

6. Выводы

1. Разработана методика, которая дает возможность исследовать взаимосвязь между квантами и фононами.

2. Проведено исследование зависимости энергии излучения в широком диапазоне частот и температуры, что позволяет записать выражение взаимосвязи между числом фононов и квантов.

Литература

1. Mahan, G. D. Many-Particle Physics [Text] / G. D. Mahan. – New York: Springer, 1981.
2. Kimble, H. J. Photon Anti-bunching in Resonance Fluorescence [Text] / H. J. Kimble, M. Dagenais, L. Mandel // Physical Review Letters. – 1977. – Vol. 39, Issue 11. – P. 691–695. doi: 10.1103/physrevlett.39.691
3. Мочалов, А. А. Исследования температурных характеристик твердого тела на микроуровне с помощью метода структурных единиц [Текст] / А. А. Мочалов, А. А. Гайша, К. Д. Евфимко // Журнал нано- и электронной физики. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 76–80.
4. Мочалов, А. А. Исследование особенностей теплопроводности структурной единицы твердого тела [Текст] / А. А. Мочалов, К. Д. Евфимко, Н. А. Шаповал // Математическое моделирование. – 2014. – № 2 (31). – С. 22–25.
5. Мочалов, А. А. Математическая фононная модель динамической теплопроводности металлов, на базе потенциала межатомного взаимодействия [Текст]: міжнар. наук.-пр. конф. / А. А. Мочалов, Н. О. Шаповал, К. Д. Евфимко // Розвиток інноваційної діяльності в галузі технічних і фізико-математичних наук. – Миколаїв: МНУ, 2016. – С. 147–149.
6. Румер, Ю. Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика [Текст] / Ю. Б. Румер, М. Ш. Рывкин. – М.: Наука, 1972. – 400 с.
7. Боум, А. Квантовая механика: основы и приложения [Текст] / А. Боум. – М.: Мир, 1990. – 720 с.
8. Элементарный учебник физики. Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. Пар. 209. Квантовые и волновые свойства фотона [Текст] / ред. Г. С. Ландсберг. – М.: Физматлит, 2003. – С. 497–504.
9. Кучерук, І. М. Загальний курс фізики. Т. 1–3 [Текст] / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик; ред. І. М. Кучерук. – К.: Техніка, 1999, 2001. – 536 с., 452 с., 520 с.
10. Таблицы физических величин [Текст]: справочник / ред. И. К. Кикоин. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

Дата надходження рукопису 20.04.2017

Мочалов Александр Александрович, доктор технических наук, заведующий кафедрой, кафедра физики, директор, Институт заочного и дистанционного образования, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, Украина, 54025

Шаповал Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, Украина, 54025

Ткаченко Татьяна Александровна, старший преподаватель, кафедра физики, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, Украина, 54025

Бойко Елена Петровна, старший преподаватель, кафедра физики, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, Украина, 54025

УДК 663.18; 573.6.086.835

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.101741

КОНСТРУЮВАННЯ БІОРЕАКТОРІВ З ВВЕДЕННЯМ ЕНЕРГІЇ МЕХАНІЧНИМИ НИЗЬКОЧАСТОТНИМИ КОЛИВАННЯМИ

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

Представлена сучасна концепція проектування біореакторів з введенням енергії низькочастотними механічними коливаннями робочими органами різних конструкцій. Процеси перемішування в біореакторах спрямовані на забезпечення рівномірного розподілення гетерогенної дисперсії – умови ідеального змішування та забезпечення оптимального режиму масопередачі. Визначено, що рух мілкомасштабних пульсацій, розмір яких співвідноситься з транспортними об'єктами забезпечує процеси масопередачі взаємодіючих фаз

Ключові слова: біотехнологія, біоінженерія, біореактор, біологічний агент, масопередача, низькочастотні механічні коливання

1. Вступ

Різноманітність біологічних агентів (БА), що експлуатуються в біотехнології з метою отримання біомаси, метаболітів та трансформації широкого спектру субстратів вимагає адекватного біоінженерного оформлення технологічного процесу. При цьому основною задачею біоінженерії є створення таких умов зовнішнього оточення БА, при яких вони синтезують

ктуру субстратів вимагає адекватного біоінженерного оформлення технологічного процесу. При цьому основною задачею біоінженерії є створення таких умов зовнішнього оточення БА, при яких вони синтезують

максимальну кількість цільового продукту у межах своїх генетично детермінованих властивостей. Забезпечити сформульовану вище задачу можливо при врахуванні специфіки БА або їх кластерів. Найбільш специфічною задачею у біотехнології залишається апаратне оформлення етапу культивування тканинних культур, що лімітується специфікою гідродинамічних процесів, зокрема необхідністю регулювання інтенсивності зрізових зусиль.

