

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, И. М. Загальний курс фізики. Т. 1–3 [Текст] / И. М. Кучерук, И. Т. Горбачук, П. П. Луцик; ред. И. 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 КОЛІВАННЯМИ

© 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 транспортованими 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 спе-

ктру 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 апаратурне оформлення етапу культивування тканинних культур, що лімітується специфікою гідродинамічних процесів, зокрема необхідністю регулювання інтенсивності зрізових зусиль.

Традиційно відомі типи біореакторів орієнтовані на використання перемішуючих пристрій з обертовим рухом. В сучасному конструкціонному біореакторі достатньо відомі апарати з введенням механічної енергії механічними коливальними пристроями, конструкціоню яких і присвячене дане дослідження 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;
- регульвання інтенсивності 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 обертовими механічними пристроями [1–3].

Експлуатаційні параметри реакторів знаходяться на високому технічному рівні, але вони у більшості випадків індиферентні 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 обертових перемішуючих пристрій априорі орієнтоване на інтенсифікацію процесів трансформації речовин у гетерогеній 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 цією поверхні взаємодіючих речовин.

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

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 бував 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 лімітучий субстрат. Причини обумовлені низькою концентрацією кисню у повітрі і його низькою розчинністю у рідких поживних середовищах.

Типові обертові 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 транспортуваннями 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 таки способів є використання штучно створених регулярних низькочастотних малоамплітудних пружинних коливань рідини в апаратах з механічними низькочастотними коливаннями перемішуючих пристрій [6, 7].

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є наліз та формування загальних принципів конструкціонування 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 конструкціонування 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 перемішуючих пристрій

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 пристрію.

Конструкція пульсаційних апаратів передбачає жорстке закріплення перемішуючих пристріїв (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 перемішуючими пристроями характеризуються, наявністю насадки, що здійснює коливальні рухи що отримані від вібраторів (механічних, електрических і т. д.).

Конструктивні особливості вібраційних апаратів, як правило, визначаються характером вібраційних коливань, що здійснюють насадки перемішуючого пристрію. В більшості апаратів напрямок вібраційних коливань насадок співпадає з поздовжньою (вертикальною) віссю апарату. В ряді конструкцій вібраційних апаратів всі елементи перемішуючого пристрію (насадки) жорстко з'язані зі штангою чи валом і при роботі виконують одиничні по частоті та амплітуді (синхронні) коливання. В ряді інших конструкцій насадка перемішуючого пристрію зібрана в два самостійних пакети, 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. Pat. 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 механізма розташованого поза апаратом. В цьому випадку насадка закріплена в апараті нерухомо [5, 7].

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

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

Ферментери з вібраційним перемішуванням можна класифікувати за відношенням висоти апарату 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 пристріїв необхідна розробка конструкцій перемішуючих пристріїв з «м'якими» і регульованими параметрами переміщення фаз [7, 8]. Для реалізації поставленої мети можуть бути використані конструкції ферментерів [8–13], які оснащені необхідними інженерним системами зовнішнього забезпечення і в яких розташовані насадки що являють собою еластичні перетинки.

Наприклад таким перемішуючим пристроєм може бути пакет гнуучких насадок рис. 1, що спирається на радіальні ребра жорсткості розташовані рівномірно по висоті апарату [12]. При вібраційному перемішуванні нижня еластична мембра, розташована на радіальних підпірках, знаходиться біля днища апарату і слугує для збурення осідаючих клітин. Кожна з мембран виконує роль транспортуючого елементу, 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 зворотно-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 поверхневозалежніх клітин БА.

