

УДК 636.631.223.018

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.101726

В.М. Мельник, С.В. Фесенко\*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

## ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІНОМ У БІОРЕАКТОРАХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ

**Background.** The main problems that arise when using equipment for cultivation are to ensure the heat and mass transfer processes in devices, presence of turbulent and stagnant zones, high-energy consumption, low heat transfer coefficients when working with viscous fluids.

**Objective.** The aim of the paper is the experimental determination of the remote control heat transfer advantages in production line bioreactors using ultrasonic beam compared to contact methods.

**Methods.** An experimental study of the heat and mass transfer process in a bioreactor on the stand with UZP-6-1 immersion unit of the ultrasonic radiator with radiation frequency 42 kHz is carried out.

**Results.** Sound waves emitted into a liquid form a concentration zone of passable sound energy in the confocal vessel form of a cylindrical surface and force the liquid to move along the inner surface of the glass along the ascending cylindrical spiral, forming a motive flow throughout the volume, causing peripheral layers of liquid and bottom layers to move in a horizontal and vertical planes, without leaving stagnant zones. The closer to the coincidence angle  $\theta_c$  is the directed ultrasonic beam the greater is the effectiveness of the driving flow.

**Conclusions.** The use of sound waves allows obtaining a high-quality product in technological lines based on bioreactors with minimal risk for the technological process. Radiation parameters and working volume physic-mechanical properties change allow fully using the properties of resonant manifestations of the sound wave influence on the working liquid with minimal costs.

**Keywords:** bioreactor; aberration; caustic zone.

### Вступ

“Полювання” за пеніциліном привело до створення біореакторів (ферментерів) – апаратів, у яких здійснюється аеробне або анаеробне вирощування біомаси різних видів: клітин тварин, комах, рослин, мікроорганізмів, грибів. Цей процес потребує дотримання багатьох умов. Окрім підтримки температурного й інших режимів, для ефективного функціонування реактора потрібне постійне перемішування культуральної рідини, що міститься в ньому.

Важко уявити галузь, у якій не використовується процес перемішування. Але є такі галузі, де він є основою виробництва. Це біотехнологія, хімічний синтез, харчова промисловість. Перемішування в рідких середовищах застосовується в промисловості для приготування суспензій, емульсій і отримання гомогенних систем (розчинів), а також для інтенсифікації хімічних, теплових і дифузійних процесів. Мета перемішування визначається призначенням процесу. Під час приготування емульсій для інтенсивного дроблення дисперсної фази необхідно створювати в перемішуваному середовищі

значні зусилля зрізу, залежні від величини градієнта швидкості. У зонах, де градієнт швидкості рідини має велике значення, відбувається найбільш інтенсивне дроблення оброблюваного матеріалу. В разі гомогенізації, приготування суспензій, нагрівання або охолодження перемішуваного гомогенного середовища метою перемішування є зниження концентраційних або температурних градієнтів у об'ємі апарата.

Під час використання перемішування для інтенсифікації хімічних, теплових і дифузійних процесів у гетерогенних системах створюються кращі умови для підведення речовини в зону реакції, до межі розділу фаз або до поверхні теплообміну. Збільшення ступеня турбулентності системи, що досягається при перемішуванні, приводить до зменшення товщини прилежого шару, збільшення і безперервного оновлення поверхні взаємодіючих фаз. Це викликає істотне прискорення процесів тепло- і масообміну. Незалежно від того, яке середовище змішується з рідиною – газ, рідина або тверда сипка речовина, – розрізняють два основних способи перемішування в рідких середовищах. Перший – використання зануреного в рідину

\*corresponding author: monetul@mail.ru

механічного пристрою (простий приклад такої “мішалки” – ложка в склянці кави). Другий варіант – це перемішування за рахунок продування газу через рідину в ерліфтних апаратах. У біореакторах із механічною мішалкою більше 70 % споживаної потужності витрачається на зайве тепло, яке необхідно відводити, а це вимагає додаткових витрат енергії [1].

