведена маса газорідинної системи, яка в розглянутому випадку дорівнює третині загальної маси газорідинної системи.

Робота в резонансних режимах може призвести до руйнування обладнання, тому рекомендована частота зовнішніх збурень повинна відрізнятись від значень резонансної частоти приблизно на 10 %.

Один із варіантів апарата з використанням пульсацій тиску подано на рис. 1. Апарат призначений для культивування мікроорганізмів і працює таким чином: у нижню частину корпусу 1 апарата з охолоджувальною оболонкою 2 подається стиснене повітря через барботер 3, який забезпечує рівномірний розподіл маленьких бульбашок повітря у поперечному перерізі апарата. Відвідний патрубок 4 для газу оснащений шиббером 5 і привідним механізмом 6, який за допомогою датчика 7 дозволяє повністю або частково з регульованою частотою перекривати відведення газу, забезпечуючи різні режими зміни тиску в газовому просторі апарата.

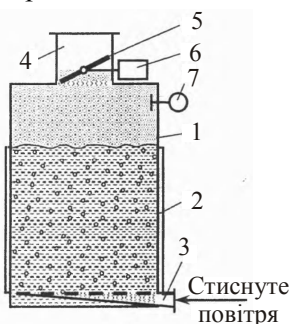


Рис. 1. Апарат для культивування мікроорганізмів з використанням пульсацій тиску

Датчик 7 дозволяє враховувати інерційні властивості системи при різних рівнях заповнення апарата і різних об'ємних газовмістах середовища. У стадії стиснення до середовища підводиться енергія стисненого повітря, а у стадії розширення потенціальна енергія стисненого повітря перетворюється в кінетичну. Оптимальна частота коливань тиску дозволяє забезпечити інтенсивну абсорбцію кисню культуральним середовищем в умовах безперервних перехідних режимів. Вихід з ладу обладнання внаслідок резонансних коливань усувається за допомогою часткового перекривання шиббером відвідного патрубка.

Для організації перехідних режимів на основі зміни гідродинамічних умов руху середовищ використовують розширення або звуження потоків, проходження потоків через ділянки місцевих опорів, труби Вентурі, взаємодію потоків, що рухаються під різними кутами. Такі перехідні ділянки можна розміщувати безпосередньо в транспортувальних трубопроводах.

Варіант абсорбційного пристрою з організацією перехідних режимів змінюю гідродинамічних умов руху потоку показано на рис. 2. У пристрої, до

складу якого входить насос 1, інжектор газу 2 і спеціальний змійовик 3, пере-
ходи між вертикальними і горизонтальними ділянками змійовика здійсню-
ються колінами обмежених радіусів у точках А, В, С, D, E, F, G та ін. Число
ділянок утворення перехідних режимів відповідає кількості колін, а інтенсив-
ність перехідних режимів визначається швидкістю руху газорідного потоку
і радіусами переходів.

Динамічні збурення пояснюються змінами на заокруглених ділянках взає-
модії інерційних сил потоку зі стінками трубопроводу та з відцентровими
силами. Переходи від прямолінійних ділянок потоку до криволінійних і нав-
паки супроводжуються стрибками прискорення, що відповідає в механіці уда-
рам і додатковим механічним впливам. Важливо, що силу таких ударів можна
регулювати. Найбільші динамічні впливи на потоки відповідають гідравлічним
ударам, які можна створювати, наприклад, за допомогою гідравлічного тарана
або електроіскрових розрядів.

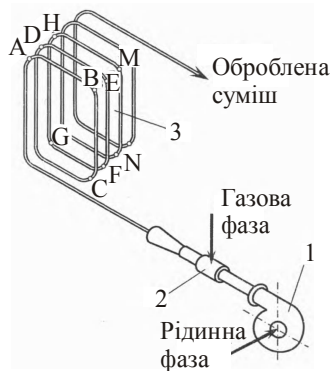


Рис. 2. Абсорбційний пристрій з криволінійними ділянками руху потоку

Перспективним напрямком інтенсифікації поширених у харчовій промисло-
вості процесів з реалізацією барботажних режимів є періодична зміна напрям-
ків руху циркуляційних контурів за допомогою попереминої подачі газової
фази у периферійну і центральну барботажні зони апаратів. Постійна перебу-
дова циркуляційних контурів сприяє зменшенню приблизно вдвічі швидкості
спливання бульбашок, додатково турбулізує потоки, посилює насичення газом
робочих продуктів і вивільнює частину енергії, що витрачається на підтриман-
ня циркуляційних контурів.

