

**Мельник В. М.**

д.т.н., професор

**Косова В. П.**

асистент

**Жуковська К. В.**

студентка

*Київський політехнічний  
інститут ім. Ігоря  
Сікорського***Melnik V.**

Dr. Sc. of Eng., Professor

**Kosova V.**

assistant

**Zhukovskaya K.**

student

**National Technical  
University of Ukraine "Igor  
Sikorsky Kyiv Polytechnic  
Institute****УДК 628.543****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-4-5****АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ  
ЕНЕРГЕТИЧНИМ СТАНОМ  
РОБОЧОЇ РІДИНИ В  
БІОРЕАКТОРІ НА  
РЕЗОНАНСНОМУ РІВНІ**

Відсутність механічних перемішувачів та досконалий тепломасообмін і інтенсивна аерація робочої рідини суттєво підвищують продуктивність і якість технологічного процесу, що визначає актуальність вивчаємої проблеми. На меті є підвищення продуктивності технологічного процесу, яка вирішується шляхом інтенсифікації тепломасообміну по всьому об'єму апарата за допомогою дистанційного штучного формування резонансного стану культурального середовища і, породженої цим станом енергетичної активності робочої рідини. Завданням роботи слугує штучне формування енергетичної активності робочої рідини в біореакторі за допомогою ультразвукового променя. Методика досліджень ґрунтується на класичних методах теоретичної механіки, методах математичної фізики, теорії тонких оболонок, що забезпечує певність і достовірність результатів. Наводиться одне з можливих технічних рішень штучного формування енергетичної активності робочої рідини в біореакторі за допомогою ультразвукового променя. Окреслюються умови виникнення хвильового співпадання, яке супроводжується різким зростом енергетичної активності поряд з мінімальною дисипацією променевих хвиль. Пояснюється природа додаткової енергетичної активності в зонах каустичних поверхонь двома типами хвиль. Процес культивування організмів, як і більшість гетерогенних хімічних реакцій, безпосередньо залежить від кількості розчиненого в рідині газу і утворення та накопичення цільового продукту, зокрема, біомаси. Таким чином, підвищення ступеня розчинення газу в рідинній фазі реакцій призведе до скорочення його розходу та зменшення енерговитрат на аерацію. Побудовані розрахункові схеми і отримані результати дозволяють оцінити адекватність теоретичних рішень вихідним припущенням і, таким чином, підтвердити їх доцільність для подальшої практичної реалізації. Просторовий резонанс, який створюють усередині корпусу ультразвукові випромінювачі, турбулізує всю рідиннофазову складову вмісту корпусу апарату і примушує газові бульбашки рухатись без перешкод не тільки спрямовано вгору, але і в інших різноманітних напрямках, утримуючи їх довше в робочій рідині, збагачуючи, тим, суміш киснем і створюючи умови для інтенсивного росту клітин.

**Ключові слова:** біореактор, енергетична активність, хвильове співпадання, каустичні поверхні, гранична частота, ультразвуковий промінь



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відома конструкція барботажного апарату для вирощування мікроорганізмів, яка містить ємкість з технологічними патрубками, розміщені в ємкості циркуляційний стакан і аератор, систему рециркуляції середовища, яка складається з відповідного трубопроводу, збудника розходу, підвідного трубопроводу і підключеного до нього пристрою для розбризкування культурального середовища, що розміщений у верхній частині ємкості [1].

Апарат має можливість працювати при підвищеному барботуванні культуральної рідини в ємкості, тобто за інтенсивного постачання мікроорганізмів киснем, отже і за енергійного постачання поживними речовинами. Недоліком цього технічного рішення постає досить висока матеріалоемкість апарату, підвищене піноутворення, відносно невисока продуктивність технологічного процесу внаслідок пасивного перемішування і, практично, ламінарного поступального руху робочої рідини, і тільки паралельно осі апарату а також наявність неминучих при цьому застійних зон в придонному прошарку та на периферії апарату (на внутрішніх бічних стінках), що зумовлене обмеженими можливостями обраного технічного рішення [2].