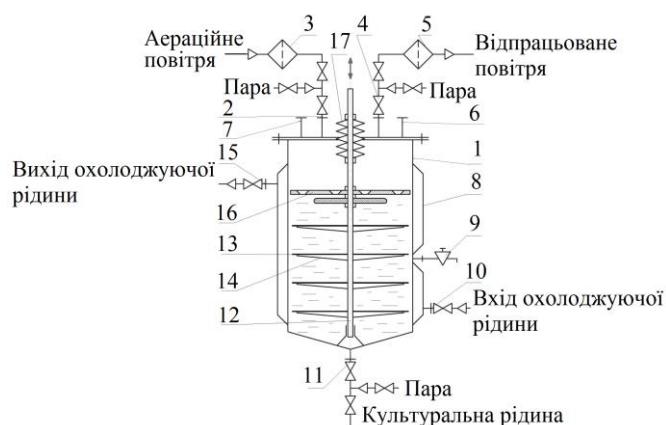


Рис. 1. Ферментер з механічною вібраційною системою перемішування: 1 – корпус; 2, 4, 6, 7, 10, 11, 15 – технологічні штуцера; 3 – фільтр для стерилізації аераційного повітря; 5 – фільтр для стерилізації відпрацьованого повітря; 8 – зовнішня сорочка; 9 – пробовідбірник; 12 – вертикальний шток; 13 – пакет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

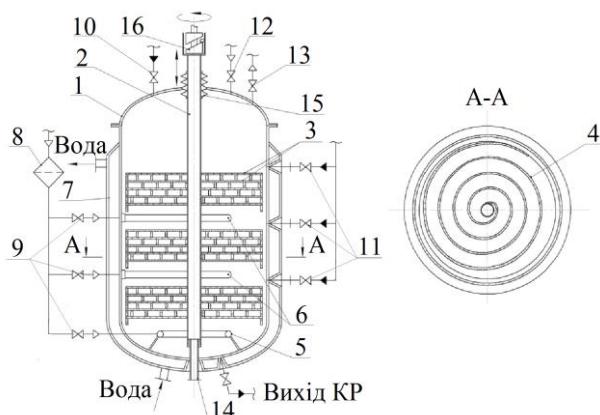


Рис. 2. Схема ферментера з вібраційним перемішуючим пристроєм: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – насадки перемішуючого пристрою; 4 – спіральні перегородки; 5 – стаціонарний барботер; 6 – надувні барботери; 7 – теплообмінна сорочка; 8 – фільтр; 9, 10, 11, 12, 13, 14 – технологічні штуцера; 15 – сильфон; 16 – привід

Для зручності монтажу валу з набором перемішуючих елементів в ферментері використовується два типи аераційних пристрій – 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 імобілізованих клітин завдяки інтенсивній відцентровій силі. Для інтенсифікації процесу видалення клітин БА через штуцер 14 подається розчин трипсину, який змінює адгезійні властивості імобілізованих клітин.

Культивування клітинних культур та їх кластерів 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 задовільняє конструкція, що представлена на рис. 3 [13].

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

Аераційно-перемішуючий сильфон при своєму зворотно-поступальному руху у вертикальній площині приводить у дію (перемішує) гнучкі кільцеві перфоровані диски, що прикріплени до внутрішньої стінки ферментеру, тим самим забезпечує перемішування культуральної рідини. Відпрацюване повітря видаляється через порожнистий вал приводу перемішуючого пристрію.

Для біотехнологій кормового білку та інших процесів, в яких потрібен інтенсивний процес масопередачі цікава конструкція ферментеру 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 закріплений 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 пристрію при русі імпелера, відбувається диспергування газової фази, що збільшує площину масообміну в усьому об'ємі апарату. Також в ферментері встановлені кільцеві перегородки, що виконують роль напрямних для газової дисперсії та, при русі перемішуючого пристрію, формують додаткові опори, чим спричиняють додаткове дроблення газової фази. Рівень утвореної при перемішуванні пін регулюється піногасником 6, що закріплений на валу 2 перемішуючого пристрію.

