

УДК 663.1

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69451

ГІДРОДИНАМІКА ФЕРМЕНТЕРУ З БАГАТОВАЛОВОЮ МІШАЛКОЮ

© Д. М. Закоморний, М. Г. Кутовий, С. І. Костик, В. М. Поводзинський,
В. Ю. Шибецький

Дана стаття присвячена комп'ютерному моделюванню гідродинамічної обстановки в ферментері з одноваловим і багатоваловим перемішувачем пристроями. На підставі проведених досліджень вдалося встановити особливості утворення воронки. Було проведено порівняльний аналіз гідродинаміки потоків рідини, що виникають в об'ємі за рахунок використання перемішувачів різноманітних конструкцій. Запропоновано новітню конструкцію багатовалового ферментеру, в якому унеможливлено виникнення вортесної воронки

Ключові слова: гідродинаміка, гомогенізація, перемішувач, багатовалова мішалка, ферментер, біологічний агент, напруження зсуву

This article focuses on computer modeling of the hydrodynamic conditions in the fermenter with one-shaft and many-shafts mixing devices. On the basis of the research the features of formation of the vortex was found. Comparative analysis of hydrodynamic fluid flows that arising in volume by the usage of mixing devices of various designs was conducted. A modern design of many-shafts fermenter with avoidance of origin of vortex was made

Keywords: hydrodynamics, homogenization, mixing device, many-shafts mixer, fermenter, biological agent, shear stress

1. Вступ

Розвиток виробництва типових продуктів біотехнології – мікробної біомаси, органічних кислот, виробництво амінокислот та активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) для фармацевтичної промисловості орієнтовано на експлуатацію біологічних агентів (БА) різного фенотипу [1, 2].

Невід'ємним компонентом біотехнологічних виробництв є стадія культивування БА в ферментерах різноманітного конструкційного оформлення та масштабу. Як правило вибір конструкції ферментеру обумовлений специфікою БА та продуктивністю виробництва.

Фармацевтична біотехнологія, особливо та її частина, що обумовлена отриманням АФІ у відповідності з вимогами Належної виробничої практики [3] на етапі «біотехнологія: ферментація/культивування клітин та «класична» ферментація для виготовлення АФІ» формує для конструкторів обладнання специфічні вимоги до розробки та експлуатації ферментерів.

Серед БА – продуцентів біологічно активних речовин та біомаси перші місця за популярністю займають мікроорганізми. Як правило, культивування БА в аеробних умовах обмежується інтенсивністю процесів масопередачі лімітуючих субстратів, серед яких найбільш проблемним є кисень, і це обумовлює вимоги до конструювання ферментерів з високими швидкостями масопередачі кисню на рівні 3–7 кг/м³·год [2].

Сучасне виробництво рекомбінантних білків, вакцин тощо орієнтоване на використання клітин тварин та людини, і в цьому випадку потрібно врахувати такі фенотипічні особливості БА, як формування одно або багаточислової клітинної структури на поверхні носіїв – адгезивна структура та існування суспензійних структур у вигляді окремих клітин та багатоклітинних кластерів. Основним фактором, що

повинен постійно прийматись як критична умова у технічному завданні на проектування ферментерів є рівень зрізових сусиль (зусилля зрізу). Промислове культивування клітин гібридом, клітин СНО та інших клітинних культур суттєво ускладнюється неможливістю присутності в культуральному середовищі інтенсивних потоків газорідної дисперсії та бульбашок аераційної фази [4, 5].

2. Літературний огляд та постановка проблеми щодо визначення принципів конструювання ферментерів

Практично, весь спектр способів оформлення процесів промислового культивування БА для отримання АФІ базується на організації штучно створених *in vitro* умов зовнішнього оточення для отримання максимальної кількості метаболітів при максимально повній експлуатації генетичного потенціалу продуцентів біомаси і БАР.

Ферментери представляють собою найбільш вдалий варіант конструкційного оформлення біотехнологічних процесів, в яких процес перемішування направлений на гомогенізацію поживного середовища та забезпечення транспорту розчинених у рідкій фазі компонентів живлення. Вибір, моделювання, розрахунок та конструювання ферментерів є задачею біоінженерії, якою переймаються інженери-конструктори та технологи для реалізації процесів біосинтезу.