Відомі також інші конструкції барботажних апаратів, які в тій, чи іншій формі вирішують питання технологічного процесу. Наприклад, забезпечують рух культуральної рідини із змінними швидкостями по всім рівням біореактора, завдяки опуклій формі циркуляційної труби [3]. Формують рух периферійної частини робочої рідини, що знаходиться поза циркуляційної труби, по гвинтовій траєкторії [4]. Активізують рух робочої рідини по всій висоті корпусу, а також в коловому і радіальному напрямку [5]. Кожна з них має свої переваги, але і певні вади згідно вищесказаного.

**Постановка проблеми.** Відомо, що газліфтний барботажний апарат містить вертикально розташований циліндричний корпус з технологічними патрубками і розміщену в порожнині корпусу з радіальним зазором циркуляційну трубу, а також встановлений під циркуляційною трубою аератор [1].

За рахунок більш рівномірного розподілення газу та підвищення його диспергування підвищується продуктивність технологічного процесу.

Пропонується підвищення продуктивності технологічного процесу вирішити шляхом інтенсифікації тепломасообміну по всьому об'єму апарату за допомогою дистанційного штучного формування резонансного стану

культурального середовища і породженої цим станом енергетичної активності робочої рідини.

Поставлена задача вирішується тим, що такий енергетичний стан усуває недоліки відомих конструкцій і пропонує нове ефективне технічне рішення з новим якісним результатом.

Завданням роботи слугує штучне формування енергетичної активності робочої рідини в біореакторі за допомогою ультразвукового променя.

**Метою роботи** - являється підвищення продуктивності технологічного процесу вирішити шляхом інтенсифікації тепломасообміну по всьому об'єму апарату за допомогою дистанційного штучного формування резонансного стану культурального середовища і породженої цим станом енергетичної активності робочої рідини.

**Викладення основного матеріалу.** Найбільш суттєві аспекти концентрації проникної звукової енергії розглянемо на прикладі газліфтного барботажного апарату (рис. 1, а).

Газліфтний барботажний апарат використовується для культивування мікроорганізмів в рідинних середовищах при виготовленні вакцин та біологічно-активних речовин і містить вертикально розташований циліндричний корпус 1 з патрубком 2 для введення живильної рідини і посівного матеріалу, патрубком 3 для видалення культуральної рідини та патрубком 4 для відведення відпрацьованого газу (рис. 1, а). В порожнині корпусу 1, співвісно з ним, на днищі, розміщений аератор 5 (рис. 1, б).

У попередньо простерилізований корпус 1 крізь патрубок 2 вводять робочу рідину, після чого, через аератор 5 впускають стиснений газ (повітря) і послідовно включають, попередньо налаштовані на хвильовий резонанс, ультразвукові випромінювачі 6 і 7. Стиснений газ у вигляді бульбашок 8 підіймається вгору і утворює рідинно-повітряну суміш, яка набагато легша від робочої рідини на периферії внутрішньої порожнини корпусу 1. Технічний результат забезпечується обладнанням ззовні корпусу, протилежно, двома ультразвуковими випромінювачами з регульовим напрямом променів, один з яких формує резонансні коливання з частотою вищою за граничну і функціонально замінює циркуляційну трубу циліндричною каустикою, а другий випромінювач формує резонансні коливання з частотою нижчою за граничну і буде більшого радіуса другу циліндричну каустику поблизу внутрішньої поверхні корпусу апарату, активізуючи периферійні шари.

Прийнявши стальний корпус газліфтного барботажного апарату радіусом



$R = 1$  м і товщиною  $2\delta = 2$  мм, окреслюємо його граничну частоту у  $f_{gp} = 14,457$  кГц, якщо частота ультразвукового променя дорівнює, наприклад,  $f = 42$  кГц.

