

Віброрезонансний кавітатор для гомогенізації водоростей прісноводних водойм як сировини біоенергетики

І. С. Афтаназів • Л. Р. Струтинська • О. І. Строган • І. Г. Свідрак

НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Received: 05 March 2020 / Accepted: 25 May 2020

Анотація. Вдосконалено технологічний процес переробки синьо-зелених водоростей прісноводних водойм у біогаз. Для підвищення продуктивності процесу ферментації біогазу створена нова конструкція віброрезонансного кавітатора. Продуктивність розробленого кавітатора сягає 0,75–1,0 м³/год при поперечному перерізі робочої камери 10 дюймів. Використання на етапі підготовки суспензії водоростей їх кавітаційної обробки запропонованим віброкавітатором дозволяє на 25÷30% підвищити ферментацію біогазу із біомаси. Метою роботи є вдосконалення технологічного процесу ферментації біогазу з синьо-зелених водоростей, а також розробка придатної для цього конструкції віброкавітатора. Основні задачі дослідження – розробка конструкції віброкавітаторів із електромагнітним приводом та дослідження ефективності їх застосування для гомогенізації синьо-зелених водоростей в процесі їх переробки у біогаз.

Результати дослідження дозволяють підвищити продуктивність технології переробки водоростей у біогаз, а також покращити екологічний стан водойм та навколишнього середовища завдяки забору з води шкідливих синьо-зелених водоростей.

Ключові слова: синьо-зелені водорості, ціанобактерії, екологія, вода, біогаз, технологія, кавітація, віброкавітатор, електромагніт.

Вступ

Поряд із незаперечними перевагами гідроенергетики для економіки нашої держави, все ж існує і цілий ряд, обумовлених її розвитком та діяльністю, втрат. Звичайно, перш за все це втрата для сільського господарства та соціуму держави значної кількості землі, що затоплена для накопичення необхідних для роботи турбін запасів води. Менш наглядною проблемою, та все ж вкрай вагомю для здоров'я громадян населених пунктів, що розташовані вздовж річок із гідроелектростанціями, є погіршення якості води. Перекриті греблями річки на ділянках водосховищ перетворюються на застійні водойми із незначною швидкістю течій та багато чисельними мілководними ділянками. Географічне розташування України обумовлює наявність на її території доволі теплих із середньомісячною температурою біля 20 °С трьох-чотирьох літніх місяців, впродовж яких у застійних мілководдях водосховищ активно розмножуються різноманітні бактерії, у тому числі і хвороботворні. Їх продукти життєдіяльності та продукти розпаду після відмирання затрують воду. Рано чи пізно ця затруєна вода вимивається із застійних зон та потрапляє у русло, з якого водозаборами відбирають воду для потреб жителів навколишніх населених пунктів. Звичайно, перш ніж стати питною водою, річкова вода проходить певні етапи водопідготовки та водоочищення, та все ж її біологічне бактеріальне затруєння марно не минає.

Одним із найактивніших забруднювачів прісної води на території України є різноманітні різновиди, так званих, ціанобактерій, які часто називають синьо-зеленими водоростями. На наших теренах їх налічується біля десятка різновидів, найрозповсюдженіші з яких за системою водоростей Паркера (1982р.) відносяться до царства Procygota, відділу Cyanophycota, класу Cyanophyceae. Різновиди родів ціанобактерій відрізняються незначними відмінностями у структурній будові та розмірах. Їх діаметри знаходяться в діапазоні від