Конструювання біотехнологічної апаратури враховує тип системи, в якій проходять метаболічні процеси. Однозначно сформована позиція про те, що культивування реалізується у складній рідкій гетерогенній системі, у якій присутні, як правило, 3–4 фази, що розділені фазовою поверхнею:

– рідка фаза – вода у якій розчинені (дисперговані) компоненти поживного середовища;

– квазітверда фаза – клітини біологічних агентів;
– газова фаза, що представлена аеруючим повітрям (двоокисом вуглецю) та газовими метаболітами;
– тверда фаза, фаза, що знаходиться в процесі розчинення (суспензія буферної речовини) або представлена інертною структурою – носій для іммобілізації клітин [4, 5].

Суттєвою складовою процесу культивування, що ускладнює розробку конструкції ферментерів є постійна зміна умов оточення БА, що обумовлена накопиченням біомаси, синтезом метаболітів, падінням концентрації субстратів, зменшенням об'єму культурального середовища. Один з небагатьох параметрів, що мало змінюється або підтримується – температура.

Невід'ємною компонентою культивування БА є процес перемішування, від інтенсивності якого залежить співвідношення між турбулентною та молекулярною дифузиею і це обумовлює швидкість транспорту поживних речовин до активних центрів БА. Масштаб турбулентних пульсацій суттєво впливає на зміни поверхні масопередачі (процес дробіння) і альтернативного явища – коалесценцію. Теорія турбулентності в процесах перемішування дозволяє оцінити масштаб та інтенсивність турбулентності. У відповідності з теорією ізотропної турбулентності Колмогорова культуральні рідини, що мають значну в'язкість потребують перемішування, розмір якого (розмір турбулентних пульсацій) співпадає з розміром клітин або клітинних кластерів (при культивуванні еукариотичних клітин) [6].

Ця вимога до розміру турбулентних пульсацій обумовлена тим, що для інтенсифікації біосинтезу великомасштабні пульсації малоефективні зважаючи на їх специфіку, яка полягає у тому що шар рідини, що прилягає до плоскої поверхні, і обертається (мішалка) або контактує з стінкою апарата (нерухома конструкція) настільки прилягає до неї, що рухається разом із мішалкою або залишається нерухомим у випадку пристінної поверхні. Внаслідок молекулярних зв'язків цей шар захоплює за собою наступний і т. д. Оскільки нижній шар прилягає до нерухомої поверхні, його швидкість дорівнює нулю. Таким чином, в рідині виникає шаруватий рух з градієнтом розподілу швидкостей. Внаслідок дії міжмолекулярних зв'язків між різними рухомими шарами рідини виникають сили в'язкості або внутрішнього тертя. Ці сили визначають рівень зрізових зусиль (зусиль зрізу) що можуть ушкоджувати БА. Перелічені специфічні фактори умов культивування визначають сучасні тенденції у конструюванні ферментерів [4].

Одним з можливих напрямів створення ефективних конструкцій з керованими гідродинамічними параметрами є розробка ферментерів з багатоваловими імперерами, що генерують мілкомасштабні пульсації у достатньо обмеженій зоні, а для гомогенізації (розповсюдження отриманого ефекту) використовується система циркуляції, наприклад, ерліфтні контури.

Суттєвою особливістю конструювання та експлуатації ферментерів є врахування ексклюзивності біотехнологічних процесів, що ставить під сумнів можливість створення універсальних реакторів для широкого спектру типів культивування БА. Практично всі відомі ферментери представлені конструкція-

ми, що базуються на теорії та практиці роботи хімічних реакторів, і в основному обладнання представлене вертикальними реакторами з введенням в них енергії різними способами [7]:

- компримованим газом;
- механічним перемішувачем;
- потоком рідини.

Серед ферментерів відомих конструкцій традиційними є реактори з вертикальним коаксіальним розташуванням валу мішалки. Досвід експлуатації підтверджує перспективність такої конструкції, але ферментери великих об'ємів не забезпечують вимоги конструкторів та експлуатаційників стосовно вібростійкості, зважаючи на консольність валів. Ще однією вадою даного конструкційного рішення є формування вортексної воронки при неможливості використання відбійних перегородок в емалірованих та інших реакторах з внутрішнім покриттям [8].