Технології різкого зниження тиску базуються на вивільненні високого
енергетичного потенціалу насиченого газом стисненого газорідного сере-
довища і тісно поєднані з процесами абсорбції й десорбції. Різке зниження тиску
призводить до руйнування біологічних і клітинних структур і використовується
в технологіях виробництва овочевих, фруктових і ягідних напоїв, у технологіях,
пов'язаних з екстрагуванням речовин з сировини рослинного походження,
диспергування середовищ тощо.

Використовувати можна будь-який газ, у тому числі й інертний. Найзручнішим
є діоксид вуглецю, особливо в технологіях тих виробництв, де він виділяється при
бродинні перероблюваного продукту (пива, спирту, вин, шампанського тощо).
Перевагами діоксиду вуглецю є висока розчинність, інертність і доступність.

Оскільки об'єм рідини при стисканні практично не змінюється, то потенціальна енергія стисненої газорідинної системи, яка дорівнює добутку тиску на об'єм $E_{п}=PV$, розподілена у газових бульбашках та в надрідинному газі, досягає значень від 0,5 до 5,0 кВт на 1 м³ середовища. Швидка розгерметизація системи призводить до початкового імпульсу різкого падіння тиску за рахунок нерозчиненої в рідині газової фази, а потім тиск знижується більш повільно внаслідок початку десорбції розчиненого газу. Інтенсивність руйнування клітинних структур визначається першим імпульсом, тривалість якого повинна бути якнайменшою.

Унаслідок десорбції розчиненого газу тиск у системі після першого імпульсу різкого падіння і припинення розгерметизації зростає до настання нового рівня рівноваги, тому можна провести наступну розгерметизацію, але з меншим енергетичним впливом. Ступінчаста розгерметизація доцільна в умовах обмеженого об'єму газової фази, коли втрата енергетичного рівня системи внаслідок десорбції газу відбувається повільно.

Прикладом ефективного використання різкого зниження тиску замість пресування може бути виділення соку виноградних ягід від м'якоти у виноробстві. Обладнання для пресування дозволяє створити високі тиски, що збільшують вихід рідкої фази, проте при підвищених тисках у рідку фазу переходять небажані речовини, тому при виробництві суслу для шампанських вин створювані у пресах тиски обмежують, призначають ступінчасті режими стиснення, витримують паузи у часі. За таких технологічних прийомів преси перетворюються на складне, матеріаломістке та високовартісне обладнання, яке до того ж не повністю забезпечує рівномірність обробки сировини. Різде зниження тиску однаково впливає на кожен частинку продукту.

Для виділення соку апарат із сокоягідною сумішшю герметизують, заповнюють діоксидом вуглецю під тиском до 1,2 МПа, витримують певний час (до 15 хв) з метою насичення суміші газом, а потім різко знижують тиск. Під час різкої розгерметизації швидкість виділення газової фази всередині клітинних структур значно перевищує швидкість молекулярної дифузії газу крізь оболонки клітин, різниця тисків у клітинах і в зовнішньому середовищі перевищує міцність оболонок клітин, внаслідок чого відбувається їх руйнування й активний вихід соку.

Спочатку впродовж короткого проміжку часу, під впливом тиску розчиненого в клітинах газу, форма клітин унаслідок порушення молекулярних зв'язків змінюється, наближаючись до сферичної. Після цього клітинні оболонки розриваються і відбувається досить повне виділення соку.

Схема одержання виноградного соку за допомогою різкого зниження тиску подана на рис. 3. За цією схемою у гребневідокремлювачі 1 виноградні ягоди відокремлюються від гребнів і роздавлюються, а отримана сокоягідна суміш насосом високого тиску 2 через ежекторний пристрій 3, у якому вона насичується діоксидом вуглецю, по трубопроводу високого тиску подається в дегазатор 4. Різде зниження тиску під час розбризкування насиченої газом сокоягідної суміші у дегазаторі призводить до руйнування клітинних структур і виділення соку, який разом з м'якоттю збирається у нижній частині де-

газатора, звідки через шлюзовий затвор 5 відводиться у пневмо-механічний прес 6 для відокремлення сула.

Насичення сокоягідної суміші в ежекторі 3 здійснюється діоксидом вуглецю, який відсмоктується з газового простору дегазатора, створюючи в ньому розрідження. Циркуляція діоксиду вуглецю в системі ежектор-дегазатор знижує його витрати на проведення процесу. Балон 7 служить для поповнення системи газом. Діоксид вуглецю може подаватись у дегазатор із бродильних чанів. Застосування ежектора скорочує тривалість насичення суміші газом.

