

**Мельник Вікторія Миколаївна**

*доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біотехніки та інженерії,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

**Карачун Володимир Володимирович**

*доктор технічних наук, професор, професор кафедри біотехніки та інженерії,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

**Форостянко Віталій Сергійович**

*магістр*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

**Мельник Виктория Николаевна**

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры биотехники и инженерии,  
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

**Карачун Владимир Владимирович**

*доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биотехники и инженерии,  
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

**Форостянко Виталий Сергеевич**

*магистр*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

**Mel'nick V.**

*doctor of technical sciences, professor,  
National Technical University of Ukraine, Kiev Polytechnic Institute*

**Karachun V.**

*doctor of technical sciences, professor,  
Head of the Department of bioengineering and biotechnics  
National Technical University of Ukraine, Kiev Polytechnic Institute*

**Forostyanko V.**

*master*

*National Technical University of Ukraine, Kiev Polytechnic Institute*

## **ДИСТАНЦІЙНЕ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОМАСООБМІНОМ В БІОРЕАКТОРАХ НА РЕЗОНАНСНОМУ РІВНІ**

## **ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОМАСООБМЕНОМ В БИОРЕАКТОРАХ НА РЕЗОНАНСНОМ УРОВНЕ**

## **REMOTE CONTROL TEPLOMASSOOBMEIN IN THE BIOREACTOR AT THE RESONANCE LEVEL**

**Анотація.** Наводиться огляд з можливих технічних рішень дистанційного управління тепломасообміном в біореакторі на резонансному рівні 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.

**Ключові слова:** біореактор, енергетична активність, хвильове співпадання, кавітація, гранична частота.

**Аннотация.** Приводится одно из возможных технических решений дистанционного управления в биореакторе на резонансном уровне с помощью ультразвукового луча. Устанавливаются условия возникновения волнового совпадения, которое сопровождается резким ростом энергетической активности наряду с минимальной диссипацией лучевых волн. Раскрывается природа дополнительной энергетической активности в зонах каустических поверхностей двумя типами волн.

**Ключевые слова:** биореактор, энергетическая активность, волновое совпадение, кавитация, граничная частота.

**Summary.** We give one of the possible technical solutions for remote control of heat transfer in the bioreactor at resonant levels by ultrasound beam. Outlines the conditions of coincidence wave, which is accompanied by a sharp increase of energy activity, along with a minimum dissipation of radiation waves. Explained the nature of the additional energy activity in areas of caustic surfaces with two types of waves.

**Keywords:** bioreactor, energy activity, wave coincidence, cavitation, cutoff frequency

### 1. Вступ

Одним з перспективних фізичних методів впливу на речовини з метою інтенсифікації технологічних процесів є метод, заснований на використанні механічних коливань ультразвукового (УЗ) діапазону.

Ультразвукова інтенсифікація процесів заснована на введенні ультразвукових коливань високої інтенсивності (більше 3 ... 10 Вт/см<sup>2</sup>) безпосередньо в рідкі середовища. На практиці успішно реалізуються кілька варіантів контактного введення ультразвукових коливань в рідкі середовища. Один з найпоширеніших — це обробка шляхом занурення робочого інструмента ультразвукової коливальної системи в довільний технологічний об'єм або обробка в реакторах проточного типу, що містять технологічний об'єм у вигляді проточної камери і розташований в ній випромінювач ультразвукових коливань.

Традиційними середовищами для ефективною реалізації ультразвукових технологій (розчинення, екстрагування, очищення, диспергування, емульгування) є вода, органічні розчинники, рідкі середовища на водній основі з малим об'ємним вмістом твердих фракцій. Застосування водних середовищ обумовлено можливістю створення режиму розвиненої кавітації при мінімальних енергетичних витратах.

Найбільш успішно УЗ коливання використовуються в процесах, пов'язаних з рідкими станами реагентів, оскільки тільки в них виникає специфічний процес — УЗ кавітація, що забезпечує максимальні енергетичні впливу на різні речовини.