Претендуючи на можливість розробки конструкції ферментера з некоаксіальним розташуванням валу ми прийшли к створенню багатовалової конструкції вертикального реактора. Дане технічне рішення дозволить уникнути хибного впливу на клітинні оболонки БА надмірних енергій зрізових зусиль, що виникають не при ударній дії механічної конструкції, як це описують в деяких джерелах інформації, а при терті взаємодіючих фаз. Сформована концепція потребує досліджень гідродинаміки моделі багатовалового ферментера.

Як правило дослідження гідродинаміки в ферментерах з механічними перемішувачами має своєю метою визначення базової залежності у вигляді критеріального рівняння Ейлера:

$$Eu = f(Fr, Re, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots).$$

Отримана інформація про тип мішалки, при існуючих параметрах середовища, в подальшому використовується для розрахунку інтенсивності процесів масопередачі. Суттєвим елементом дослідження гідродинаміки є визначення характеру руху рідини або газодисперсної суміші. Визначення і аналіз поля швидкостей рідкофазних потоків є шляхом для отримання важелів керування процесами культивування [8].

Швидкість потоку рідини і турбулентність вимірюється в різних по своїм в'язкістним і дисперсним властивостям середовищах і широкому діапазоні вимірювання цих величин (наприклад для швидкості від $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^4$ м/с). Складність таких вимірювань у культуральних середовищах і також значний інтервал вимірювання величин призвели до створення великої кількості нестандартних методів та приладів, що ускладнює їх правильний вибір навіть для конкретних умов і задач [9–11].

Прилади для вимірювання швидкості потоку можна класифікувати по різним ознакам і їх умовно можна розділити на два типи: контактні (зондові) і безконтактні. Контактні методи вимірювання швидкості і турбулентності найбільш розроблені і особливо часто використовуються в експериментальних дослідженнях. Контактними методами поле швидкостей можна виміряти трьома способами: зондуванням і скануванням потоку, а також за допомогою компле-

ксного вимірювання. Взаємодії можуть бути гідродинамічними, термодинамічними, магнітогідродинамічними і електрогідродинамічними.

Динамічні методи вимірюють локальну швидкість несучого середовища, кінематичні – швидкість дискретного середовища (міток).

Безконтактні методи в основному оптичні. Безконтактні методи вимірювання поля швидкостей в рідинному потоці базується на способі мічення малого об'єму рідини і за допомогою відповідних вимірювальних засобів простежується рух малого об'єму (мітки). Хоча для контролю міток можуть бути використані різноманітні способи, практично застосовуються тільки оптичні, що забезпечують максимальну просторову роздільну здатність. Крім того оптичні методи володіють високою часовою роздільною здатністю, їх результати не залежать від параметрів середовища і в потоці відсутні будь-які датчики (зонди). Останнє дуже важливе при вивчення багатозональних і дрібномасштабних потоків. Застосовуються наступні оптичні методи: кінематичні (фотографічні і фотоелектричні) і доплерівські локації. Методи візуалізації, що використовуються для вимірювання швидкості і турбулентності потоку можна розділити на дві основні групи: трасовані мікрочастками і трасовані дискретними мікрочастками. Так як швидкість трасованих мікрочасток часто відрізняється від густини рівновеликого їй об'єму несучої рідини, то величина і напрямок вектору швидкості мітки (частинки) не відповідає величині і напрямку вектора швидкості середовища.

Використання приладів для вимірювання швидкості потоків рідини та газу дозволяє достатньо адекватно оцінити гідродинамічну картину в ферментері, але постійна зміна реології під час культивування не дозволяє визнати отримані результати, як однозначні.

3. Матеріали та методи дослідження гідродинаміки в ферментері з обертовими багатовальними перемішувачами

Проведення досліджень гідродинаміки було реалізоване на установці (рис. 1), що оснащена одноваловим перемішувачем та на установці (рис. 2) з двоваловим перемішувачем.

