

УДК 663.033

О.Є. Резенчук, В.М. Поводзинський, В.Ю. Шибецький

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ РОБОТИ ФЕРМЕНТЕРІВ З ПНЕВМАТИЧНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ

The analysis of constructions of fermenters with energy supply by compressed gas in view of features of hydrodynamics and mass transferring in them, also there was made an observing of evolutionary progress of modern constructions. Based on this information, there was made the classification of fermenters with pneumatic mixing with the main idea was to find possible ways of designing and building such kind of equipment.

Вступ

Для отримання біомаси і метаболітів біологічними агентами (БА) необхідне створення таких умов зовнішнього оточення, що забезпечать максимальну експлуатацію їх біологічного потенціалу. Найбільш поширеним обладнанням для культивування БА у штучно створених умовах є ферментери. Специфічними особливостями біотехнологічних процесів, що реалізуються в ферментері, є можливість їх інтенсифікації та керування ними факторами зовнішнього оточення при збереженні стабільності генетичного потенціалу БА. Серед факторів впливу найбільш поширеною є зміна гідродинамічних параметрів зовнішнього оточення, наприклад інтенсивності перемішування. В цьому випадку перемішування розглядається як основний процес, що відбувається у ферментері, спрямований на вирівнювання градієнтів концентрацій речовин та енергії, а також на диспергацію крапель і бульбашок у культуральній рідині при її примусовому русі [1].

Біоінженерія як складова частина біотехнології визначає технічне забезпечення стадії культивування з урахуванням всієї різноманітності фенотипічних ознак БА. Принциповими обмеженнями, що мають бути враховані при конструюванні та обслуговуванні ферментерів, є вразливість БА до фізико-механічних чинників, здійснення масопередачі при наявності багатофазної дисперсії на фазових переходах рідина–клітини БА, газ–рідина–клітини БА та інтенсивне піноутворення. Істотним ускладненням реального процесу є постійна зміна умов оточення, зумовлена накопиченням біомаси, синтезом метаболітів, вичерпністю субстратів та ін.

Вибір, моделювання, розрахунок і конструювання ферментерів є специфічною задачею біоінженерії, якою переймаються інженери-конструктори та технологи для реалізації процесів біосинтезу. Суттєвим елементом процесу культивування є вибір способу введення енергії на перемішування.

Відомі класифікації ферментерів розроблено без врахування специфіки руху багатофазної дисперсії та конструктивних особливостей пристроїв, що забезпечують регулювання процесів масопередачі.

Ферментери для аеробних процесів біосинтезу доцільно класифікувати за конструкцією та за одним із трьох способів введення енергії [2]:

- пневматичне перемішування стисненим газом;
- енергія насосу, що забезпечує рух рідинної фази у зовнішньому циркуляційному контурі;
- при використанні механічних пристроїв обертового або іншого типу руху.

Відмінністю такої класифікації від відомих є акцент на методи коректного вимірювання витрат енергії на перемішування.

Постановка задачі

Метою дослідження є: систематизація інформації про один із основних типів ферментерів з підведенням енергії стисненим газом; аналіз принципів роботи даного типу ферментерів та їх класифікація, що дасть змогу розробити основи проектного розрахунку і виявити шляхи інтенсифікації та регулювання біотехнологічними процесами, а також окреслити можливі напрями конструювання апаратів з пневматичним перемішуванням.

Аналіз роботи ферментерів з пневматичним перемішуванням

Ферментери із введенням енергії стисненим газом є найбільш вживаними у практиці культивування аеробних БА завдяки своїй експлуатаційній надійності, що зумовлюється відсутністю рухомих елементів.

Ферментери з пневматичним перемішуванням можна класифікувати за відношенням висоти апарата до його діаметра – H/D . Це фер-

ментери змішування, де $H/D \leq 3$, і колонні ферментери – $H/D > 3$. В свою чергу, за наявності контактних пристроїв колонні ферментери поділяються на: барботажні, газліфтні (ерліфтні), тарілчасті, з плаваючою насадкою та трубчасті.