Кавітація — утворення в рідині пульсуючих бульбашок (каверн, порожнин), заповнених парою, газом або їх сумішшю. В ультразвуковій хвилі під час напівперіодів розрідження виникають кавітаційні бульбашки, які різко закриваються після переходу в область підвищеного тиску, породжуючи сильні гідродинамічні збурення в рідині, інтенсивне випромінювання акустичних хвиль. При цьому, в рідині відбувається руйнування поверхонь твердих тіл, що межують з кавітуючою рідиною.

Продуктивність і ефективність ультразвукової (УЗ) кавітаційної обробки рідких середовищ залежить головним чином від ступеня розвиненості кавітації в оброблюваній рідині, розміру кавітаційного хмари і рівномірності розподілу інтенсивності УЗ впливу по всьому технологічному об'єму. Ступінь

розвиненості кавітації визначається багатьма факторами, основними з яких є фізичні характеристики розглянутої рідини (щільність, в'язкість, початковий радіус кавітаційних зародків і т.д.) і інтенсивність УЗ коливань. А розмір кавітаційної хмари і рівномірність розподілу інтенсивності кавітації по всьому технологічному об'єму визначається як хвильовими властивостями кавітаційної зони, так і розмірами, формою технологічного об'єму.

Виникнення кавітаційних бульбашок в рідині і значна зміна їх розмірів в процесі розвитку кавітації тягне за собою зміну акустичних і фізичних властивостей оброблюваної рідини. При цьому розміри окремих бульбашок і їх скупчень, як правило, виявляються суттєво менше довжини хвилі первинного УЗ поля. Це дозволяє розглядати рідину разом з газовими краплями, як якесь нове середовище з еквівалентними акустичними характеристиками, відмінними від акустичних характеристик крапельної рідини.

При ультразвуковому кавітаційному впливі виділяють наступні режими в залежності від його інтенсивності: робота при малих інтенсивностях впливу (докавітаційний режим), при яких не порушується суцільність оброблюваного середовища; робота в режимі зародження кавітації, який характеризується виникненням в рідкому середовищі кавітаційних парогазових бульбашок, які насичують рідке середовище, змінюючи її хвильовий опір (імпеданс); робота в режимі розвиненої кавітації, який характеризується малим випромінюванням УЗ енергії, що пов'язано з наближенням імпедансу кавітуючого (водно-газового) середовища до імпедансу повітряного середовища; робота в режимі надрозвиненої кавітації, при якому бульбашки досягають критичних розмірів і відбувається їх виверження в резонансі. Теоретичний розгляд досліджуваного процесу здійснюється відповідно рис. 1.

Таким чином, вплив УЗ коливань на різні технологічні процеси дозволяє: не менш ніж у 10–1000 разів прискорити процеси, що протікають між двома або кількома неоднорідними середовищами (розчинення, очистку, знежирення, фарбування, подрібнення, просочення, емульгування, екстрагування, кристалізацію, полімеризацію, запобігання накипоутворенню, гомогенізацію, ерозію, хімічні та електрохімічні реакції та ін.); збільшити вихід корисних продуктів (наприклад, екстрактів) і додати їм додаткові властивості

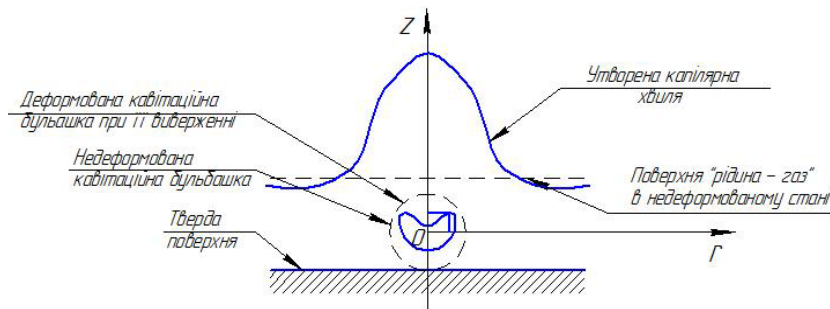


Рис. 1. Графічне представлення запропонованого способу збільшення поверхні розділу фаз

(наприклад, біологічну активність і стерильність); отримати нові речовини (наприклад, тонкодисперсні емульсії і суспензії) і реалізувати технологічні процеси, що не реалізовані традиційними методами.