На частоті ультразвукового випромінювання, вищій за граничну, згинні коливання, швидкість яких залежить від частоти  $\omega$  випромінювання, за певного кута  $\theta_c$  променя породжують резонанс хвильового

співпадання сліду швидкості згинних коливань  $c_{32}(\omega)$  і падаючої хвилі випромінювання  $c_0$  [6],

$$c_{32}(\omega) = \frac{c_0}{\sin \theta_c},$$

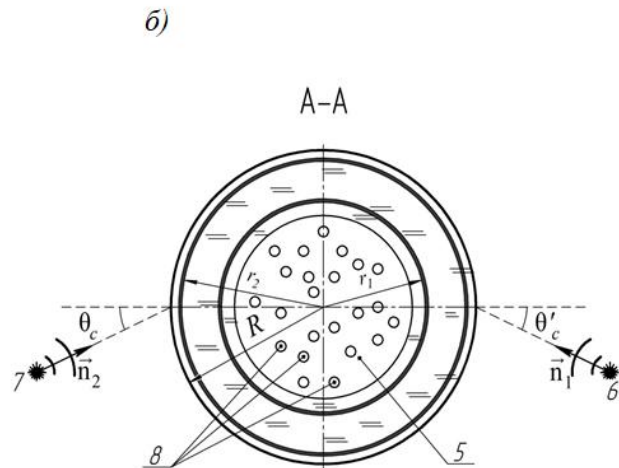
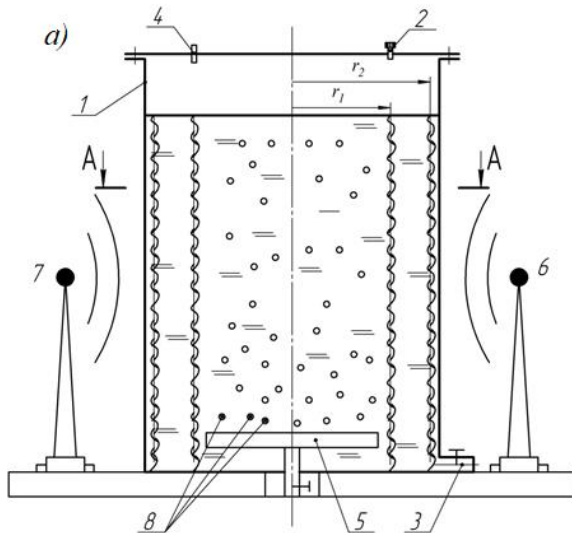


Рис. 1. Газліфтний барботажний апарат в поздовжньому (а) та поперечному (б) перерізі

(причому, кожній частоті  $\omega$  відповідає свій кут співпадання  $\theta_c$ ), що створює ефект акустичної прозорості, коли звукове випромінювання без втрати енергії надходить усередину корпусу апарату. Елементи внутрішньої поверхні корпусу, за умови великого його хвильового розміру, тобто коли

$$kR = \frac{2\pi fR}{c_0} = 176 \gg 1, \text{ випромінюють в}$$

культуральну рідину звукові промені, які внаслідок аберації на кут  $\beta$  формують співвісно осі апарату циліндричну каустику, тобто зону підвищеної енергетики, радіуса [7]

$$r_1 = R \sin \beta = R \frac{c_0}{c_{32}} = 0,30 \text{ (м)}, \quad (1)$$

де

$$c_{32} = \left[ 2E\delta^2 4\pi^2 f^2 (3m_{II})^{-1} (1 - \sigma^2)^{-1} \right]^{1/4};$$

$c_0 = 1500$  мс<sup>-1</sup> - швидкість звука в рідині;  $E$  - модуль Юнга матеріалу корпусу;  $\sigma$  - коефіцієнт

Пуассона;  $m_{II} = 2\rho\delta$  - питома маса;  $\rho$  - щільність.