Ферментери змішування – це апарати, в яких відбувається процес перемішування диспергуванням газу первинним газорозподільним пристроєм – барботером (рис. 1) [2–5].

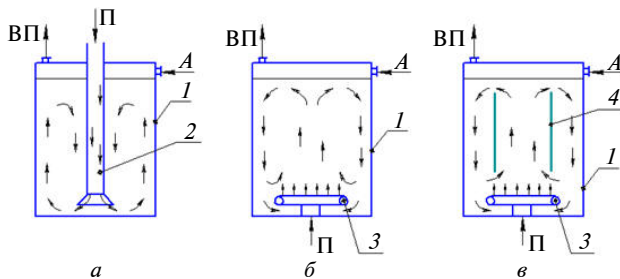


Рис. 1. Схема руху газорідинної дисперсії в різних конструкціях ферментерів змішування: *a* – ферментер із введенням повітря через вертикальний повітровід; *б* – ферментер із введенням повітря за допомогою барботера; *в* – ферментер з використанням циркуляційної труби; 1 – корпус, 2 – повітровід, 3 – барботер, 4 – циркуляційна труба, А – вхід рідини, П – повітря, ВП – відпрацьоване повітря

Істотним недоліком ферментерів змішування з підведенням енергії стисненим повітрям є невисока інтенсивність масообміну за киснем (об'ємний коефіцієнт масопередачі – $k_L a = 1-2 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{год}$). Пояснюється це недостатньою вертикальною циркуляцією середовища та недостатнім диспергуванням газу [3, 4].

Наступним кроком у розробленні конструкцій ферментерів з пневматичним перемішуванням було створення колонних ферментів і ферментерів з циркуляційними контурами (барботажно-ерліфтних) (рис. 2).

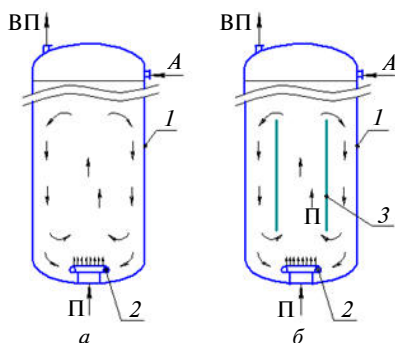


Рис. 2. Схема руху газорідинної дисперсії: *a* – колонний барботажний ферментер; *б* – колонний циркуляційний (барботажно-ерліфтний) ферментер; 1 – корпус, 2 – барботер, 3 – циркуляційна труба, А – вхід рідини, П – повітря, ВП – відпрацьоване повітря

Інтенсивність масопередачі кисню можна збільшити за допомогою використання контактних пристроїв, які сприяють збільшенню кратності контакту між рідкою і газовою фазами, що впливає на інтенсивність масообміну на фазовому переході газ–рідина. Також інтенсифікувати масообмін можна за допомогою збільшення рушійної сили масообміну, що досягається збільшенням висоти стовпа середовища в апараті. Збільшення поверхні масопередачі досягається створенням локальних зон з підвищеним тиском для перерозподілу газорідинної дисперсії у зони зі знизеним газовмістом; збільшенням часу перебування бульбашок газу в рідині; формуванням потоків газорідинної дисперсії з максимально можливою частотою відновлення поверхні фазового контакту; додатковим диспергуванням газу в рідині для збільшення поверхні контакту фаз; поділом рідкої фази на шари (секціонуванням) для здійснення скінченного числа ступенів контакту фаз при їх спрямованому русі [3].

Контактні пристрої, в свою чергу, можуть представлятися різноманіттям конструкцій залежно від їх призначення. Це можуть бути тарілки, перегородки, циркуляційні труби, насадки, мішалки та інші пристрої [5]. Найчастіше застосовуються затоплені контактні пристрої, виконані з організованим переливом. Переливні канали призначені для здійснення безперервного стоку потоків з більшою густиною в ті зони, де ці потоки знову насичуються газом і, перерозподіляючись, починають рух вгору. Такі переміщення створюють локальні або зовнішні циркуляційні контури в апараті. Найбільш простий “затоплений” контактний пристрій – тарілка, перфорована круглими отворами, що перекидає весь переріз апарату [2, 3].