Традиційно відомі типи біореакторів орієнтовані на використання перемішувачів пристроїв з оборотним рухом. В сучасному конструюванні біореакторів достатньо відомі апарати з введенням механічної енергії механічними коливальними пристроями, конструюванню яких і присвячене дане дослідження.

2. Літературний огляд

Вимоги, до конструкції біореакторів для проведення асептичного аеробного культивування, що є предметом технічного завдання на розробку конструкції апарату, достатньо відомі і можуть бути сформульовані у таких блоках:

- герметичність конструкції;
- надійність експлуатації;
- регульована інтенсивність гідродинамічних, теплових та масообмінних процесів;
- економічність.

Не зважаючи на різноманітність біотехнологій стадія культивування, як правило, реалізується у реакторах, які характерні у хімічній галузі з введенням енергії на перемішування оборотними механічними пристроями [1–3].

Експлуатаційні параметри реакторів знаходяться на високому технічному рівні, але вони у більшості випадків індіферентні до присутності у середовищі суб'єктів живої природи. Типові біореактори орієнтовані на режими ідеального змішування і серед них практично відсутні колонні апарати, конструкції яких можуть наблизити можливість реалізації процесів ідеального витіснення шляхом створення зонального культивування. Зокрема в таких апаратах з'являється можливість реалізувати відомі фази ростових процесів. Таке конструкційне рішення дає можливість уникнути створення каскаду біореакторів для реалізації безперервних процесів [4].

Використання оборотних перемішувачів пристроїв априорі орієнтоване на інтенсифікацію процесів трансформації речовин у гетерогенній системі. Даного результату можна досягти шляхом зняття зовнішнього дифузійного бар'єру між взаємодіючими фазами. Таким способом дії є створення високотурбулізованого руху компонентів взаємодіючих фаз.

Інтегральна швидкість процесів, що здійснюються у дифузійній області на міжфазних поверхнях зважених у турбулентному потоці взаємодіючих фаз (клітини БА – квазітверда фаза, рідке поживне середовище, повітряна фаза – аеруючий газ) лімітується швидкістю підведення до поверхні розділення фаз і відведення від цієї поверхні взаємодіючих речовин.

Незаперечним фактом є те, що при перемішуванні гетерогенних систем механічними пристроями процес переносу в турбулентному потоці рідини мас

високу інтенсивність на початковій фазі коли при дробінні бульбашок газової фази збільшується міжфазна поверхня. Але подальша інтенсифікація процесу потребує додаткового внесення енергії і вона не завжди ефективно використовується, але її вплив на БА буває доволі негативним.

Процеси перемішування в біореакторах спрямовані на забезпечення рівномірного розподілення гетерогенної дисперсії – умови ідеального змішування та забезпечення оптимального режиму масопередачі.

В більшості випадків ефективність біосинтетичних процесів лімітується масопередачею кисню до аеробних БА і це характеризує кисень як лімітуючий субстрат. Причини обумовлені низькою концентрацією кисню у повітрі і його низькою розчинністю у рідких поживних середовищах.

Типові оборотні мішалки в процесі роботи генерують великомасштабні потоки багатофазної дисперсії, які під дією зовнішніх факторів трансформуються у дрібномасштабні. Саме рух мілкомасштабних пульсацій, розмір яких співвідноситься з транспортованими об'єктами забезпечує процеси масопередачі взаємодіючих фаз [5]. В турбулентних потоках дробіння великомасштабних потоків на рухи меншого масштабу здійснюється до тих пір поки вся механічна енергія не перейде у тепло. Оскільки в інтенсифікацію процесів перенесення речовини на поверхнях розділу фаз основний внесок вносять дрібномасштабні потоки, то енергія, що дисипується у рух рідини з проміжними масштабами, втрачається практично марно.

Отже, для досягнення ефективного внесення енергії на процеси переносу в гетерогенних середовищах необхідні більш ефективні способи генерації дрібномасштабних коливальних рухів рідини в робочому об'ємі апарату. Одним з таких способів є використання штучно створених регулярних низькочастотних малоамплітудних пружних коливань рідини в апаратах з механічними низькочастотними коливальними перемішувачами пристроїв [6, 7].