За допомогою різкого зниження тиску можна оброблювати не тільки рідкі середовища, а й вологі продукти рослинного й тваринного походження за обмежених температур з одержанням продуктів підвищеної якості для дитячого харчування (соки, пюре, джеми), одночасно забезпечуючи знищення шкідливої мікрофлори.

У технологіях використання розрідження абсолютний тиск знижують від атмосферного до більш низьких значень, на відміну від технологій різкого зниження тиску, в яких високий тиск насиченої газом системи знижують від надлишкового до атмосферного. При створенні розрідження спостерігаються явища, аналогічні до тих, що відбуваються при різкому зниженні тиску, але на фоні нижчих температур і тисків газу. З наближенням абсолютного тиску до нульових значень майже до нуля падає розчинність газу, що обмежує або навіть припиняє діяльність мікроорганізмів, зокрема процес бродіння.

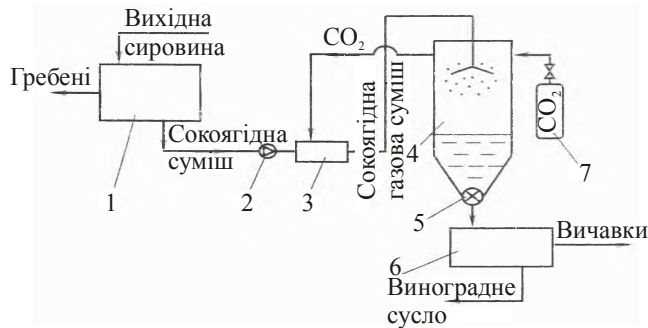


Рис. 3. Схема використання різкого зниження тиску для одержання виноградного сула

Розрідження застосовують для відокремлення оболонки плодів і овочів від їх основної маси. При цьому на першому етапі продукцію нагрівають до регламентованої температури, а потім різко знижують тиск у герметизованому об'ємі.

Обробкою розрідженням замінюють операцію бланшування плодів у виробництві компотів. Розрідження забезпечує видалення з міжклітинних каналів повітря і полегшує проникнення у тканини сиропів. Це забезпечує стабілізацію кольору й аромату плодів упродовж зберігання продукції.

Деаерацію води розрідженням використовують у виробництві напоїв з метою видалення розчинених газів, які можуть надавати напоям неприємного присмаку й запаху. Видалення розчиненого кисню зменшує перспективу утворення колоїдних зависей у готовій продукції і сприяє підвищенню розчинності діоксиду вуглецю. У системах живлення парогенераторів деаерація призначена для видалення газів, особливо кисню, який є причиною корозії елементів енергосистем при підвищених температурах.

У герметизованих апаратах при виробництві пива всіляко запобігають контакту напою з киснем або повітрям, тому перед подаванням напою у системі створюють розрідження, а потім її заповнюють діоксидом вуглецю. При фасуванні пива в скляну тару передбачається разове або кількаразове чергування розрідження перед заповненням пляшок діоксидом вуглецю. Крім того, за достатнього розрідження відбувається адіабатне википання залишків обполіскуваної води у пляшках і знищення мікрофлори, яка була у воді.

Остаточний тиск при створенні розрідження обмежується технічною доцільністю і складає 0,005...0,01 МПа. За таких тисків і певних температур розрідження може супроводжуватись кипінням і кавітацією.

Кавітація — розривання рідини в обмежених її об'ємах під дією розтягуючих напружень — виникає внаслідок зниження тиску в рідині, нижчому за тиск насиченої пари, характеризується утворенням дрібних бульбашок і порожнин (каверн), заповнених паром рідини й розчиненими газами [2]. Зародками утворення пустот можуть бути розчинені гази, молекули або групи молекул інших речовин, а також гази у вигляді наддрібних бульбашок радіусом 10^{-9} м, мікроорганізми або продукти їх діяльності.

Енергетичним джерелом кавітації, яке у перехідному стані використовується на створення поверхні поділу фаз між газом і рідиною, утворення пари та на генерацію інтенсифікуючих явищ, є власний потенціал середовища й енергія насоса.

Кавітацію можна створити безпосереднім зниженням тиску, зміною гідродинамічних умов руху середовища в напірних каналах, які призводять до зниження тиску, механічними коливаннями різних частот, ультразвуком, електричними розрядами тощо.