Є недоліки й у ерліфтних біореакторів: через слабе перемішування вони не придатні для в'язких середовищ; спливаючі повітряні бульбашки “згортаються” при контакті з живими клітинами, які знаходяться в рідині, і завдають їм травмивного удару кавітації. Інтенсивне піноутворення не дає використати весь об'єм апарата, а застосування хімічного піногасника знижує якість кінцевого продукту.

Утім більшість використовуваних у світі біореакторів є комбінацією таких конструкцій. Але все ж таки це не позбавляє від органічних вад, які пов'язані з недостатньою поверхнею масообміну, наявністю турбулентних і застійних зон, високим енергоспоживанням, малими коефіцієнтами при роботі із в'язкими середовищами [1, 2].

Біореактори з мішалкою, як правило, працюють у прийнятному режимі тоді, коли чітко заданий рівень рідини. До найбільш поширених типів мішалок належать лопатеві, турбінні, пропелерні та спеціальні мішалки. Залежно від форми лопатей розрізняють такі види: прості лопатеві, рамні, якірні, грабельні, пропелерні та гребкові.

Лопатевими мішалками називають пристрої, що складаються з двох або більше лопатей прямокутного перерізу, закріплених на вертикальному або похилому валу, що обертається.

Основні переваги лопатевих мішалок – простота пристрою і невисока вартість виготовлення. До недоліків мішалок цього типу слід віднести низьку насосну дію мішалки (слабкий осьовий потік), що не забезпечує достатньо повного перемішування у всьому об'ємі апарата. Внаслідок незначного осьового потоку лопатеві мішалки перемішують тільки ті шари рідини, які перебувають у безпосередній близькості від лопатей мішалки.

Мішалки пропелерного типу використовуються для інтенсивного перемішування рідин із великою в'язкістю. Також вони широко застосовуються для приготування однорідних водних розчинів.

Мішалка пропелерна вважається найбільш ефективною у випадках, коли за мінімальної

витрати механічної енергії необхідно створити потужну циркуляцію рідини в апараті. За рахунок насосного ефекту пропелерні мішалки створюють осьову циркуляцію рідини, вони легко піднімають тверді частинки з дна посудини, завдяки чому використовуються для створення суспензій.

Турбінні мішалки застосовують для інтенсивного перемішування і змішування рідин із в'язкістю до 10 Па. Ці мішалки використовують для скаламучення осадів у рідинах, що містять до 60 % твердої фази. Турбінні мішалки можуть бути двох типів: відкритого і закритого.

Коливання рідини можуть призвести до зміни гідродинаміки і, відповідно, умов культивування, а отже, до небажаних наслідків. [3]

Наявні види біореакторів, за великим рахунком, відповідали вимогам доти, поки дослідники не почали проводити дослідження з клітинами (у т.ч. з ембріональними і гібридомами), які дуже легко руйнуються, не зацікавилися питаннями позаклітинного білкового синтезу, культивуванням клітин комах. Для таких об'єктів стандартне обладнання виявилось малопридатним.

Певний вихід із ситуації знайшли. Були створені біореактори з корпусами, що крутяться, з вітрильними мішалками із м'яких синтетичних матеріалів, навіть із магнітними частинками в суспензії, приведеними в рух магнітним полем, що обертається [2].

Було створено газовихровий безградієнтний біореактор, у якому відбувається культивування клітин, які легко травмуються. У цих апаратах перемішувальний пристрій не занурений у рідину, тобто в рідині створюється тривимірний рух типу “вихрового кільця” (квазі-стаціонарний потік з осьовою протитечією), що обертається. Цим досягається м'яке, дуже ефективне перемішування без утворення піни, гідроударів, кавітації, високотурбулентних і застійних зон [4].