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є аналіз та формування загальних принципів конструювання біореакторів з введенням енергії низькочастотними механічними коливаннями. Розробка перспективних конструкцій біореакторів для культивування різних фенотипічних груп БА.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Розробка концепції конструювання високоспеціалізованих біореакторів з введенням енергії низькочастотними механічними коливаннями

2. Обґрунтування вибору, розробка конструкції та опис роботи перспективних конструкцій біореакторів

4. Біореактори з механічними низькочастотними коливаннями перемішувачів пристроїв

Передача енергії низькочастотних коливань у рідкофазне дисперсне середовище в промислових реакторах реалізується створенням зворотньо-посту-

пального руху взаємодіючих фаз у пульсаційних апаратах та створення коливального руху рухомою конструкцією перемішуючого пристрою.

Конструкція пульсаційних апаратів передбачає жорстке закріплення перемішуючих пристроїв (насадок) всередині апаратів, а пульсаційні імпульси поступають в них від автономних генераторів коливань. При створенні пульсаційних коливань в якості робочого органу зазвичай використовують газову фазу, а в якості пульсаторів – золотникові розподілюючі механізми [7, 8].

Апарати з вібраційними перемішувачами характеризуються наявністю насадки, що здійснює коливальні рухи що отримані від вібраторів (механічних, електричних і т. д.).

Конструктивні особливості вібраційних апаратів, як правило, визначаються характером вібраційних коливань, що здійснюються насадкою перемішуючого пристрою. В більшості апаратів напрямок вібраційних коливань насадок співпадає з поздовжньою (вертикальною) віссю апарата. В ряді конструкцій вібраційних апаратів всі елементи перемішуючого пристрою (насадки) жорстко зв'язані зі штангою чи валом і при роботі виконують одиничні по частоті та амплітуді (синхронні) коливання. В ряді інших конструкцій насадка перемішуючого пристрою зібрана в два самостійних пакета, що виконують коливальні рухи з однаковою частотою, але зміщені по фазі на половину періоду, в результаті чого пакети насадок рухаються в протилежних напрямках (асинхронно).

Найбільш популярні промислові колонні апарати з синхронним рухом насадки, що були запропоновані для проведення екстракції. До апаратів цієї групи відноситься реактор з насадкою, що переміщується у вертикальній площині запропонований Ван-Дійком (W. J. Van Diek. Пат. 2011186, 1934 (США). Ван-Дійк в той же час вважається родоначальником пульсаційної техніки, оскільки в зазначеному патенті їм було запропоновано також спосіб накладення пульсаційних коливань на рідкі фази за допомогою механізму розташованого поза апаратом. В цьому випадку насадка закріплена в апараті нерухомо [5, 7].

У наступних конструкціях вібраційних апаратів, наприклад, конструкція апарата Григор'єва з синхронним рухом дисків насадки, перфоровані диски – насадки, як правило, жорстко кріплені на штанзі, що є продовженням штока приводу і вона здійснює зворотньо-поступальний рух.

5. Перспективні конструкції ферментерів для аеробного культивування з введенням енергії механічними низькочастотними коливаннями

Ферментери з вібраційним перемішуванням можна класифікувати за відношенням висоти апарата до його діаметру – H/D . Це апарати змішування, де $H/D \leq 3$, і колонні ферментери – $H/D > 3$, в яких гідродинамічний режим наближається до режиму ідеального витеснення.

Для унеможливлення ушкодження клітин потоками взаємодіючих фаз, що формуються при русі механічних перемішуючих пристроїв необхідна розробка конструкцій перемішуючих пристроїв з «м'якими» і регульованими параметрами переміщення фаз [7, 8]. Для реалізації поставленої мети можуть бути використані конструкції ферментерів [8–13], які оснащені необхідними інженерними системами зовнішнього забезпечення і в яких розташовані насадки що являють собою еластичні перетинки.

Наприклад таким перемішувачем пристроєм може бути пакет гнучких насадок рис. 1, що спираються на радіальні ребра жорсткості розташовані рівномірно по висоті апарату [12]. При вібраційному перемішуванні нижня еластична мембрана, розташована на радіальних підпірках, знаходиться біля днища апарату і слугує для збурення осідаючих клітин. Кожна з мембран виконує роль транспортуючого елемента, направляючи клітини в аераційну зону.

Для культивування БА таких як еукаріотичні культури клітин перспективною є конструкція ферментера з порожнинним штоком і приводом, який встановлений на осі корпусу з можливістю зворотньо-поступального та обертового руху та набором контактних елементів з великою питомою поверхнею, що виконані із напівпроникної мембрани у вигляді дисків з'єднаних перегородками у вигляді спіралі рис. 2, які слугують для імобілізації поверхневозалежних клітин БА.