Після короточасного зниження і подальшого вирівнювання тиску відбувається стрибкоподібне захоплення (зникнення, колапс) кавітаційних бульбашок унаслідок конденсації пари і розчинення газів, якими були заповнені бульбашки. Захоплення бульбашок розміром близько 10^{-7} м, розміщених на відстані менше 1 мм, супроводжується виникненням ударних хвиль з великою амплітудою тиску, який на відстані 1,59 радіуса від центра бульбашки досягає 400...500 МПа. Короткий час захоплення бульбашок (близько $0,5 \cdot 10^{-6}$ с) наближає процес до адіабатичного, що призводить до різкого зростання температури газової фази до 2000 К.

Унаслідок перерозподілу зарядів на поверхні поділу фаз створюються електричні поля високої напруженості й електричний пробій, який супроводжується випромінюванням в ультразвуковій частині спектра. При цьому в кавітаційних порожнинах виникають іонізовані збуджені молекули та іони, вільні радикали тощо. Молекули води розпадаються на валентно насичені атоми водню H^{\cdot} і гідроксильні радикали OH^{\cdot} . Важливі наслідки для біологічних середовищ має утворення перекису водню H_2O_2 і озону O_3 . Останні процеси суттєво залежать від наявності в рідкому середовищі розчиненого кисню.

Ударні хвилі, що виникають унаслідок захоплення досить рівномірно розподілених у рідині бульбашок, інтенсифікують технологічні процеси, у тому числі процеси тепло- і масообміну, і навіть дозволяють проводити деякі хімічні процеси з великою енергією активації, які не можна провести за звичайних умов.

На рис. 4 показано один з варіантів проточного гідродинамічного кавітаційного пристрою (змішувача) з нерухомим кавітатором для проведення абсорбції газу [3]. Кавітаційний змішувач складається з конфузора (звужувача потоку) 7, проточної камери 2 і дифузора (розширювача потоку) 1. Всередині проточної камери 2 розміщений гідродинамічний кавітаційний пристрій для абсорбції газів з нерухомим кавітатором 6, який має центральний отвір для додаткового звуження потоку. Кавітатор розділяє потік рідини на два потоки: внутрішній, що проходить через центральний отвір кавітатора, і зовнішній, що рухається в зазорі між зовнішньою поверхнею кавітатора й проточною камерою. У цьому зазорі на зовнішній поверхні кавітатора під кутом закріплені лопаті 4, які закручують зовнішній потік рідини і сприяють її перемішуванню з газом. Внутрішній потік має більшу швидкість за рахунок звуження центрального отвору, що посилює інжектування діоксиду вуглецю.

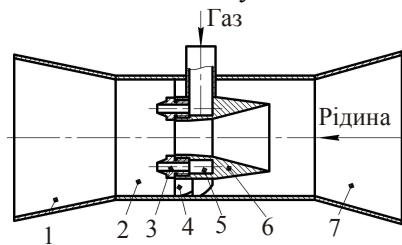


Рис. 4. Гідродинамічний кавітаційний пристрій для абсорбції газів

За кавітатором 6 потік розширюється, тому між зовнішнім і внутрішнім потоками утворюється зона зниженого тиску, в яку вводиться газ через систему внутрішніх каналів 5 у тілі кавітатора. Канали закінчуються форсунками 3, спрямованими в бік руху потоку. Введення газу між двома потоками та перемішування рідини лопатями 4 сприяє кращій взаємодії фаз.

Потік рідини в гідродинамічні кавітаційні пристрої подається насосами під тиском до 1,2 МПа зі швидкістю 1...3 м/с, а у звужених кавітатором перерізах проточної камери швидкість потоку зростає до 15...20 м/с і, відповідно, знижується тиск. Унаслідок місцевого зниження тиску за кавітатором утворюються кавітаційні бульбашки (або каверни), які зносяться в зону підвищеного тиску, де захоплюються, створюючи динамічну дію на оброблюване середовище. Довжина зони дії захоплення бульбашок може досягати 8...10 діаметрів проточної камери. Особливістю проточних гідродинамічних кавітаторів є короткочасна одноразова інтенсивна дія на середовище.

Створити гідродинамічну кавітацію і відповідні їй ефекти можна за допомогою труб Вентурі, які, подібно до описаного вище кавітаційного пристрою, мають звуження (конфузори) і розширення (дифузори) з розміщеними між ними короткими горловинами, причому всередині горловин кавітатори не встановлюються.