Відповідно, звуковий випромінювач, який генерує промінь набагато нижчої за граничну частоти, формує в корпусі апарату поздовжні хвилі із швидкістю  $c_{II}$ , які не залежать від частоти випромінювання і, в свою чергу, також породжують ефект хвильового співпадання, який, на відміну від згинних коливань, залежить тільки від кута  $\theta'_c$  співпадання і не залежить від частоти  $\omega$  випромінювання

$$c_{II} = \frac{c_0}{\sin \theta'_c} = 6100 \text{ (мс}^{-1}\text{)}$$

Ці коливання, за умови, що  $c_{II} > c_0$ , будуть випромінювати в рідину звукові хвилі під кутом  $\alpha$ , які утворять також циліндричну каустику, але радіуса [8, 9]:

$$r_2 = R \cos \alpha = R \sqrt{1 - \frac{c_0^2}{c_{II}^2}} = 0,97 \text{ (м)}, \quad (2)$$



яка буде знаходитися біля поверхні внутрішньої сторони корпусу і створить енергетичну активність робочої рідини на периферії.

Таким чином, формування хвильового співпадання штучно генеруємих згинними, а також поздовжніми хвилями корпусу апарату, приведе в резонансний стан культуральну рідину, збудить її по всьому об'єму, ліквідує малоактивні і застійні зони. Циліндричні каустики вздовж осі апарату і біля його стінок додатково збудять робочу рідину і сприятимуть подальшій інтенсифікації процесів тепломасообміну і аерації, що, в свою чергу, підвищить продуктивність і якість технологічного процесу [10].

Якщо  $C_{II} = C_0$ , поверхня більшої каустики обернеться на геометричне місце точок, які знаходяться на осі корпусу..

Створення енергетично активного, турбулентного стану в робочій рідині без додаткових механічних засобів, просторовий рух повітряно-рідинної суміші, штучне збільшення часу взаємодії бульбашок кисню з робочою рідиною та відсутність в порожнині корпусу додаткових елементів конструкції для регулювання технологічного процесу, забезпечують однорідність суміші по всьому об'єму, ліквідує зони пасивної енергетики в апараті, мінімізують ефект налипання до поверхні корпусу біореактора.

**Висновок.** Таким чином, використання ультразвукового опромінювання корпусу газліфтного барботажного апарату, завдяки новим властивостям, забезпечить енергетичну активність робочої рідини по всьому об'єму апарату, що суттєво підвищить продуктивність технологічного процесу і його якість.

Штучне формування енергетичної активності робочої рідини ультразвуковим променем на резонансному рівні дозволяє ефективно управляти технологічним процесом, підвищувати продуктивність і якість вихідного продукту.

Технічна реалізація конструкції не обтяжена визначаючим ростом матеріалоемкості, натомість, надає можливість для автоматизації всього технологічного процесу, забезпечення стерильності продукту, здійснення поточного керування енергетичним станом робочої рідини.

#### Список використаних джерел

1. Газліфтний барботажний апарат: а.с. 1708829 AI СССР, С12М1/04. №4612860/13; заявл. 01.12.88; опубл. 30.01.92, Бюл. №4.-1 с.
2. Апарат для вирощування мікроорганізмів: а.с. 147208 AI СССР,

С12М1/04. №4109725/28-13; заявл. 21.08.86; опубл. 30.07.89, Бюл. №28.-1 с.

3. Газліфтний барботажний апарат: пат. № 43558 Україна, МПК С 12 М 1/04. u 200901835; заявл. 02.03.2009; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.

4. Газліфтний барботажний апарат: пат. № 40230 Україна, МПК С 12 М 1/04 u 200813427; заявл. 20.11.2008; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

5. Газліфтний барботажний апарат: пат. № 78382 Україна, МПК С 12 М 1/04 u 2012 13327; заявл. 22.11.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.

6. Cremer, L. (1942) Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall Akust: Zeitschrift,7, Str 3-7.

7. Шендеров, Е.Л. (1972) Волновые задачи гидроакустики: моногр Л.: Судостроение,.-352 с.