Тарілчасті ферментери – це апарати, секціоновані за висотою різними типами тарілок для організації спрямованого руху фаз і їх багатократної взаємодії. За принципом руху фаз через секції розрізняють тарілки з організованим переливом і провального типу. Тарілки з організованим переливом поділяються на прямотечійні та перехресні. Прямотечійні – це ковпачкові, клапанні, ситчасті і ковпачково-ситчасті тарілки. Як тарілки провального типу (безпереливні) використовуються дірчасті, решітчасті, трубчасті і щілинні (рис. 3).

Контакт рідини та газу відбувається при проходженні їх через ті ж отвори за схемою повного перемішування рідини. Переливні пристрої відсутні. В тарілках прямотечійного типу рух газу та рідини відбувається в одному напрямку.

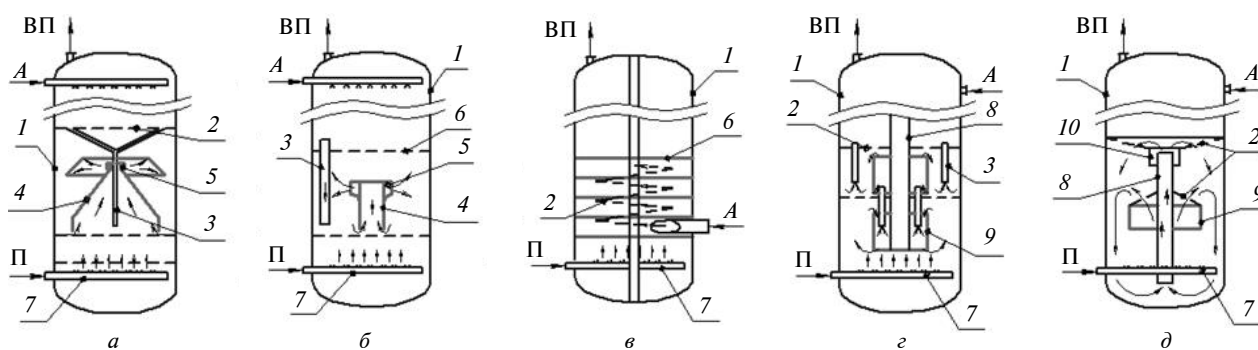


Рис. 3. Схема руху газорідної дисперсії в тарілчастих ферментерах: *а, б* – ферментери з циркуляційними та піногасними пристроями; *в* – багатосхідчастий колонний ферментер; *г* – тарілчастий колонний ферментер зі співвісною циркуляційною трубою; *д* – ферментер з нахиленими контактними пристроями; 1 – корпус, 2 – перегородка, 3 – переливна трубка, 4 – пристрій для циркуляції середовища, 5 – піногасник (вигнуті лопатки), 6 – тарілка, 7 – барботер, 8 – циркуляційна труба, 9 – дифузор, 10 – стічна труба для піногасіння, А – вхід рідини, П – повітря, ВП – відпрацьоване повітря

Розрізняють колонний апарат (рис. 3, *а*), який являє собою вертикальну ємність 1, розділену по висоті на секції перфорованими перегородками 2, в яких закріплено переливні трубки 3. Відмінною конструктивною особливістю апарата є установка в кожній секції пристрою для циркуляції середовища 4 у вигляді циліндричної обичайки, у верхній частині якої закріплено вигнуті лопатки для завихрення 5. Навколо лопаток встановлено конусоподібний відбивач з утворенням кільцевого простору між ним і стінкою ємності.

Ферментер (рис. 3, *б*) схожий на попередню конструкцію, але принципово відмінністю є те, що кожна тарілка 6 по центру має отвір, а кожний циркуляційний пристрій 4 виконано у вигляді циліндричного стакана, розміщеного на тарілці над отвором і перфорованого в нижній частині для проходу рідини, а лопатки 5 закріплені на зовнішній поверхні верхньої частини стакана.