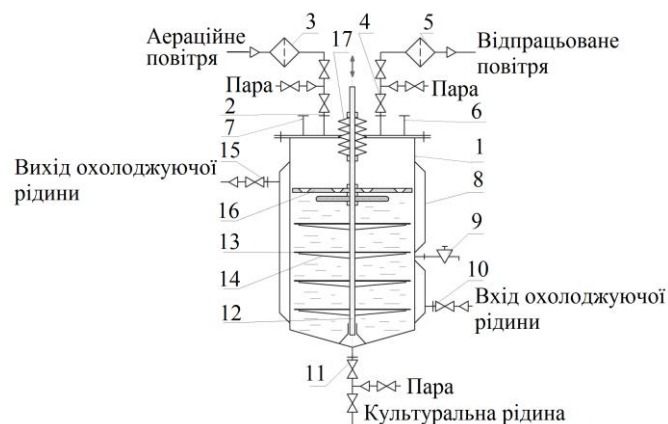


Рис. 1. Ферментер з механічною вібраційною системою перемішування: 1 – корпус; 2, 4, 6, 7, 10, 11, 15 – технологічні штуцера; 3 – фільтр для стерилізації аераційного повітря; 5 – фільтр для стерилізації відпрацьованого повітря; 8 – зовнішня сорочка; 9 – пробовідбірник; 12 – вертикальний шток; 13 – пакет еластичних мембран; 14 – радіальні підпірки еластичних мембран; 16 – аераційний диск з конічними отворами; 17 – сильфон

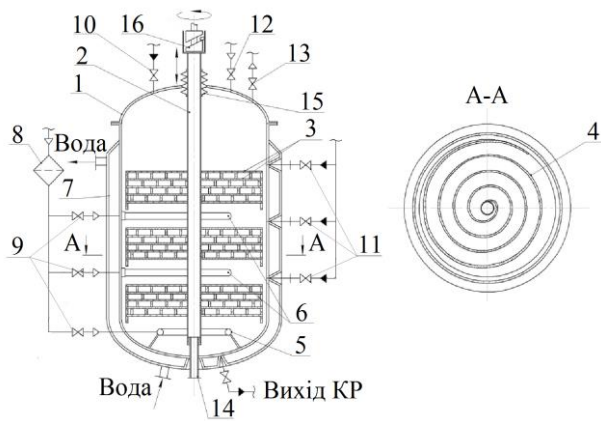


Рис. 2. Схема ферментера з вібраційним перемішуючим пристроєм: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – насадки перемішуючого пристрою; 4 – спіральні перегородки; 5 – стаціонарний барботер; 6 – надувні барботери; 7 – теплообмінна сорочка; 8 – фільтр; 9, 10, 11, 12, 13, 14 – технологічні штуцера; 15 – сифон; 16 – привід

Для зручності монтажу валу з набором перемішуючих елементів в ферментері використовується два типи аераційних пристроїв – стаціонарний барботер та надувні гнучкі барботери, що набувають робочої форми під тиском аераційного повітря. Після закінчення культивування для видалення клітин з поверхні спіралі та дисків вал приводиться у обертовий рух, що забезпечує ефективний змив іммобілізованих клітин завдяки інтенсивній відцентровій силі. Для інтенсифікації процесу видалення клітин БА через штуцер 14 подається розчин трипсину, який змінює адгезивні властивості іммобілізованих клітин.

Культивування клітинних культур та їх клас-терів характеризується специфічними вимогами до умов культивування:

- гарантована герметичність упродовж тривалого процесу культивування;
- відсутність бульбашкової аерації;
- регульовані зрізові зусилля, що виникають в результаті макроперемішування рідкої фази;

Таким умовам задовольняє конструкція, що представлена на рис. 3 [13].

Всередині ферментера монтується аераційно-перемішуючий пристрій, який включає сифон, каркас якого виготовлений з гідрофобного фторопласту з аераційними вікнами з фторопласту меншої товщини ніж каркас, приєднаний до вертикального штоку встановленого на осі ємності з можливістю зворотно-поступального руху у вертикальній площині, для герметизації місця введення штоку в місткість використаний сифон.