Останнім часом все більша увага концентрується на нетрадиційних, екзотичних засобах тепломасообміну в біореакторах. Найбільш популярним, але мало вивченим до придатності в біореакторах, є ультразвуковий спосіб тепломасообміну [5]. Стендові випробування підтверджують доцільність цього способу як такого, що забезпечує і тепломасообмін, і зміну концентрації проникаючої звукової хвилі та розвиток турбулентності в певних межах і зон помірної активності культуральної рідини [6]. Крім того, цей спосіб дає можливість дистан-

ційно і безконтактно надавати необхідну кінематичну структуру робочій рідині під час технологічного процесу [7]. До таких переваг слід віднести формований дистанційно потужний глобальний рушійний висхідний потік, який інтенсивно обмиває придонні шари та циліндричну поверхню біореактора. За потреби всередині біореактора можна встановлювати деякі, канонічної форми, засоби для розвитку тієї чи іншої інтенсивності турбулентності, а також, навпаки, зон помірної енергетичної активності [8].

Слід звернути увагу на ще одну перевагу ультразвукового перемішування – це ліквідація градієнта температури культуральної рідини по всьому об'єму за 10–15 хв залежно від фізико-хімічних властивостей робочої рідини.

Потужність рушійних потоків – глобального та локального – за необхідного контролю ззовні, через прояв хвильового резонансу колових звукових хвиль корпусу і формування зон каустики “zone kaustikos”, конфокальних до внутрішньої поверхні корпусу біореактора, дає змогу вилучити з біореактора засоби підігріву, які заважають якості технологічного процесу унаслідок щільного налипання біомаси на металеві поверхні пристроїв.

### Постановка задачі

Метою досліджень є експериментальне визначення переваги дистанційного керування тепломасообміном у біореакторах технологічних ліній за допомогою ультразвукового променя над контактними методами.

### Концентрація звукової енергії в робочій рідині на резонансному рівні хвильового збігу за умови формування значного хвильового розміру корпусу біореактора

Якість одержуваного продукту в технологічному процесі, який здійснюється за допомогою біореактора, суттєво залежить від якісного тепломасообміну та безперервного збагачення робочої рідини киснем.

Зрозуміло, що контактні засоби перемішування робочої рідини в біореакторі певною мірою руйнують оболонки мікроорганізмів. Крім того, вони створюють застійні зони на периферії та в придонному прошарку біореактора. Це впливає на якість одержуваного продукту і на ризик прояву невідповідного вимогам технологічного процесу. Крім того, збільшується необ-

хідний для задовільного функціонування технологічної лінії час.

Іншою вадою є процеси налипання біомаси на термобатарей та на днище і бокові поверхні реактора. Налипання біомаси неприпустиме в технологічному процесі, оскільки є основною причиною недостатньої якості продукту.

Зовсім небажаною є наявність градієнта тепла в робочій рідині в радіальному напрямку і по висоті біореактора.

Поза сумнівом, найбільш ефективним і стерильним методом технічної реалізації тепломасообміну є безконтактний метод підігріву.

Проаналізуємо результати експериментального дослідження на стенді із заглибним блоком ультразвукового випромінювача марки УЗП-6-1 процесу тепломасообміну в біореакторі. Частота випромінювання дорівнює 42 кГц.

Усередині скляної посудини циліндричної форми уздовж вертикальної осі закріплена металева пружина у формі циліндричної спіралі (рис. 1).

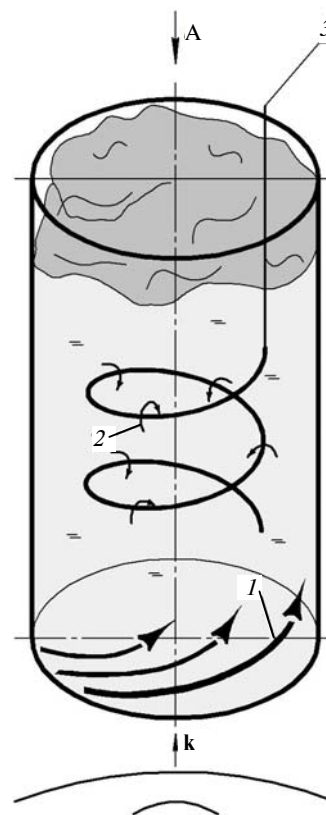


Рис. 1. Опромінення звуковими хвилями металеві пружини в циліндричному корпусі; 1 – глобальний рушійний потік, 2 – локальний обмивний потік, 3 – тримач мідного кільця

Для забезпечення найбільш потужного і ефективного опромінення ультразвуковим пучком необхідно опромінювати зовнішню поверхню посудини ультразвуковим променем під кутом збігу  $\theta_3$ .