✉ І. С. Афтаназів
ivan.aftanaziv@gmail.com

декількох до 50 мікрон, нитковидна довжина сягає декількох міліметрів. Життєвий цикл ціанобактерій, залежно від умов довкілля, триває від одного до декількох місяців, активне розмноження здійснюється звичайним поділом, до того ж практично у геометричній прогресії. За вегетаційний період (70 – 120 днів) одна початкова клітина ціанобактерій може призвести 10^{20} дочірних, що і зумовлює їх масовий розвиток, відомий під висловом “цвітіння води” [1]. Найпоживнішим для їх життєдіяльності середовищем є насичена фосфатами тепла вода. На періоді росту, синьо-зелені водорості поглинають вуглекислий газ, а виділяють кисень. Після вегетаційного періоду та відмирання опускаються на дно і їх розкладання, навпаки, супроводжується активним поглинанням кисню продуктами розпаду. При цьому продуктивність процесу поглинання кисню суттєво перевищує продуктивність його утворення, що і призводить до літніх заморів риби та іхтіофауни водойм, супроводжується неприємним запахом води, що споріднений із запахами загнивання. У осінньо-зимові періоди із пониженням температури води ціанобактерії опускаються на дно водойми, перемішуються із намулом і призупинивши розмноження безболісно переносять низькі зимові температури. Весною їх активність відновлюється, вони піднімаються у верхні прогріті прошарки води і знову активно розмножуються. Повільними течіями мілководдя та вітрами колонії ціанобактерій розносяться по водоймі, заражаючи при цьому все нові та нові її ділянки. На водосховищах гідро- та теплоелектростанцій синьо-зелені водорості накопичуються в основному по обидва боки від плотин, куди їх колонії приносять вітри та водяні течії. При цьому товщини колоній у приповерхневих шарах води можуть сягати декількох десятків сантиметрів. На рис. 1 приведено світліну, на якій відображені ділянки забрудненої синьо-зеленими водоростями водойми поблизу греблі Кременчуцької ГЕС.



Рис. 1. Світлина водойми поблизу греблі Кременчуцької ГЕС, забрудненої синьо-зеленими водоростями [2]

Обсяги зараженої ціанобактеріями води, а відповідно і кількість безпосередньо самих ціанобактерій, у водоймах України величезні. Так, згідно даних дослідження, проведеного на водоймі лише Кременчуцького водосховища з площею водяного дзеркала 2250 км^2 із об'ємом 828 млн. м^3 , у воді мілководдя при середній густині насичення води ціанобактеріями 50 кг/м^3 їх загальна біомаса складає $4,14 \cdot 10^7$ тон накопичення впродовж всього літнього вегетаційного періоду [3]. То ж можна уявити, яку величезну кількість води ці бактерії затрують продуктами своєї життєдіяльності!

Поряд з тим, вітчизняними та зарубіжними дослідниками переконливо доведено, що за певних умов переробки із синьо-зелених водоростей (ціанобактерій) можна одержувати корисну сировину для продукування біогазу, як пального теплоенергетики [2, 3], біоетанолу [4, 5]. Не менш перспективною є і переробка синьо-зелених водоростей екстрагуванням з їх біомаси ліпідів та жирних кислот із подальшою переробкою у біодизель на пальне для двигунів внутрішнього згорання [6, 7, 8].

Отже, очищення природних водойм від ціанобактерій спроможне забезпечити два позитивні аспекти – очистити та оздоровити воду від гіперактивного біологічного забруднювача, а також одержати цінну сировину для біоенергетики та виготовлення пального. Адже, піддавши вище означену біомасу ціанобактерій Кременчуцького водосховища ферментації, в процесі “метанового” бродіння можна одержати 30 млн. м^3 біогазу, який за теплотворною здатністю еквівалентний $18,8 \text{ млн. м}^3$ природного газу метану, 20 тис. т нафти або 17 тис. т дизельного пального [3].