Багатосхідчастий колонний ферментер (рис. 3, *в*) працює в прямотечійному режимі за принципом ідеального витіснення. Розміщені по висоті колони горизонтальні тарілки 6 із плетеної металевої сітки розділені перегородками 2 на сектори. Повітря подається через газорозподільний пристрій 7, а рідка фаза – через тангенційне введення надходить у нижню частину колони. Отвори тарілок виконані так, що при проходженні через них газорідний потік набуває спірально-зигзагоподібного руху, спрямованого вгору, і подрібнюється на безліч бульбашок і крапель, створюючи значну турбулізацію.

Тарілчастий колонний ферментер зі співвісною циркуляційною трубою (рис. 3, *г*), яка утворює зазор з корпусом колони, секціонований суцільними перегородками 2. В перегородках, біля циркуляційної труби та по периферії,

по черзі закріплено переливні трубки 3 з отворами для проходу повітря. Крім того, в утворених секціях співвісно циркуляційній трубі 8 встановлено дифузори 9, в яких розміщено верхні і нижні ділянки переливних трубок.

Ферментер з нахиленими контактними пристроями (рис. 3, *д*) виконано у вигляді ряду ярусно розміщених протилежно направлених перфорованих воронок, які, в свою чергу, складаються з дифузора 9 і перфорованих перегородок 2. Непарні воронки за напрямком руху повітря встановлені з утворенням між ними та стінкою апарата каналів для проходу більш густих потоків, а парні – прикріплені до стінки корпусу. Додаткова стічна труба 10 для подачі хімічного піногасника проходить через отвори парних воронок [3, 5].

Відмінною особливістю тарілчастих колонних ферментерів є можливість організації оптимальних потоків газу і рідини як за напрямком руху, так і за об'ємом. В них можуть бути реалізовані різні типи потоків – прямотечія, протитечія, рециркуляція та підживлення середовищем або газом у будь-якій точці колони. До переваг таких апаратів належать низька капіталоемність, простота і механічна надійність конструкції. До недоліків – малоінтенсивний масообмін, невисока кратність циркуляції, невеликий коефіцієнт заповнення апарата, значна металоємність.

Колонні ферментери ерліфтного або газліфтного типу (рис. 4) призначені для підняття рідкої фази з деякої глибини колони на певну висоту за допомогою стисненого газу. Такі апарати можна класифікувати за принципом здійснення системи циркуляції, а саме – за внутрішнім і виносним контурами для природньої циркуляції. Остання може бути виконана з центральною циркуляційною трубою або дифузором. Різні конструкції газ-