8. Gösele, K. (1960) Zur Körperschallausbreitung in Wohubauten Körperschall in Gebäuden: Berlin.. Str 24-24.

9. Heckl, M. (1960) Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche: Acustica, 10, Str 17-21.

10. Junger, M.C. Smith P.W (1955) Letter to the editor: Acustica, 5,1., Str 43-46.

#### References

1. Hazlyftnii barbotazhnyi apparat: a.s. 1708829 AI SSSR, S12M1/04. №4612860/13; zaiavl. 01.12.88; opubl. 30.01.92, Biul. №4.-1 s.

2. Aparat dlia virashchivanyia mykroorhanyzmov: a.s. 147208 AI SSSR, S12M1/04. №4109725/28-13; zaiavl. 21.08.86; opubl. 30.07.89, Biul. №28.-1 s.

3. Hazlyftnyi barbotazhnyi aparat: pat. № 43558 Ukraina, MPK S 12 M 1/04. u 200901835; zaiavl. 02.03.2009; opubl. 25.08.2009, Biul. № 16.

4. Hazlyftnyi barbotazhnyi aparat: pat. № 40230 Ukraina, MPK S 12 M 1/04 u 200813427; zaiavl. 20.11.2008; opubl. 25.03.2009, Biul. № 6.

5. Hazlyftnyi barbotazhnyi aparat: pat. № 78382 Ukraina, MPK S 12 M 1/04 u 2012 13327; zaiavl. 22.11.2012; opubl. 11.03.2013, Biul. № 5.

6. Cremer, L. (1942) Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall Akust: Zeitschrift,7, Str 3-7.

7. Shenderov, E.L. (1972) Volnovie zadachy hydroakustyky: monohr L.: Cudostroenye,.-352 s.

8. Gösele, K. (1960) Zur Körperschallausbreitung in Wohubauten Körperschall in Gebäuden: Berlin.. Str 24-24.

9. Heckl, M. (1960) Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche: Acustica, 10, Str 17-21.



10. Junger, M.C. Smith P.W (1955) Letter to the editor: *Acustica*, 5,1,. Str 43-46.

### АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В БИОРЕАКТОРЕ НА РЕЗОНАНСНОМ УРОВНЕ

Отсутствие механических перемешивающих устройств и совершенный теплообмен и интенсивная аэрация рабочей жидкости повышают производительность и качество технологического процесса, что определяет актуальность изучаемой проблемы. Целью является повышение производительности технологического процесса, которая решается путем интенсификации теплообмена по всему объему аппарата с помощью дистанционного искусственного формирования резонансного состояния культуральной среды и порожденной этим состоянием энергетической активности рабочей жидкости. Задачей работы служит искусственное формирование энергетической активности рабочей жидкости в биореакторе с помощью ультразвукового луча. Методика исследований основывается на классических методах теоретической механики, методах математической физики, теории тонких оболочек, что обеспечивает уверенность и достоверность результатов. Приводится одно из возможных технических решений искусственного формирования энергетической активности рабочей жидкости в биореакторе с помощью ультразвукового луча. Намечаются условия возникновения волнового совпадения, сопровождающегося резким ростом энергетической активности наряду с минимальной диссипацией лучевых волн. Разъясняется природа дополнительной энергетической активности в зонах каустических поверхностей двумя типами волн. Процесс культивирования организмов, как и большинство гетерогенных химических реакций, напрямую зависит от количества растворенного в жидкости газа и образования и накопления целевого продукта, в частности биомассы. Таким образом, повышение степени растворения газа в жидкостной фазе реакций приведет к сокращению его расхода и уменьшению энергозатрат на аэрацию. Построенные расчетные схемы и полученные результаты позволяют оценить адекватность теоретических решений исходным предположениям и таким образом подтвердить их целесообразность для дальнейшей практической реализации.

*Пространственный резонанс, создающий внутри корпуса ультразвуковые излучатели, турбулизует всю жидкофазную составляющую содержимого корпуса аппарата и заставляет газовые пузыри двигаться без помех не только направлено вверх, но и в других различных направлениях, удерживая их дольше в рабочей жидкости, обогащая, тем, создавая условия для интенсивного роста клеток.*

**Ключевые слова:** биореактор, энергетическая активность, волновое совпадение, каустические поверхности, предельная частота, ультразвуковой луч.