Експериментальна установка складається з реактора 1 об'ємом 3 літра, закріпленого за допомогою системи кріплення 2 до штативу 3. Над реактором на монтажній площині 4 встановлений електропривід постійного струму 5, оснащений 3-х ступінчастим регулятором швидкості, що дозволяє змінювати число обертів валів перемішувача. Частота обертання відкритих турбінних мішалок 6 зчитується за допомогою цифрового лазерного тахометра з інтерфейсом UT-372. За допомогою мікрокомпресора 7 у барботер 8 подається газова суміш (повітря), що забезпечує інтенсифікацію процесу.

Вали перемішувача 9 з'єднується з електроприводом 2 за допомогою патронів 10. Дві відкриті турбінні мішалки 6 встановлені на кінцях валів. Кришка реактора 11 оснащена штуцерами: 12 – для введення валу перемішувача; 13 – для введення електрода рН-метра; 14 – для введення титранта-індикатора.

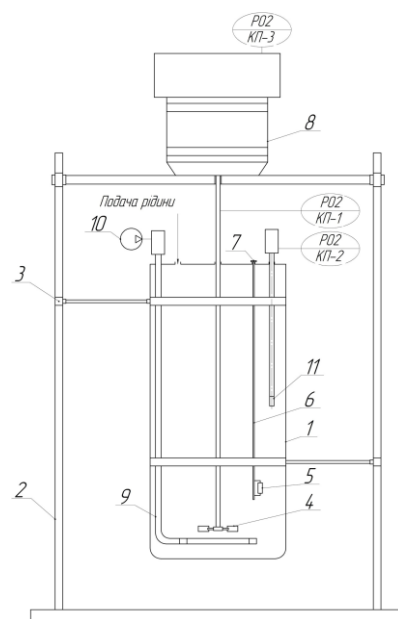


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – реактор; 2 – штатив; 3 – система кріплення реактора зі штативом; 4 – відкрита турбінна мішалка; 5 – циліндричний зразок з кристалогідрату сірчаноокислого алюмінію; 6 – тримач; 7 – фланець; 8 – електропривід постійного струму; 9 – барботер; 10 – мікрокомпресор; 11 – електрод рН-метра; КП-1 – цифровий лазерний тахометр з інтерфейсом UT-372; КП-2 – вторинний прилад рН-метра; КП-3 – регулятор частоти обертів валів перемішувача пристрою

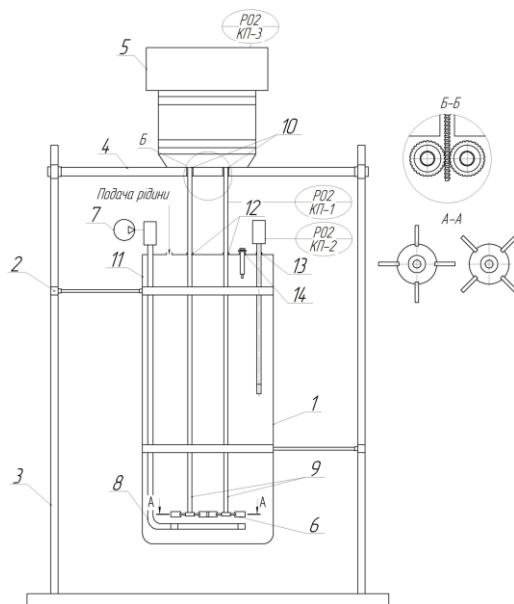


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – реактор; 2 – система кріплення реактора зі штативом; 3 – штатив; 4 – монтажна площина для кріплення електроприводу; 5 – електропривід постійного струму; 6 – відкрита турбінна мішалка; 7 – мікрокомпресор; 8 – барботер; 9 – вали перемішувача; 10 – патрон електроприводу; 11 – кришка реактора; 12 – штуцер для введення валу перемішувача; 13 – штуцер електрода рН-метра; 14 – штуцер для введення титранта-індикатора; КП-1 – цифровий лазерний тахометр з інтерфейсом UT-372; КП-2 – вторинний прилад рН-метра; КП-3 – регулятор частоти обертів валів перемішувача пристрою

4. Обговорення результатів дослідження гідродинаміки

4.1. Обговорення результатів дослідження гідродинаміки в ферментері з одноваловою мішалкою

Математичне моделювання процесу перемішування, що представлено у вигляді потоків рідини, які формуються перемішувачем (відкритою турбінною мішалкою) потребує створення 3D моделі об'єкта (рис. 3). Для забезпечення адекватності моделі платформи ANSYS під номером один визначений об'єм рідини, що обертається навколо поздовжньої осі симетрії ферментеру, позиція 2 визначена як стаціонарна.