Труби Вентурі, всередині яких суцільною фазою рухається газ, а не рідина, набули застосування в процесах абсорбційного очищення великих об'ємів (з витратами понад 10 м³/с) викидних газів [4]. Рідина, яка поглинає з газу шкідливі домішки, розпилюється в газі переважно за рахунок енергії газового потоку.

Кавітація в газовому середовищі не виникає, проте високі швидкості руху газової фази (швидкість у горловині 60...150 м/с) і тонке диспергування рідини створюють розвинену поверхню контакту фаз та інтенсивне її оновлення.

Схема одного з варіантів використання труби Вентурі для очищення викидних газів подана на рис. 5. Труба Вентурі включає конфузур 1, горловину 2 і дифузур 3 з кільцевими перегородками 4 перемінного перерізу. Перегородки виготовлені з елементів трикутного перерізу і встановлені з радіальним зазором на висоті, рівній 1/3 і 2/3 довжини дифузора. Рідина через форсунки розпилюється в конфузурі і горловині. Під дифузуром розміщений краплеуловлювач 5.

При проходженні крізь кільцеві ребристі перегородки відбуваються пульсаційні зміни режиму руху газо-рідинного потоку. Комбіноване підведення рідини через радіальні отвори горловини і центральну форсунку конфузора та пульсації високошвидкісного газового потоку сприяють рівномірному розподілу диспергованих крапель в об'ємі дифузора. Небажані домішки газової фази активно поглинаються рідиною, яка збирається внизу краплеуловлювача і звідти відводиться з абсорбера.

Труби Вентурі у вертикальному положенні можуть працювати в режимах висхідної і низхідної прямотечії, можуть бути встановлені горизонтально або під кутом до горизонту, мати круглий або прямокутний переріз і працювати в поєднанні з іншими конструктивними елементами.

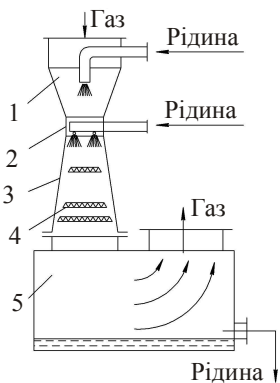


Рис. 5. Швидкісний прямотечійний абсорбер у вигляді труби Вентурі

Дискретно-імпульсні технології базуються на використанні швидких пульсаційних змін тиску, швидкостей і прискорень руху робочих середовищ. Параметри змін тиску (відповідно до тиску змінюються температури і ентальпії) часто підбирають такими [1], щоб реалізувати швидке зниження теплового потенціалу переведеного у перегрітий стан стисненого середовища з подальшим кипінням або утворенням кавітації й одночасною потужною турбулізацією потоків, що призводить до значного прискорення технологічних процесів, зокрема масообміну (абсорбції, екстракції, гомогенізації, руйнування клітинних структур).

Оброблення середовища проводять, як правило, в роторно-пульсаційних апаратах, які складаються з бункера, роторно-пульсаційного вузла, насоса, електродвигуна, корпусу і трубопроводу для циркуляції продукту. Основним робочим органом апарата є роторно-пульсаційний вузол, який складається з встановлених на валу електродвигуна диска з лопатями — ротора, що нагадує робоче колесо відцентрового насоса, і двох статорів, між якими знаходиться ротор. Ротор і статор — це циліндри з наскрізними рівномірно розміщеними на поверхні пазами. Міжциліндровий зазор між статором і ротором становить 0,10...0,45 мм.

Унаслідок обертання ротора пази ротора й статора на короткий час періодично збігаються і крізь утворені канали проходить оброблюваний продукт,

який при цьому ділиться на окремі *дискретні* об'єми і в кожний з цих об'ємів *імпульсно* вводиться енергія внаслідок дії підвищеного тиску. Значні перепади тиску створюють високоградієнтні течії в каналах і в зазорах між ротором і статором та великі градієнти зсувних напруг. Локальні швидкості зсуву потоку оброблюваного середовища досягають значень $(50...100) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, а частоти імпульсів — від 3 до 30 кГц.