За таких значень кута опромінення має місце хвильовий збіг, коли зовнішня звукова хвиля  $P$  проходить усередину практично без втрат енергії. Умови експерименту дають змогу стверджувати, що виконується умова великого хвильового розміру посудини, тобто  $1 \ll kr$ , де  $r$  – радіус,  $k$  – хвильове число.

Виконання умови великого хвильового розміру посудини забезпечується внутрішньою поверхнею елементів корпусу та звуковою хвилею, швидкість якої становить з коловою хвилею кут  $\alpha$ . Це підтверджує наявність аберації звукової хвилі за умови, що швидкість колової хвилі перевищує швидкість звуку в рідині (в нашому випадку питна вода).

Звукові хвилі, що випромінюються в рідину, утворюють зону концентрації прохідної звукової енергії у вигляді конфокальної посудини циліндричної поверхні й змушують рідину рухатися уздовж внутрішньої поверхні склянки по висхідній циліндричній спіралі, утворюючи рушійний потік по всьому об'єму. Таким чином, вони змушують периферійні шари рідини та придонні прошарки рухатися в горизонтальній і вертикальній площинах, не залишаючи застійних зон. Як вже зазначалося, ефективність цього рушійного потоку тим більша, чим ближче до кута збігу  $\theta_3$  напрямлений ультразвуковий промінь.

Температура рідини відносно початкового значення  $22^\circ\text{C}$  (кімнатна температура) за 12 хв піднімається до  $28^\circ\text{C}$  і залишається надалі сталою по всьому об'єму, що забезпечує безградієнтний температурний стан робочої рідини.

Окрім зазначеного, мають місце локальні плинні потоки 2 рідини всередині циліндричної спіралі (див. рис. 1) та потоки 1, які іззовні плинуть усередину спіралі (рис. 2). Наявність трьох потоків створює значну просторову турбулентність уздовж поздовжньої осі посудини.

У площині кожного витка циліндричної спіралі спостерігаються зони активної та пасивної турбулентної робочої рідини у вигляді кругових секторів (див. рис. 2).

Таким чином, усередині біореактора відсутні контактні засоби перемішування і теплообміну, а їх функції напрочуд ефективно ви-

конує рідина під дією проникаючого акустичного випромінювання.

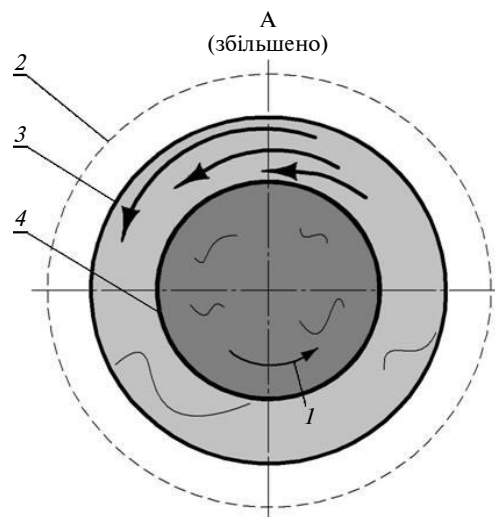


Рис. 2. Турбулізація середовища під дією звукових хвиль; 1 – локальний обмивний потік, 2 – акустичний фронт, 3 – корпус посудини, 4 – мідне кільце

Отже, створюються комфортні умови роботи біореактора, і повністю відсутнє забруднення робочої рідини перемішувачими елементами.

### Висновки

У процесі культивування мікроорганізмів досить значну роль відіграє перемішування середовища, при чому однією з найбільш важливих задач є запобігання механічному пошкодженню клітин. Для розв'язання поставленої задачі створювались біореактори з корпусами, що обертаються, з вітрильними мішалками із м'яких синтетичних матеріалів, з частинками магнетиту в середовищі, які приводяться в рух магнітним полем, що обертається. Були створені газовихрові безградієнтні біореактори, в яких відбувається перемішування без піноутворення, кавітації та застійних зон.