Наводиться одне з можливих технічних рішень дистанційного управління тепломасообміном в біореакторі на резонансному рівні 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.

## 2. Постановка проблеми

З метою конкретизації поставлених задач технологічного процесу, обрано технічну реалізацію біореактора у вигляді газліфтного барботажного апарату та ультразвукові випромінювачі.

Відомо, що газліфтний барботажный 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.

Рух потоків газорідинної суміші забезпечується використанням потенціальної енергії стиснутого повітря.

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.

Разом з тим недолік такого технічного рішення полягає у відносно низькій продуктивності технологічного процесу, збідненій кінематичі тепломасообміну

та постійно присутніх зонах пасивної енергетики робочої рідини в придонному прошарку та на периферії внутрішньої поверхні корпусу, невідповідності ступеня аерації і інтенсивності тепломасообміну культурального середовища вимогам технологічного процесу, а також прояв ефекту налипання маси до поверхні корпусу.

Пропонується підвищення продуктивності і якості технологічного процесу вирішити шляхом інтенсифікації тепломасообміну по всьому об'єму біореактора на резонансному рівні за допомогою 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.

## 3. Аналіз літературних даних

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. Це забезпечено усуненням стримуючої інтенсифікацію дріжжезростаючого процесу від'ємного зворотнього зв'язку між газовмістом культурального середовища в ємкості і інтенсивністю тепломасообмінних процесів в апараті загалом.

Зазначений від'ємний зв'язок ліквідується за рахунок введення в конструкцію апарату відвідного патрубка піни в складі гідроциклона та ежектора.

Недоліком цього технічного рішення постає досить висока матеріалоемність 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.

**4. Фокусування енергії ультразвукового променя. Поверхні каустики**

Найбільш суттєві аспекти концентрації проникної звукової енергії розглянемо на прикладі газліфтного барботажного апарату (рис. 2) та ультразвукові випромінювачі (рис. 3).

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. 2, а). В порожнині корпусу 1, співвісно з ним, на днищі, розміщений аератор 5 (рис. 2, б).

У попередньо простерилізований корпус 1 крізь патрубок 2 вводять робочу рідину, після чого, через аератор 5 пускають стиснений газ (повітря) і послі-

довно включають, попередньо налаштовані на хвильовий резонанс, ультразвукові випромінювачі 6 та 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 регулюючим 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 будує більшого радіуса другу циліндричну каустику поблизу внутрішньої поверхні корпусу апарату, активізуючи периферійні шари.

Прийнявши сталений 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  $c_{sz}(\omega)$  і падаючої хвилі випромінювання  $c_0$  [6]

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

(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  $kR = \frac{2\pi fR}{c_0} = 176 \gg 1$ ,