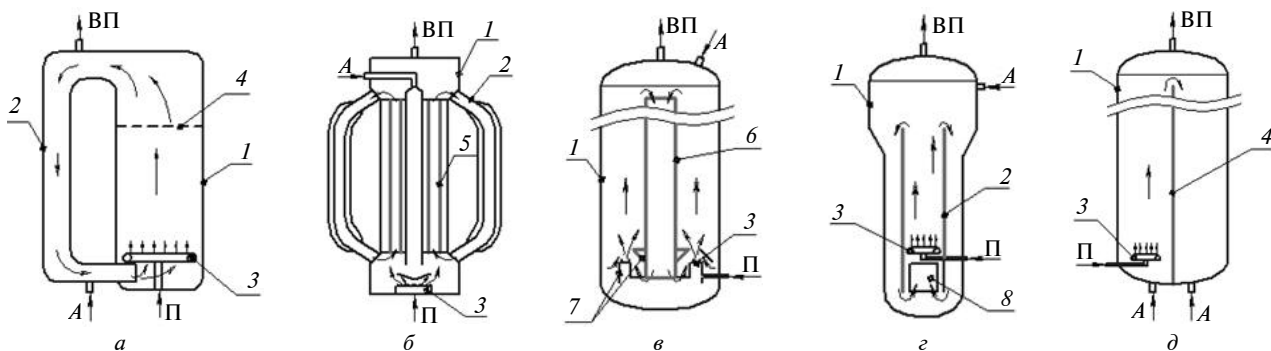


Рис. 4. Схема руху газорідної дисперсії в типових конструкціях ерліфтних ферментерів: *a* – ерліфтний колонний ферментер з проміжними тарілками із зовнішнім контуром циркуляції; *b* – газліфтний колонний ферментер із зовнішніми циркуляційними трубами; *v* – ерліфтний колонний ферментер з дифузorzом; *z* – ерліфтний колонний ферментер різних діаметрів; *d* – односхідчастий колонний ферментер з вертикальною перегородкою; 1 – корпус, 2 – циркуляційна труба, 3 – газорозподільний пристрій, 4 – перегородка, 5 – вертикальна труба, 6 – дифузorz, 7 – кільцевий жолоб, 8 – теплообмінник, А – вхід рідини, П – повітря, ВП – відпрацьоване повітря

ліфтних ферментерів передбачають наявність вертикальних або горизонтальних перегородок, які сприяють поділу апарата на центральну секцію культивування та периферійні секції рециркуляції.

Ерліфтний колонний ферментер з проміжними тарілками та зовнішнім контуром циркуляції (рис. 4, *a*) складається з двох з'єднаних між собою колон різного діаметра, одна з яких являє собою барботажну трубу 1 з висхідним потоком, а друга – циркуляційну 2 з низхідним потоком. За допомогою газорозподільного пристрою 3 газ подається в нижню зону барботажної колони, в якій наявні диспергуючі секціонувальні перегородки 4. Завдяки високому гідростатичному тиску в нижній частині барботажної колони забезпечується висока концентрація розчиненого кисню [7].

Конструкція газліфтного колонного ферментера із зовнішніми циркуляційними трубами (рис. 4, *b*) виконана у вигляді ємності 1 з системою циркуляції 2, газорозподільного пристрою 3, встановленого в нижній частині ємності, та пристрою для введення рідкої фази. Відмінною рисою такого ферментера є система циркуляції, яка складається із зовнішніх труб з теплообмінними елементами, підключених до верхньої та нижньої частин ємності для організації низхідного потоку рідини, та вертикальних труб 5, встановлених впритул одна до одної по перерізу ємності над газорозподільним пристроєм. У таких апаратах максимально розвинена активна зона аерації, забезпечується необхідна кратність циркуляції, рідка суміш подається в добре диспергованому вигляді до початку висхідного потоку, що створює більш сприятливі умови для росту мікроорганізмів порівняно з відомими апаратами. До недоліків належать висока металоємність апарату, складність конструкції та експлуатації.

Газліфтний колонний ферментер з дифузorzом (рис. 4, *v*) виконаний у вигляді вертикальної циліндричної ємності 1, в середині якої встановлено дифузorz 6. Аератор 3, розміщений в кільцевому просторі між стінкою ємності та дифузorzом, виконано на двох кільцевих жолобах 7, розміщених один над одним з утворенням гідрозатвора й обернених днищем догори, причому днища мають отвори для проходження повітря і газорідної суміші.

Інший тип ерліфтних ферментерів (рис. 4, *z*) представлений вертикальним циліндричним корпусом 1, який розширюється у верхній частині. В середині розміщена вертикальна циркуляційна труба 2, яка розділяє апарат на центральну секцію культивування та дві бокові секції для рециркуляції. В основі ферментера розміщений теплообмінник 8 і газорозподільний пристрій 3. Апарат відрізняється простотою конструкції для досягнення заданих умов щодо перемішування, масообміну, відведення тепла та піногасіння [2, 3].

Односхідчастий колонний ферментер з вертикальною перегородкою (рис. 4, *d*) являє собою колону 1 з розміщеною посередині вертикальною перегородкою 4. По одну сторону від неї встановлено газорозподільний пристрій 3. Ферментер відрізняється простотою конструкції та низькою металоємністю.