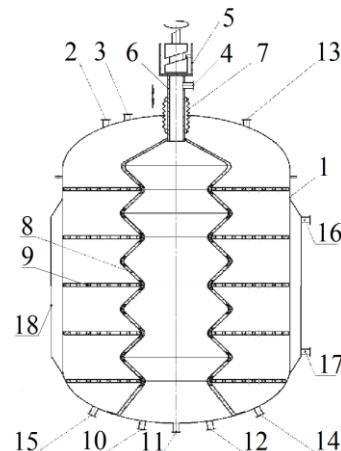


Рис. 3. Схема ферментера з сильфонним вібраційним перемішуючим пристроєм: 1 – циліндричний корпус; 2, 3, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17 – технологічні патрубки; 4 – штуцер для виведення надлишкового аераційного повітря; 5 – вібраційний привід порожнистого штоку вібраційного пристрію; 6 – полій шток вібраційного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

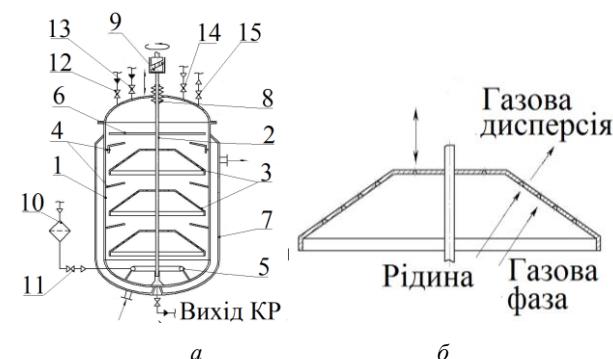


Рис. 4. Ферментер з вібраційним перемішуючим пристроєм: а – схема ферментера: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – насадки перемішуючого пристрою; 4 – перегородки; 5 – барботер; 6 – піногасник; 7 – теплообмінна сорочка; 8 – сильфон; 9 – привід; 10 – фільтр; 11, 12, 13, 14, 15 – технологічні штуцера; б – схема потоків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

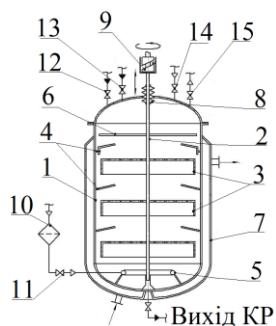


Рис. 5. Схема ферментера з вібраційним перемішуючим пристроєм: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – насадки перемішуючого пристрою; 4 – перегородки; 5 – барботер; 6 – піногасник; 7 – теплообмінна сорочка; 8 – сильфон; 9 – привід; 10 – фільтр; 11, 12, 13, 14, 15 – технологічні штуцери

При русі насадок перемішуючого пристрою 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 переміщається від нижньої насадки до верхньої, при цьому направляючись напрямними 4 з поверхні нижчої насадки у вну-

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 невідємною 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 введеннем енергії низькочастотними механічними коливаннями виділені перспективні конструкційні елементи, що забезпечують обрану інтенсивність масопередачі.

2. Наведені приклади конструкцій високоспеціалізованих біореакторів з введеннем 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 перемішуючими пристроями 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 интерферонсintéтирующую 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., Караплаш Ю. В. – 1980. – № 30.
10. А. С. № 759586 (СССР). Аппарат для выращивания микроорганизмов [Текст] / Стабников В. Н., Лобода П. П., Кузнецов А. М., Караплаш Ю. В. – 1980. – № 32.
11. А. С. № 1773936 (СССР). Аппарат для культивирования микроорганизмов или клеток [Текст] / Думанский В. Д., Караплаш Ю. В., Кишко Я. Г. и др. – 1992. – № 41.
12. Пат. № 71282 UA. Апарат для вирощування клітин. МПК C12M 3/00, C12M 1/02 [Текст] / Веръовка 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 C12 M1/00 [Текст] / Поводзинський В. М., Ружинська Л. І., Шибецький В. Ю., Резенчук О. С.; заявник та патентовласник Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут. – № 201115645; 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