Для розв'язання задачі наших досліджень запропоновано використовувати звукові хвилі, що дає змогу якісно і з мінімальним ризиком порушення технологічного процесу отримувати якісний продукт у технологічних лініях на основі біореакторів. Зміна параметрів опромінення та фізико-механічних властивостей робочого об'єму дає можливість повністю використовувати властивості резонансних проявів впливу звукових хвиль на робочу рідину з мінімальними затратами енергії.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вибір оптимального співвідношення потужності ультразвукового випромінювання і частоти випромінювання залежно від об'єму середовища та конструкції біореактора.

### Список літератури

1. Сидоров Ю.І., Влязло Р.Й., Новіков В.П. Процеси і апарати мікробіологічної та фармацевтичної промисловості. – Львів: Інтеллект-Захід, 2008. – 736 с.
2. Сидоров Ю.І. Лабораторні ферментери ємнісного типу // Біотехнологія. – 2012. – 5. – С. 33–41.
3. Обладнання для вирощування рослинних клітин глибинним способом / Ю.М. Пенчук, О.І. Скроцька, Ю.В. Коломієць та ін. // Харчова промисловість. – 2012. – № 13. – С. 39–42.
4. Безградиентные газо-вихревые биореакторы в современной биотехнологии / В.И. Кислых, Ю.А. Рамазанов, И.П. Косяк, А.П. Репков // Интеграл. – 2005. – № 2 (22). – С. 78–79.
5. Mel'nick V., Karachun V. The emergence of resonance within acoustic fields of the float gyroscope suspension // East.-Eur. J. Enterprise Technol. – 2016. – 1, № 7. – P. 39–44.
6. Durbha K.S., Aravamudan K. Quantification of surface area and intrinsic mass transfer coefficient for ultrasound-assisted dissolution process of a sparingly soluble solid dispersed in aqueous solutions // Ultrasonics Sonochemistry. – 2012. – 19, № 3. – P. 509–521.
7. Pereira, S.V., Colombo F.B., de Freitas L.A.P. Ultrasound influence on the solubility of solid dispersions prepared for a poorly soluble drug // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – 29. – P. 461–469.
8. Mel'nick V., Ruzhinska L., Forostyanko V. Construction of mathematical model of dissolution process of solids under action of ultrasound // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – № 1/3 (33). – P. 28–33.

### References

- [1] Y.I. Sidorov, *Processes and Devices of Microbiological and Pharmaceutical Industries*. Lviv, Ukraine: Intellect-Zahid, 2008 (in Ukrainian).
- [2] Y.I. Sidorov, "Capacitive type laboratory fermenters", *Biotechnologiya*, vol. 5, pp. 33–41, 2012 (in Ukrainian).
- [3] Yu.M. Penchuk *et al.*, "Equipment for remote plant cell growing", *Kharchova Promyslovist*, no. 13, pp. 39–42, 2012 (in Ukrainian).
- [4] V.Y. Kyslikh *et al.*, "Gradientless gas-vortex bioreactors in modern biotechnology", *Intehral*, no. 2 (22), pp. 78–79, 2005 (in Russian).
- [5] V. Mel'nick and V. Karachun, "The emergence of resonance within acoustic fields of the float gyroscope suspension", *East.-Eur. J. Enterprise Technol.*, vol. 1, no. 7, pp. 39–44, 2016. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59892
- [6] K. Durbha and K. Aravamudan, "Quantification of surface area and intrinsic mass transfer coefficient for ultrasound-assisted dissolution process of a sparingly soluble solid dispersed in aqueous solutions", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 19, no. 3, pp. 509–521, 2012. doi: 10.1016/j.ultsonch.2011.09.008
- [7] S.V. Pereira *et al.*, "Ultrasound influence on the solubility of solid dispersions prepared for a poorly soluble drug", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 29, pp. 461–469, 2016. doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.10.022
- [8] V. Mel'nick *et al.*, "Construction of mathematical model of dissolution process of solids under action of ultrasound", *Technology Audit and Production Reserves*, no. 1/3 (33), pp. 28–33, 2017. doi: 10.15587/2312-8372.2017.93629