Існує думка, що в ферментерах з плаваючою насадкою збільшується ефективність масопередачі за рахунок збільшення поверхні контакту фаз і турбулізації рідини при роботі з високими швидкостями газової та рідкої фаз. У таких колонних апаратах для підвищення ефективності роботи секціонуючі елементи виконані у вигляді решіток, закріплених на коаксціальних циліндричних поверхнях. У центрі апарата встановлюється тру-

ба змінного перерізу для введення повітря. В деяких випадках апарат може бути розділений на секції перфорованими тарілками. Цікавим елементом для покращення гомогенізації є використання лопатевої насадки, що являє собою тонкостінний циліндр з трьома лопатями на зовнішній поверхні, виконаними з поліетилену. Газ, діючи на лопаті елемента насадки, змушує його обертатися навколо своєї осі, що сприяє збільшенню та відновленню поверхні контакту фаз та інтенсифікації процесу масообміну. Псевдозріджений шар насадки забезпечує інтенсивне перемішування та виключає утворення застійних зон.

Конструкції трубчастих колонних ферментерів для інтенсифікації взаємодії газу і рідини виконані за типом кожухотрубчастих теплообмінників. При високих швидкостях газу взаємодія газу з рідиною в трубі відбувається більш інтенсивно, ніж у великому об'ємі, у зв'язку зі збільшенням тертя між газом і рідиною, що призводить до збільшення переносу маси.

Суттєвим кроком у вдосконаленні масообмінних характеристик ферментерів є розроблення конструкцій ферментерів барботажно-ерліфтного типу із внутрішньою або з винесеною зоною циркуляції (рис. 5). Апарати із внутрішньою циркуляцією різняться за наявністю в них контактних пристроїв (а саме одного або кількох дифузоров, причому якщо їх кілька, то вони рівномірно розосереджуються по перерізу апарата чи встановлюються концентрично) або перегородок для примусового поділу висхідних і низхідних потоків циркулюючої газорідинної дисперсії. Також це можуть бути контактні тарілки різноманітних конструкцій [2, 3, 6].

При винесеному контурі циркуляція здійснюється за рахунок використання насосів і зовнішніх циркуляційних труб.

Одним із представників конструкції такого типу є ферментер системи Лефрансуа (рис. 5, а),

який у результаті певних удосконалень став прототипом для наступних конструкцій. Це циліндрична ємність 1 з концентрично встановленим дифузоров-теплообмінником 2. Повітря в апарат подається через центральний повітровід 3, який у нижній частині ферментера спирається на конічну підставку, що утворює із днищем кільцевий зазор для виходу повітря. Перевагами такого апарата вважаються відсутність рухомих вузлів і деталей, а також простота експлуатації. Недолік – малоінтенсивний масообмін (швидкість розчинення кисню не більше 2–3 кг/м³·год) [5, 7].

Суттєвою відмінністю ерліфтно-периферійного ферментера (рис. 5, б) від ферментера системи Лефрансуа є наявність двох дифузоров 2. Перевагами такої конструкції є невеликі енерговитрати на перемішування рідини, низькі експлуатаційні витрати, простота і механічна надійність, низька вартість виготовлення. Недоліком вважається малоінтенсивний масообмін, що впливає на продуктивність апарата.

В ерліфтному багатозональному ферментері (рис. 5, в) встановлено три дифузори 2. На трубах і у верхній частині над дифузорами встановлено “зонти” 4 для спрямування піни назад у потік.

До апаратів з винесеною циркуляцією належать ферментер системи Шоллера–Зайделя (рис. 5, г). Циркуляція рідини в апараті здійснюється в дванадцяти виносних циркуляційних трубах діаметром 0,35 м, встановлених навколо корпусу ферментера. Повітря подається в циркуляційну трубу через керамічну свічку за допомогою газорозподільного пристрою б. Для гасіння піни застосовується виносний механічний піногасник [2, 3, 6].

На підставі проведеного аналізу розроблено схему класифікації ферментерів з пневматичним перемішуванням (рис. 6).