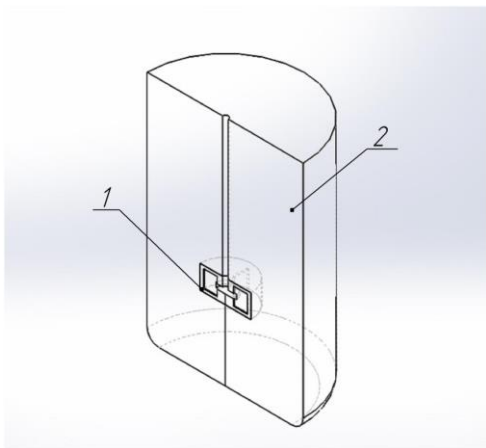


Рис. 3. 3D модель об'єкта з одноваловою мішалкою

Обидва об'єми задаються як рідина і розбиваються на сукупність кінцевих елементів за допомогою вбудованого модуля "Mesh". Взаємодія поверхонь об'єктів, які контактують визначена як «заморожена», тобто швидкість на поверхні одного елемента за величиною і напрямом, в кожній конкретній точці, дорівнює швидкості на поверхні іншого. Зовнішня поверхня стаціонарного об'єму, що дотикається до стінок, описана як нерухома. Для зменшення кількості ітерацій розрахунків розглядається лише половина об'єму ферментеру, причому площини, що утворилися внаслідок цього допущення приймаються такими, що періодично обертаються (для обох об'ємів). Поверхня, утворена в місці контакту мішалки з рухомих об'ємом рідкої фази визначена як нерухома, в свою чергу поверхня валу, що знаходиться в стаціонарному об'ємі прийнята рухомою. Стаціонарний об'єм розбитий на два: об'єм рідини і об'єм повітря, що знаходиться над ним.

Також визначена швидкість обертання рухомого об'єму рідкої фази та валу в стаціонарному об'ємі. Зазначені початкові умови і умови проведення розрахунків (рішення моделі). Рішення моделі дає можливість оцінити поля швидкостей рідини при роботі перемішувача.

На рис. 4 представлені вектори швидкості потоків рідини, які виникають під дією обертального руху перемішувача. Вони сформовані у вигляді кільцевих, радіальних і тангенціальних потоків, внаслідок дії яких відбувається утворення вортєксної воронки. А при подальшому збільшенні числа обертів збільшується інтенсивність потоків, що призводить до збільшення глибини воронки по осі Y (рис. 5).

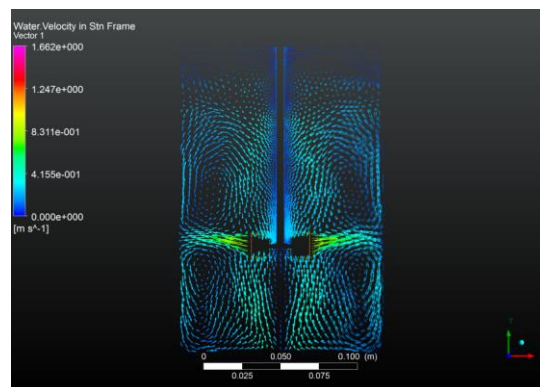


Рис. 4. Вектори швидкості потоків рідини (n=570 об/хв)

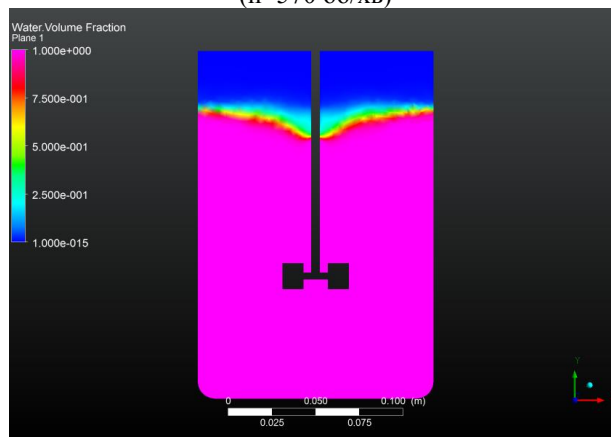


Рис. 5. Модель геометрії воронки отримана на платформі ANSYS (n=570 об/хв)