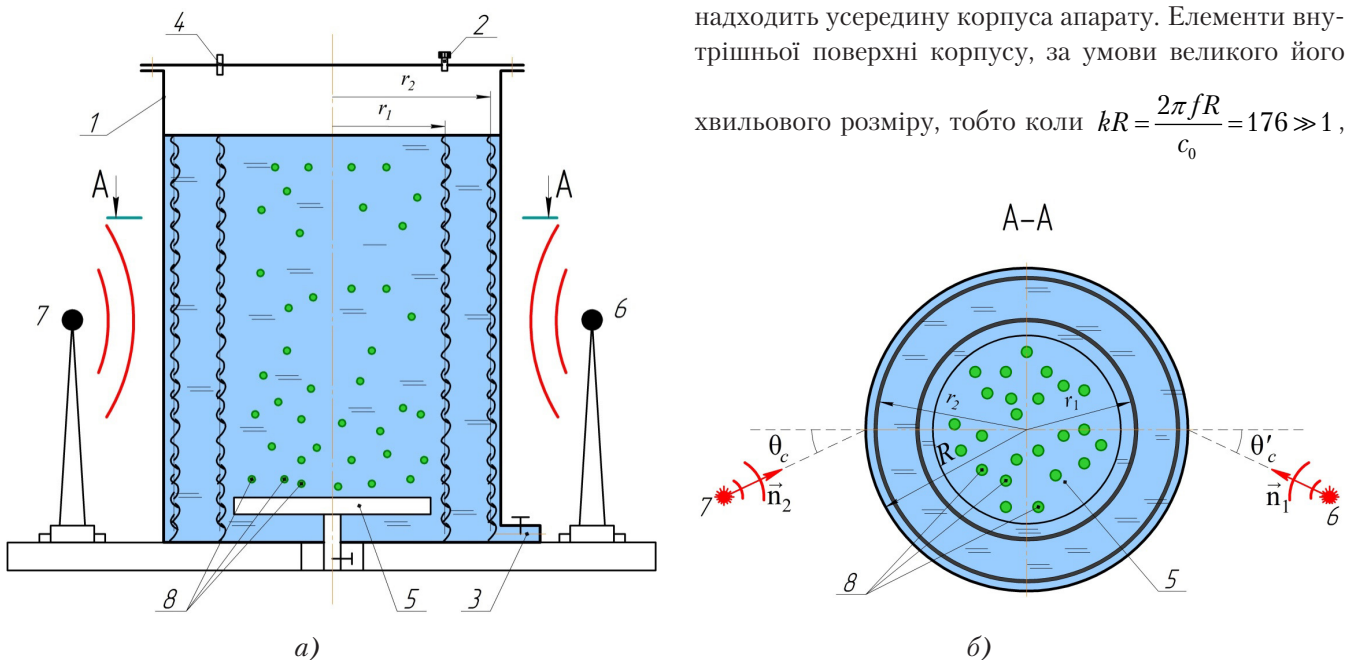
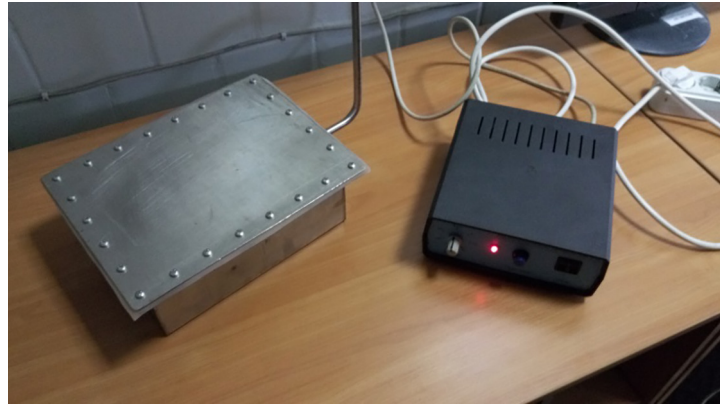


Рис. 2. Газліфтний барботажний апарат в поздовжньому (а) та поперечному (б) перерізі



а)

б)

Рис. 3. Ультразвукові випромінювачі: а) Mimi ultrasonic Cleaner Model 3560; б) блок ультразвукових випромінювачів УЗП-6-1

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

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

де  $c_{sz} = \left[ 2E\delta^2 4\pi^2 f^2 (3m_{II})^{-1} (1 - \sigma^2)^{-1} \right]^{\frac{1}{4}}$ ;  $c_0 = 1500 \text{ мс}^{-1}$  — швидкість звука в рідині;  $E$  — модуль Юнга матеріалу корпусу;  $\sigma$  — коефіцієнт Пуассона;  $m_{II} = 2\rho\delta$  — питома маса;  $\rho$  — щільність.