Наведена класифікація являє собою узагальнену схему промислових ферментерів, які

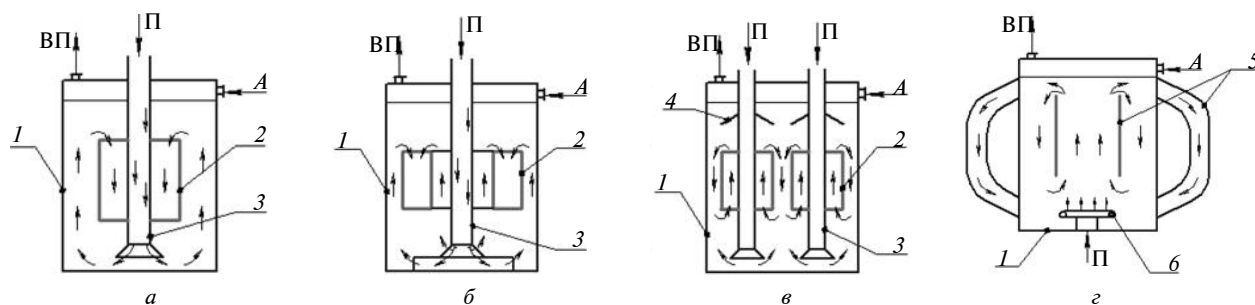


Рис. 5. Схема руху газорідинної дисперсії в різних конструкціях барботажно-ерліфтних ферментерів: а – ферментер системи Лефрансуа з центральним дифузоров; б – ерліфтно-периферійний ферментер; в – ерліфтний багатозональний ферментер; г – ферментер системи Шоллера–Зайделя; 1 – корпус, 2 – дифузоров, 3 – повітровід, 4 – напрямний “зонти”, 5 – циркуляційна труба, б – барботер, А – вхід рідини, П – повітря, ВП – відпрацьоване повітря



Рис. 6. Схема класифікації ферментерів з пневматичним перемішуванням

використовуються в реальних технологічних процесах фармацевтичної, мікробіологічної та харчової промисловостей.

Висновки

Проведений аналіз відомих конструкцій ферментерів з пневматичним перемішуванням дав змогу виявити характер руху багатофазної дисперсії в апаратах, охарактеризувати особливості масообміну.

На основі інформації про промислові ферментери з пневматичним перемішуванням розроблено їх класифікацію з урахуванням конструктив-

них особливостей пристроїв, що забезпечують регулювання процесів масопередачі, та специфіки гідродинамічної обстановки в апараті. Дана класифікація як система досліджень є важливим принципом систематизації інформації. Схема класифікації ферментерів з пневматичним перемішуванням дає змогу вирішити ряд питань стосовно обґрунтованого вибору проектних рішень щодо обладнання в біотехнологічному виробництві.

Крім цього, систематизована інформація про ферментери такого типу буде підґрунтям для перспективних конструктивних розробок обладнання, а також для вибору напрямів досліджень процесів масопередачі в даному типі устаткування.

1. Барабаш В.М., Бегичев В.И., Белевицкая М.А., Смирнов Н.Н. Проблемы и тенденции развития теории и практики перемешивания жидких сред // Теор. основы хим. технологии. – 2007. – 41, № 2. – С. 140–147.
2. Schuger K. Neue Bioreaktoren für aerobe Prozesse // Chem.-Ing.-Techn. – 1980. – 52, N 12. – P. 951–965.
3. Виестур У.Э., Кузнецов А.М., Савенков В.В. Системы ферментации. – Рига: Зинатне, 1986. – 174 с.
4. Бирюков В.В., Архипов М.Ю. Потребление кислорода мицелиальными культурами микроорганизмов в био-

реакторе // Теор. основы хим. технологии. – 2008. – 42, № 5. – С. 556–563.

5. Андреев А.А., Брызгалов Л.И. Производство кормовых дрожжей. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесная промышленность, 1986. – 248 с.
6. Винаров А.Ю., Гордеев Л.С., Кухаренко А.А., Панфилов В.И. Ферментационные аппараты для процессов микробиологического синтеза. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 278 с.
7. Кафаров В.В., Винаров А.Ю., Гордеев Л.С. Моделирование биохимических реакторов. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 344 с.