4.2. Обговорення результатів дослідження гідродинаміки в ферментері з двоваловою мішалкою

Наступним кроком наших досліджень було створення ферментеру в якому будуть відсутні вади пов'язані з утворенням вортєксної воронки. Таким технічним рішенням може бути конструкція, з декількома мішалками, що обертаються в зустрічних напрямках. Нами було проведено дослідження гідродинамічної обстановки на пілотній установці та отримані результати побудованої математичної моделі.

Математичне моделювання процесу перемішування буде відрізнятися наявністю двох об'ємів, що обертаються в зустрічних напрямках з однаковою швидкістю (рис. 6). Усі інші припущення викладені вище залишаються незмінними.

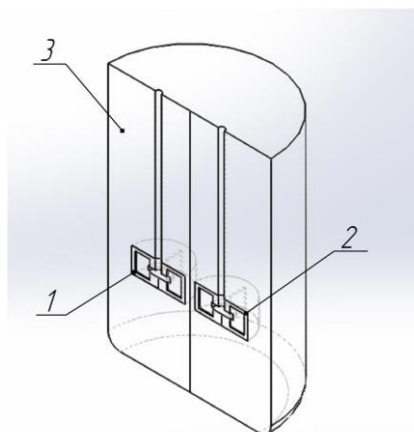


Рис. 6. 3D модель об'єкта з двоваловою мішалкою

На рис. 7 представлені вектори швидкості потоків рідини, які виникають під дією обертового руху двовалового перемішувача. Модель дає адекватну відповідь на те, що вортесна воронка, в цій ситуації, носить принципово інший характер ніж у випадку одновалового перемішувача.

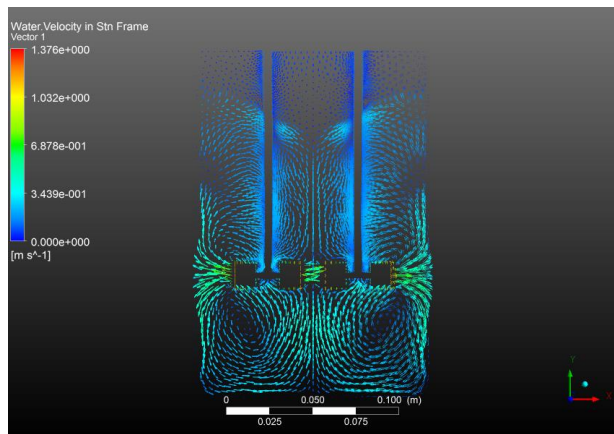
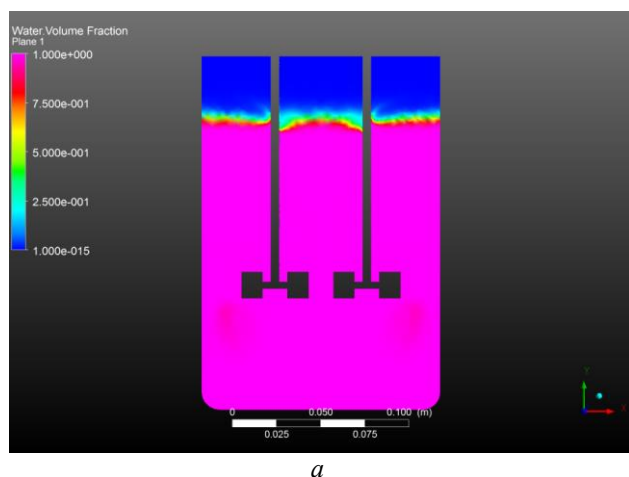
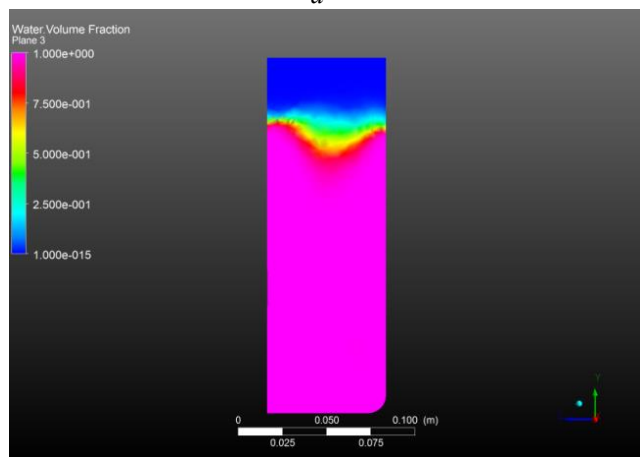