Аераційно-перемішуючий сифон при своєму зворотно-поступальному руху у вертикальній площині приводить у дію (переміщує) гнучкі кільцеві перфоровані диски, що прикріплені до внутрішньої стінки ферментера, тим самим забезпечує перемішування культуральної рідини. Відпрацьоване повітря видаляється через порожнистий вал приводу перемішуючого пристрою.

Для біотехнологій кормового білку та інших процесів, в яких потрібен інтенсивний процес масо-передачі цікава конструкція ферментера рис. 4. Біо-

реактор має корпус з технологічними патрубками та перемішуючий пристрій, що складається з вертикального валу з приводом, який встановлений на осі корпусу з можливістю зворотно-поступального руху в вертикальній площині. На штоку закріплені набір перемішуючих елементів конічної форми, що мають перфорацію отворами конічної форми, що виконують роль дифузорів для диспергування газової фази. За рахунок ежекційного ефекту, що виникає в отворах насадок перемішуючого пристрою при русі імелера, відбувається диспергування газової фази, що збільшує площу масообміну в усьому об'ємі апарата. Також в ферментері встановлені кільцеві перегородки, що виконують роль напрямних для газової дисперсії та, при русі перемішуючого пристрою, формують додаткові опори, чим спричиняють додаткове дроблення газової фази. Рівень утвореної при перемішуванні пін регулюється піногасником 6, що закріплені на валу 2 перемішуючого пристрою.

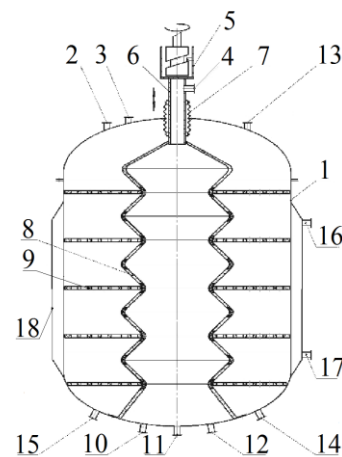


Рис. 3. Схема ферментера з сифонним вібраційним перемішуючим пристроєм: 1 – циліндричний корпус; 2, 3, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17 – технологічні патрубки; 4 – штуцер для виведення надлишкового аераційного повітря; 5 – вібраційний привід порожнистого штоку вібраційного пристрою; 6 – полий шток вібраційного приводу; 7 – сифон; 8 – аераційно-перемішуючий пристрій; 9 – гнучкі перфоровані кільця; 11 – патрубок введення аераційного повітря

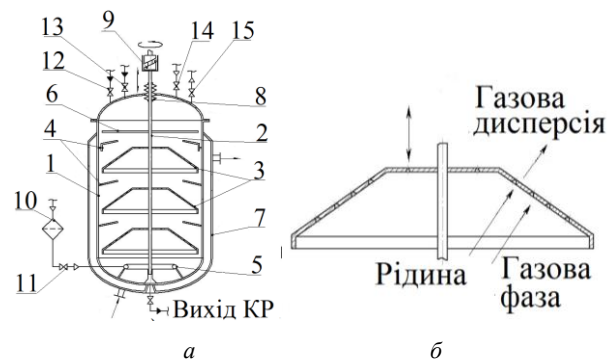


Рис. 4. Ферментер з вібраційним перемішуючим пристроєм: а – схема ферментера: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – насадки перемішуючого пристрою; 4 – перегородки; 5 – барботер; 6 – піногасник; 7 – теплообмінна сорочка; 8 – сифон; 9 – привід; 10 – фільтр; 11, 12, 13, 14, 15 – технологічні штуцера; б – схема потоків взаємодіючих фаз.

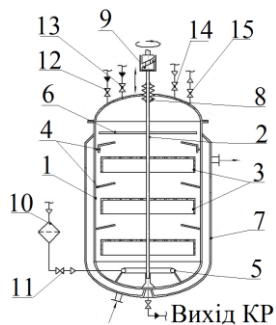


Рис. 5. Схема ферментера з вібраційним перемішувачем: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – насадки перемішувача; 4 – перегородки; 5 – барботер; 6 – піногасник; 7 – теплообмінна сорочка; 8 – сифон; 9 – привід; 10 – фільтр; 11, 12, 13, 14, 15 – технологічні штуцера

При русі насадок перемішувача 3 вниз під ними виникає зона підвищеного тиску, що спричиняє перетікання рідкої та газової фаз через перфорацію насадок рис. 5. Виникаючий при цьому ефект ежекції забезпечує диспергування газової фази, що збільшує питому поверхню масообміну. Під час перемішування газова дисперсія переміщується від нижньої насадки до верхньої, при цьому направляючись напрямними 4 з поверхні нижчої насадки у вни-

трішній об'єм верхньої. За рахунок такого режиму в апараті мінімізуються об'єми застійних зон.