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Технологічним процесам водопідготовки та водоочищення від біологічних забруднювачів завжди приділялась належна увага не тільки як необхідному засобу охорони довкілля, а і як неодмінному аспекту охорони здоров'я. Адже саме у водному середовищі можуть існувати і активно розмножуватись такі вкрай небезпечні для здоров'я людей хвороботворні бактерії, як "паличка Коха", стафілококи, стрептококи тощо. Загально визнано, що якість питної води – це основна передумова стану здоров'я людей та тваринного світу. Тому і створена значна кількість фізичних, хімічних та біологічних методів фільтрації, знезараження та очищення питної води та води водойм громадського використання, у тому числі і від біологічних забруднювачів [9, 10]. Воді ж природних водойм приділялось дещо менше уваги, що обумовлено, очевидно, її унікальною здатністю до самоочищення. Однак і природне самоочищення води має свої межі, що і переконливо підтверджує досвід забруднення Кременчуцького водосховища ціанобактеріями. Проте певні дослідження в галузі біологічного знезараження води природних водойм проводились, у тому числі і в Україні. Так, в роботі [11], опираючись на досвід очищення води Тернопільського озера, досліджено ефективність застосування для очищення води від біологічного забруднення гідродинамічних кавітаторів лопатевого типу. В роботах науковців із НУ "Львівська політехніка" доведена висока ефективність очищення невеликих за площею водойм риборозплідних господарств віброрезонансними кавітаторами від забруднення ціанобактеріями [12, 13].

Результати цих досліджень підтверджують ефективність використання кавітації для знезараження води від біологічного забруднення. Однак вони проведені на малопродуктивному лабораторному устаткуванні, яке не може бути застосованим для очищення значних обсягів води, тобто для промислового використання.

Поряд з тим, така велика маса легкодоступної та порівняно дешевої біологічної сировини, якою виявились синьо-зелені водорості, не могла оминати увагу і біоенергетиків [1, 2, 3]. Активно зацікавились цією сировинною масою і фахівці у галузі переробки біологічного матеріалу в паливо для двигунів внутрішнього згоряння [6, 7, 8]. У результаті їх досліджень було створено типові технологічні процеси переробки синьо-зелених водоростей у біогаз, а також їх переробки із екстрагуванням ліпідів та жирних кислот, що становлять основу виготовлення біодизельного пального.

Перші етапи цих технологій споріднені і включають збір з поверхні водойм синьо-зелених водоростей, відділення їх від води у накопичувальних колонах чи спеціальних емностях та підготовку субстрату біомаси водоростей. Для отримання біогазу субстрат завантажують у метантенки, де при температурі 60 °C за біотехнологією "метанового бродіння" з нього ферментується біогаз, який спрямовується у газозбірник. У технології виробництва біодизельного пального субстрат біомаси піддають екстрагуванню для виділення з нього ліпідів та жирних кислот. Із цієї сировини біодизель виготовляють за традиційною технологією – переетиризацією рослинних масел [14, 15]. У кожному із цих технологічних процесів вихід готового продукту, певною мірою, лімітується ступенем розкладу сировинної біомаси (синьо-зелених водоростей), або по-іншому, ступенем відкритості до масообміну, локалізованої у клітинній оболонці ціанобактерії, біомаси. Як відзначалось, оболонка цих бактерій доволі стійка до зовнішніх впливів, що обумовлює низьку інтенсивність проходження процесів і синтезу біогазу, і екстрагування ліпідів. У кінцевому результаті, це не дозволяє повною мірою використати енергетичний потенціал біомаси.

Використання засобів механічного руйнування оболонок бактерій через незначні їх розміри виявилось мало ефективним. Тому продовжуються пошуки більш дієвих методів інтенсифікації виділення внутріклітинного вмісту синьо-зелених водоростей. Доволі ефективний метод руйнівного впливу на ціанобактерії запропоновано у роботах [1, 13, 16]. Авторами досліджувалось застосування кавітаційних явищ для інтенсифікації руйнування мембран та стінок синьо-зелених водоростей з метою повнішого і пришвидшеного виділення їх внутріклітинного вмісту.

Дослідження показали, що загальний вміст ліпідів у відібраній пробі ціанобактерій становив 1,27 % від сухої маси. Із біомаси без попередньої обробки в області гідродинамічної кавітації вдалося екстрагувати ліпіди у кількості, що відповідає 0,32 % сухої маси водоростей (25,2 % від всіх наявних ліпідів). Цей результат підтверджує, що клітинні стінки необроблених водоростей є тяжкопроникні і використання їх без обробки для отримання енергоносіїв є ускладненим. Із біомаси, яка пройшла попередню обробку в області гідродинамічної кавітації за описаною вище методикою, вдалося екстрагувати 0,45 % ліпідів (майже 80 % від всіх наявних ліпідів).