Рис. 7. Вектори швидкості потоків рідини ($n=570$ об/хв)



a



б

Рис. 8. Модель геометрії воронки отримана на платформі ANSYS ($n=570$ об/хв): *a* – площина, в якій розміщують вали мішалок; *б* – площина, в якій розміщується воронка

Вісь воронки під дією зустрічних потоків рідини зміщується з поздовжньої осі ферментера на

величину ексцентриситету і розміщується в площині перпендикулярній до площини розміщення валів обох мішалок (на місці набігання зустрічних потоків) (рис. 8).

5. Висновки

Проведені дослідження і зроблена порівняльна оцінка двох конструкцій ферментерів, що відрізняються кількістю перемішувачів.

Одновалові ферментери при відсутності відбивних перегородок формують вортесну воронку, що не дозволяє забезпечувати сталість гідродинамічних параметрів ферментера і тим самим необхідну інтенсивність масопередачі. Для удосконалення конструкції процес перемішування здійснюється вертикальним багатоваловим багатоярусним перемішувачем. Ця конструкція ферментера дозволяє рівномірно гомогенізувати середовище, утворити додаткові зони турбулізації культуральної рідини тим самим інтенсифікувати масопередачу компонентів поживного середовища, що призводить до підвищення продуктивності ферментера.

Математичне моделювання процесу перемішування дозволило отримати модель геометрії воронки на платформі ANSYS, яка адекватна результатам натурних досліджень.

Література

- Кафаров, В. В. Моделирование биохимических реакторов [Текст] / В. В. Кафаров, А. Ю. Винаров, Л. С. Гордеев. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 344 с.
- Виестур, У. Э. Системы ферментации [Текст] / У. Э. Виестур, А. М. Кузнецов, В. В. Савенков. – Рига: Зинатне, 1988. – 368 с.
- Настанова СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2015 «Лікарські засоби. Належна виробнича практика» [Текст]. – Міністерство охорони здоров'я України, 2015.
- Казенин, Д. А. Гидродинамика, массообмен и энергозатраты в полостных аппаратах с мешалкой [Текст] / Д. А. Казенин, И. В. Чепура, И. А. Петров, В. А. Жаворонков // Теоретические основы хим. технологии. – 2008. – Т. 42, № 2. – С. 128–134.
- Сергеев, В. А. Культуры клеток в ветеринарии и биотехнологии [Текст] / В. А. Сергеев, Ю. А. Собко. – Киев: Урожай, 1990. – 152 с.
- Колмогоров, А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса [Текст] / А. Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. – 1941. – Т. 30, № 4. – С. 299–303.
- Костик, С. І. Математичне моделювання гідродинаміки перемішувача з магнітним приводом [Текст] / С. І. Костик, Л. І. Ружинська, В. Ю. Шибецький, О. О. Ревтов // ScienceRise. – 2016. – Т. 4, № 2 (21). – С. 27–31. doi: 10.15587/2313-8416.2016.67275
- Барабаш, В. М. Проблемы и тенденции развития теории и практики перемешивания жидких сред [Текст] / В. М. Барабаш, В. И. Бегичев, М. А. Белевицкая, Н. Н. Смирнов // Теоретические основы хим. технологии. – 2007. – Т. 41, № 2. – С. 140–147.
- Тимкин, Л. С. Измерение локальной скорости скопления пузырьков в восходящем псевдотурбулентном течении [Текст] / Л. С. Тимкин // Теплофизика и аэромеханика. – 2000. – Т. 7, № 1. – С. 101–114.
- Смоляков, А. В. Измерение турбулентных пульсаций [Текст] / А. В. Смоляков, В. М. Ткаченко. – Ленинград: Энергия, 1980. – 264 с.