Відповідно, ультразвуковий випромінювач УЗП-6-1, 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 утворюють 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 генеруючими згинними, а також поздовжніми хвилями корпусу апарату, приведе в резонансний стан культуральну рідину, збурить її по всьому об'єму, ліквідує малоактивні і застійні зони. Циліндричні каустики вздовж осі апарату і біля його сті-

нок додатково збурять 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.

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.

### 5. Апробація результатів досліджень

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 біореактора 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 самим суміш киснем і створюючи умови для інтенсивного росту клітин. Завдяки новим

властивостям, забезпечується енергетична активність робочої рідини по всьому об'єму. Що суттєво підвищує продуктивність технологічного процесу і його якість.

### 6. Висновки

Штучне формування енергетичної активності робочої рідини ультразвуковим променем на резонансному рівні дозволяє дистанційно керувати тепло-

масообміном, підвищувати продуктивність і якість вихідного продукту.

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

### Література

1. А.с. 1708829 АІ СССР, С12М1/04. Газлифтний барботажний апарат [Текст]/ Ю. Г. Куляшов, В. И. Горячкин. С. П. Уткин, Ю. Н. Талызин, А. С. Васильев, В. М. Крац (СССР). — № 4612860/13; заявл. 01.12.88; опубл. 30.01.92, Бюл. № 4. — 1 с.
2. А.с. 147208 АІ СССР, С12М1/04. Апарат для вирощивання мікроорганізмів [Текст]/ Ю. Ф. Давыдов, В. М. Геллис, В. К. Погудкин, В. М. Карц, В. Н. Соловьев, С. П. Уткин (СССР). — № 4109725/28-13; заявл. 21.08.86; опубл. 30.07.89, Бюл. № 28. — 1 с.
3. Пат. № 43558 на корисну модель, Україна, МПК (2009), С 12 М 1/04. Газліфтний барботажний апарат [Електронний ресурс]/ В. В. Карачун, М. С. Тривайло, В. М. Мельник, М. А. Руденко, Д. В. Литвиненко. u 200901835; заявл. 02.03.2009; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/2-43558-gazliftnijj-barbotazhnijj-aparat.html>
4. Пат. № 40230 на корисну модель, Україна, МПК (2009), С 12 М 1/04. Газліфтний барботажний апарат [Електронний ресурс]/ М. С. Тривайло, В. В. Карачун, В. М. Мельник, О. Є. Резенчук, А. О. Заброда. u 200813427; заявл. 20.11.2008; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/2-40230-gazliftnijj-barbotazhnijj-aparat.html>
5. Пат. № 78382 на корисну модель, Україна, С 12 М 1/04 (2006.01) Газліфтний барботажний апарат [Електронний ресурс]/ В. М. Мельник. u 201213327; заявл. 22.11.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/5-78382-gazliftnijj-barbotazhnijj-aparat.html>
6. Gremer, L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall [Текст] / L. Gremer // Akust. Zeitschrift, 7, 1942. Str 3–7.
7. Шендеров, Е. Л. Волновые задачи гидроакустики [Текст]: моногр. / Е. Л. Шендеров. Л.: Судостроение, 1972. — 352 с.
8. Gösele, K. Zur Körperschallausbreitung in Wohubauten [Текст]/ K. Gösele // Körperschall in Gebäuden. Berlin. 1960. Str 24–24.
9. Heckl, M. Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche [Текст] / M. Heckl// Acustica, 10, 1960. Str 17–21.
10. Junger, M. C. Letter to the editor [Текст] / M. C. Junger, P. W. Smith // Acustica, 5,1, 1955. Str 43–46.