### AUTOMATIC CONTROL OF THE ENERGY STATE OF THE WORKING LIQUID IN THE BIOREACTOR AT THE RESONANCE LEVEL

*The absence of mechanical mixing devices and perfect heat and mass transfer and intensive aeration of the working fluid significantly increase the productivity and quality of the technological process, which determines the relevance of the studied problem. The aim is to increase the productivity of the technological process, which is solved by intensifying heat and mass transfer throughout the apparatus by remote artificial formation of the resonant state of the culture medium and the energy activity of the working fluid generated by this state. The task of the work is the artificial formation of the energy activity of the working fluid in the bioreactor using an ultrasonic beam. The research methodology is based on classical methods of theoretical mechanics, methods of mathematical physics, theory of thin shells, which ensures the reliability and reliability of the results. One of the possible technical solutions of artificial formation of energy activity of the working fluid in the bioreactor by means of an ultrasonic beam is given. The conditions for the occurrence of wave coincidence, which is accompanied by a sharp increase in energy activity along with minimal dissipation of radiation waves, are outlined. The nature of additional energy activity in the zones of caustic surfaces by two types of waves is explained. The process of culturing organisms, like most heterogeneous chemical reactions, directly depends on the amount of gas dissolved in the liquid and the formation and accumulation of the target product, in particular biomass. Thus, increasing the degree of dissolution of the gas in the liquid phase of the reactions will reduce its consumption and reduce energy consumption for aeration. The constructed calculation schemes and the received results allow to estimate adequacy of theoretical decisions by initial assumptions and, thus, to confirm their expediency*



for the further practical realization. The spatial resonance created inside the housing by ultrasonic emitters turbulizes the entire liquid-phase component of the housing and causes the gas bubbles to move without hindrance not only upwards, but also in other various directions,

keeping them longer in the working fluid, thus enriching the mixture. creating conditions for intensive cell growth.

**Key words:** bioreactor, energy activity, wave coincidence, caustic surfaces, cutoff frequency, ultrasonic beam

#### **Відомості про авторів**

**Мельник Вікторія Миколаївна** д.т.н., професор, завідувач кафедри біотехніки та інженерії Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, факультет біотехнології і біотехніки, [vmm71@i.ua](mailto:vmm71@i.ua), 0936999568

**Косова Віра Петрівна** асистент кафедри біотехніки та інженерії, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, факультет біотехнології і біотехніки, [vera\\_62@ukr.net](mailto:vera_62@ukr.net), 0665445843

**Жуковська Карина Володимирівна** студентка, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, факультет біотехнології і біотехніки, [zhukovskayakarina07@gmail.com](mailto:zhukovskayakarina07@gmail.com), 0442049451

**Мельник Виктория Николаевна**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой биотехники и инженерии Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, факультет биотехнологии и биотехники, [vmm71@i.ua](mailto:vmm71@i.ua), 0936999568

**Косова Вера Петровна** ассистент кафедры биотехники и инженерии, Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, факультет биотехнологии и биотехники, [vera\\_62@ukr.net](mailto:vera_62@ukr.net), 0665445843

**Жуковская Карина Владимировна** студентка, Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, факультет биотехнологии и биотехники, [zhukovskayakarina07@gmail.com](mailto:zhukovskayakarina07@gmail.com), 0442049451.

**Melnyk Victoria**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Biotechnology and Engineering Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky, Faculty of Biotechnology and Biotechnology, [vmm71@i.ua](mailto:vmm71@i.ua), 0936999568

**Kosova Vera** Assistant of the Department of Biotechnology and Engineering, Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky, Faculty of Biotechnology and Biotechnology, [vera\\_62@ukr.net](mailto:vera_62@ukr.net), 0665445843

**Zhukovska Karina** student, Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, Faculty of Biotechnology and Biotechnology, [zhukovskayakarina07@gmail.com](mailto:zhukovskayakarina07@gmail.com), 0442049451