11. Ободович, О. М. Дослідження процесу зневоднення мікробіологічних матеріалів в роторно-плівковому випарному апараті [Текст] / О. М. Ободович, С. І. Костик // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 6, № 8 (66). – С. 36–39. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/19126/17077>

References

1. Kafarov, V. V., Vynarov, A. Y., Gordeev, L. S. (1979). Modeling of biomechanic reactors. Moscow: Lesnaya Industriya, 334.
2. Viesturs, U. E., Kuznetsov, A. M., Savenkov, V. V. (1988). Systems of fermentation. Riga: Zynatne, 368.
3. Guidance ST-H Ministry of Health 42-4.0:2015 Medicines. Good Manufacturing Practice (2015). Ministerstvo ohorony zdorov'ja Ukrainy.
4. Kazenyn, D. A., Chapura, Y. V., Petrov, Y. A., Zhavoronkov, V. A. (2008). Hydrodynamics, mass transfer and energy in the cavity apparatus with stirrer. Theoretical Fundamentals of Chemical Technology, 42 (2), 128–134.
5. Sergeev, V. A., Sobko, Yu. A. (1990). Cell cultures in veterinary medicine and biotechnology. Kiev: Urozhay, 152.
6. Kolmogorov, A. N. (1941). The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid at very high Reynolds numbers. Rep. USSR Academy of Sciences, 30 (4), 299–303.
7. Kostyk, S. I., Ruzhinska, L. I., Shybetsky, V. Y., Revtov, A. A. (2016). Mathematical simulation of hydrodynamics of the mixing device with magnetic drive. ScienceRise, 4/2 (21), 27–31. doi: 10.15587/2313-8416.2016.67275
8. Barabash, V. M., Begichev, V. I., Belevitskaya, M. A., Smirnov, N. N. (2007). Problems and tendencies of development of the theory and practice of mixing liquid media. Theoretical bases of the chemical technologies, 41 (2), 140–147.
9. Timkin, L. S. (2000). Measurement of local bubbles sliding speed in the uplink during pseudoturbulence. Thermophysics and Aeromechanics, 7 (1), 101–114.
10. Smol'yakov, A. V., Tkachenko, V. M. (1980). Measurement of turbulent fluctuations. Leningrad: Energy, 264.
11. Obodovych, O. M., Kostyk, S. I. (2013). Investigation dehydration process microbiological materials in a rotary-film evaporator. Eastern-european journal of enterprise technologies, 6/8 (66), 36–39. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/19126/17077>

*Рекомендовано до публікації 0-р техн. наук Мельник В. М.
Дата надходження рукопису 19.04.2016*

Шибецький Владислав Юрійович, кандидат технічних наук, асистент, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: sjavva@mail.ru

Костик Сергій Ігорович, кандидат технічних наук, асистент, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: kostyksergey@ukr.net

Поводзинський Вадим Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: vpovodzinskiy@mail.ru

Кутовий Михайло Григорович, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: mishakutovoy@ukr.net

Закоморний Дмитро Миколайович, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: zakomorniy@gmail.com

УДК 006.91:004.942

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69150

ЕКСПРЕС-МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ДЕФЕКТІВ БІМЕТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИХОРОСТРУМОВОГО ЕФЕКТУ

© Г. О. Оборський, О. Л. Становський, І. В. Прокопович, О. В. Шмараєв, М. О. Духаніна

Проаналізовано проблеми, які виникають при вимірюванні ефективності зварюваності між сталевим і алюмінієвим елементами біметалевих виливків. Запропоновано метод та нове обладнання для такого вимірювання, що представляють собою комплекс тепловізора та вихорострумового дефектоскопа. Комплекс вбудований в систему управління технологічним процесом біметалевого лиття. Застосування методу в ливарному виробництві дозволило знизити брак лиття на 34 %

Ключові слова: система управління, вимірювання, зварюваність металів, біметалічні виливки, тепловізор, вихорострумовий дефектоскоп