6. Результати досліджень та їх обговорення

Конструювання сучасних високоспеціалізованих конструкцій біореакторів є невідомою частиною біотехнологічного дизайну стадії культивування різноманітних БА. Введення енергії в культуральну рідину низькочастотними механічними коливаннями дозволяє уникнути непродуктивних витрат енергії при генеруванні великомасштабних потоків рідкої фази. Конструкції біореакторів з низькочастотними механічними коливаннями дозволяє забезпечити оптимальні умови зовнішнього оточення для повної експлуатації потенціалу БА

7. Висновки

1. На підставі аналізу відомих конструкцій реакторів з введенням енергії низькочастотними механічними коливаннями виділені перспективні конструкційні елементи, що забезпечують обрану інтенсивність масопередачі.

2. Наведені приклади конструкцій високоспеціалізованих біореакторів з введенням енергії низькочастотними механічними коливаннями.

Література

1. Резенчук, О. С. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з пневматичним перемішуванням [Текст] / О. С. Резенчук, В. М. Поводзинський, В. Ю. Шибецький // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2011. – № 3. – С. 79–84.
2. Закоморний, Д. М. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з механічними перемішувачами в аеробних процесах біотехнології [Текст] / Д. М. Закоморний, В. М. Поводзинський, В. Ю. Шибецький // ScienceRise. – 2015. – Т. 5, № 2 (10). – С. 24–32. doi: 10.15587/2313-8416.2015.42614
3. Копиленко, А. В. Класифікація та аналіз роботи промислових ферментерів з підведенням енергії рідкою фазою [Текст] / А. В. Копиленко, М. Г. Кутовий, В. М. Поводзинський, В. Ю. Шибецький // Наукові праці НУХТ. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 133–143.
4. Виестур, У. Э. Системы ферментации [Текст] / У. Э. Виестур, А. М. Кузнецов, В. В. Савенков. – Рига: Зинатне, 1986. – 367 с.
5. Кафаров, В. В. Моделирование биохимических реакторов [Текст]: монография / В. В. Кафаров, А. Ю. Винаров, Л. С. Гордеев. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 344 с.
6. Карпачева, С. М. Пульсационная аппаратура химической технологии [Текст] / С. М. Карпачева, Б. Е. Рябчикова. – М.: Химия, 1983. – 224 с.
7. Городецкий, И. Я. Вибрационные массообменные аппараты [Текст] / И. Я. Городецкий, А. А. Васин, В. М. Олевский, П. А. Лупанов; ред. В. М. Олевский. – М.: Химия, 1980. – 192 с.
8. Думанский, В. Д. Влияние гидродинамических условий на интерферонсинтезирующую активность спленоцитов свиней при получении альфа-интерферона [Текст] / В. Д. Думанский, С. П. Цыганков, Я. Г. Кишко и др. // Микробиологический журнал. – 1995. – Т. 57, № 3. – С. 71–77.
9. А. С. № 755835 (СССР). Аппарат для выращивания микроорганизмов [Текст] / Стабников В. Н., Лобода П. П., Карлаш Ю. В. – 1980. – № 30.
10. А. С. № 759586 (СССР). Аппарат для выращивания микроорганизмов [Текст] / Стабников В. Н., Лобода П. П., Кузнецов А. М., Карлаш Ю. В. – 1980. – № 32.
11. А. С. № 1773936 (СССР). Аппарат для культивирования микроорганизмов или клеток [Текст] / Думанский В. Д., Карлаш Ю. В., Кишко Я. Г. и др. – 1992. – № 41.
12. Пат. № 71282 UA. Аппарат для вирощування клітин. МПК С12М 3/00, С12М 1/02 [Текст] / Верьовка С. В., Поводзинський В. М., Жолобак Н. М., Карпов О. В., Пенчук Ю. М.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. – № 20031211723; заявл. 16.12.2003; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.
13. Пат. № 72526 UA. Ферментер для культивування клітинних культур. МПК С12 М1/00 [Текст] / Поводзинський В. М., Ружинська Л. І., Шибецький В. Ю., Резенчук О. С.; заявник та патентовласник Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут. – № u201115645; заявл. 30.12.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16. – 5 с.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Мельник В. М.
Дата надходження рукопису 10.04.2017

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

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

Поводзинський Вадим Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Шибецький Владислав Юрійович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056