Повний імпульс включає значне підвищення тиску, під час якого енергія підводиться від ротора до середовища, і подальше різке зниження тиску, під час якого підведена енергія виконує роботу перехідного стану, пов'язану з інтенсифікацією процесу. Нижній перепад тиску в дискретно-імпульсних технологіях обмежується атмосферним, що відповідає кінцевій температурі адиабатного кипіння $100 \text{ }^\circ\text{C}$ і температурному діапазону цих процесів вище $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Це обмежує застосування таких технологій у харчовій промисловості за показниками збереження біологічної цінності продуктів. Проте скорочення тривалості обробки середовища до кількох секунд і менше однієї секунди може дати необхідний технологічний ефект (наприклад, гомогенізація молока з одночасним знищенням мікроорганізмів) без втрат фізіологічно цінних компонентів.

На рис. 6 подана схема роторно-пульсаційного апарата, призначеного для перемішування реагуючих рідин, рідин з газами, рідин з порошкоподібними домішками та для отримання молочних сумішей різного призначення [5].

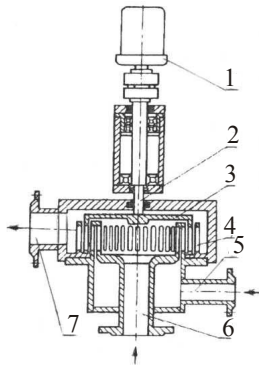


Рис. 6. Схема роторно-імпульсного апарата:

1 — електродвигун; 2 — вал; 3 — ротор; 4 — статор; 5, 6 — патрубки підведення компонентів; 7 — штуцер виходу продукту

Робочим вузлом апарата є коаксіальні циліндри зі щільними отворами, нерухомий статор 4 і закріплений на валу 2 ротор 3, який приводиться в обертання електродвигуном 1. У порожнини статора через боковий вхідний штуцер 5 подають один із змішуваних компонентів, а через центральний штуцер 6 — другий. Витікаючи із щілин, початкові компоненти потрапляють у зону дії інтенсивних пульсацій і високих градієнтів швидкості, внаслідок чого відбувається їх інтенсивна взаємодія. Продукт відводиться через штуцер 7.

Висновки

Використання перехідних режимів функціонування технологічних систем дозволяє збільшувати інтенсивність дифузійних процесів і знижувати їх собі-

вартість, проте при цьому може ускладнюватись будова апаратів та їх обслуговування. Перспективним напрямком є розроблення нових типів апаратів і застосування вже відомих випробуваних у виробництві конструктивних рішень. Кількісна оцінка ефективності впровадження перехідних режимів повинна виконуватись на основі техніко-економічних розрахунків для кожного конкретного випадку.

Література

1. Соколенко А.І. Интенсифікація масообмінних процесів у харчових і мікробіологічних технологіях / А.І. Соколенко, О.Ю. Шевченко, В.А. Піддубний. — Київ: ПП Люксар, 2008. — 443 с.
2. Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. — Киев: Полиграфкнига, 1997. — Ч. I. — 840 с.
3. Петрікей Р.В. Интенсифікація процесу насичення напоїв CO₂ шляхом використання гідродинамічних кавітаційних пристроїв / Р.В. Петрікей, О.М. Прохоров. — Харчова промисловість. — 2009. — № 10. — С. 101—106.
4. Кузнецов И.Е. 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. — Киев: Техника, 1989. — 304 с.
5. Долинский А.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях / А.А. Долинский, Б.И. Басок, С.И. Гулый, А.И. Накорчевский, Ю.А. Шурчкова. — Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1996. — 208 с.

РЕЖИМНЫЕ СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАССООБМЕНА

А.И. Соколенко, А.Е. Шевченко, А.С. Марценюк

Национальный университет пищевых технологий

В статье проанализированы применяемые в пищевой технологии режимные способы интенсификации массообмена, к которым отнесено однократное или повторное использование переходных режимов путем изменения гидродинамических условий движения сред, резкого снижения давления, создания разрежения, кавитации и дискретно-импульсного подвода энергии. Режимные способы интенсификации базируются на существовании неразрывных связей между всеми параметрами технологических систем, вследствие чего изменение какого-либо параметра системы приводит к перестройке всех остальных ее параметров и к ускорению процессов переноса. Однократное и повторное создание переходных режимов и кавитация позволяют наиболее полно использовать внутреннюю энергию технологических систем. Дискретно-импульсный подвод энергии, базирующийся на повторяемом с большой частотой значительном повышении и последующем резком снижении давления, требует интенсивного подвода внешней энергии.

Ключевые слова: интенсификация массообмена, переходные режимы, резкое снижение давления, создание разрежения, кавитация, дискретно-импульсный подвод энергии.