В.М. Мельник, С.В. Фесенко

### ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІНОМ У БІОРЕАКТОРАХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ

**Проблематика.** Основними проблемами, що постають при використанні обладнання для здійснення культивування, є необхідність забезпечення належного проведення процесів тепломасообміну в об'ємі апаратів, наявність турбулентних і застійних зон, високе енергоспоживання, малі коефіцієнти тепломасообміну при роботі із в'язкими середовищами.

**Мета дослідження.** Експериментальне визначення переваги дистанційного керування тепломасообміном у біореакторах технологічних ліній за допомогою ультразвукового променя над контактними методами.

**Методика реалізації.** Виконано експериментальне дослідження процесу тепломасообміну в біореакторі на стенді із заглубним блоком ультразвукового випромінювача марки УЗП-6-1 із частотою випромінювання 42 кГц.

**Результати дослідження.** Звукові хвилі, що випромінюються в рідину, утворюють зону концентрації прохідної звукової енергії у вигляді конфокальної посудини циліндричної поверхні і змушують рідину рухатися уздовж внутрішньої поверхні склянки по висхідній циліндричній спіралі, утворюючи рушійний потік по всьому об'єму. Таким чином, вони змушують периферійні шари рідини та придонні прошарки рухатися в горизонтальній і вертикальній площинах, не залишаючи застійних зон. Ефективність цього рушійного потоку тим більша, чим ближче до кута збігу  $\theta_3$  напрямлений ультразвуковий промінь.

**Висновки.** Використання звукових хвиль дає змогу з мінімальним ризиком для технологічного процесу отримувати якісний продукт у технологічних лініях на основі біореакторів. Зміна параметрів опромінення та фізико-механічних властивостей робочого об'єму дає можливість повністю використовувати властивості резонансних проявів впливу звукових хвиль на робочу рідину з мінімальними затратами енергії.

**Ключові слова:** біореактор; аберація; зона каустики.

В.Н. Мельник, С.В. Фесенко

#### ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНОМ В БИОРЕАКТОРАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

**Проблематика.** Основными проблемами, которые возникают при использовании оборудования для осуществления культивирования, являются необходимость обеспечения надлежащего проведения процессов тепломассообмена в объеме аппаратов, присутствие турбулентных и застойных зон, высокое энергопотребление, малые коэффициенты тепломассообмена при работе с вязкими средами.

**Цель исследования.** Экспериментальное определение преимущества дистанционного управления тепломассообменом в биореакторах технологических линий с помощью ультразвукового луча по сравнению с контактными методами.

**Методика реализации.** Проведено экспериментальное исследование процесса тепломассообмена в биореакторе на стенде с погружным блоком ультразвукового излучателя марки УЗП-6-1 с частотой излучения 42 кГц.

**Результаты исследования.** Звуковые волны, излучаемые в жидкость, образуют зону концентрации проходимой звуковой энергии в виде конфокальной сосуда цилиндрической поверхности и заставляют жидкость двигаться вдоль внутренней поверхности стакана по восходящей цилиндрической спирали, образуя движущий поток по всему объему. Таким образом, они заставляют периферийные слои жидкости и придонные слои двигаться в горизонтальной и вертикальной плоскостях, не оставляя застойных зон. Эффективность этого движущего потока тем больше, чем ближе к углу совпадения  $\theta_c$  направлен ультразвуковой луч.

**Выводы.** Использование звуковых волн позволяет с минимальным риском для технологического процесса получать качественный продукт в технологических линиях на основе биореакторов. Изменение параметров облучения и физико-механических свойств рабочего объема позволяет полностью использовать свойства резонансных проявлений влияния звуковых волн на рабочую жидкость с минимальными затратами энергии.

**Ключевые слова:** биореактор; аберрация; зона каустики.

Рекомендована Радою  
факультету біотехнології і біотехніки  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
23 червня 2017 року