Кавітаційна обробка водяної суспензії синьо-зелених водоростей завдяки утворенню при сплескуванні кавітаційних мікробульбашок ударних мікрохвиль, почергової зміни зон підвищених та понижених тисків, а також інтенсивному впливу на мембрани та оболонки водоростей самоутворюваних в кавітаційній області хімічно активних окиснювачів радикалів OH^- та пероксиду водню O_2H_2^- , активно руйнує стінки водоростей та вивільняє їх внутріклітинний вміст. Цей спосіб захищено патентом на корисну модель України і він передбачає на етапі "екстрагування та біорозкладу" застосування гідродинамічної кавітації [16], що на 20 – 25 % підвищує швидкість руйнування стінок ціанобактерій. Однак, очевидно через недостатню інтенсивність, формованої лопатевими кавітаторами, кавітаційної області, бажаного результату забезпечити не вдалося.

До якоря та статора жорстко прикріплені рухома 7 та нерухомі 13 деки із рівномірно розташованими по всій їх площі отворами для протікання оброблюваної рідини. На коливній деці 7 та, закріплених на корпусах статорів нерухомих деках 13, встановлені, розвернуті один навпроти другого своїми торцевими поверхнями збурювачі кавітації 16, зовнішня поверхня яких виконана у формі гіперболоїда обертання, а торцева – у вигляді вписаної в гіперболоїд півсфери з радіусом, рівним подвоєному розмаху коливань робочої камери. Мінімальна віддаль між сусідніми, розташованими на спільній деці, збурювачами кавітації 16 рівна амплітуді коливань робочої камери 9, а віддаль між коливними та нерухомими збурювачами кавітації 16 рівна розмаху коливань деки 7. Від потрапляння сторонніх предметів до коливних систем електромагнітний віброзбудник захищено захисним кожухом 1.

Робота вібраційного електромагнітного кавітатора здійснюється наступним чином. По трубі завантажувальної камери 6 в робочу камеру 9 під незначним тиском або самотоком подають оброблювану рідину – водяну суспензію синьо-зелених водоростей. Одночасно на обмотки 3 котушок електромагнітів із, вище відзначеним, зміщенням по фазі подають напругу. Електромагніти по чергово притягують до себе якор 10 із наповненою оброблюваною рідиною робочою камерою 9, прогинаючи при цьому пружні циліндричні стержні 5. Почергове притягування якоря 10 до електромагнітів 15 трансформується у направлені плоскопаралельні коливні переміщення, наповненої оброблюваною рідиною, робочої камери 9. На рис. 3 відображено обтікання оброблюваною рідиною збурювачів кавітації та формування кавітаційної області при гармонійних коливаннях рухомої деки.

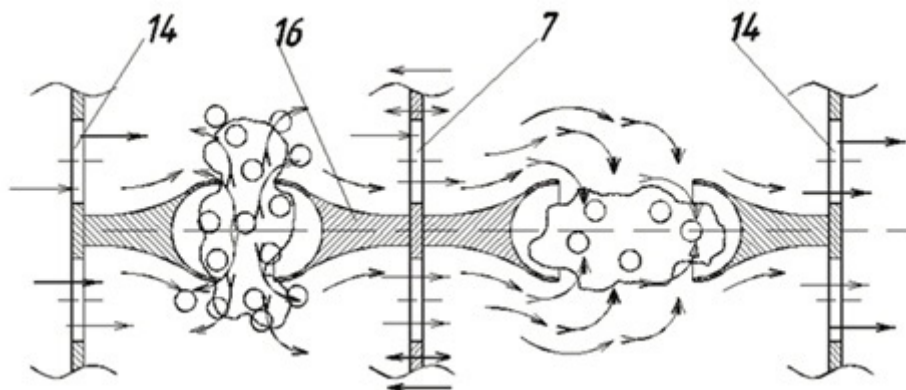


Рис. 3. Схема формування кавітаційного поля при низькочастотних гармонійних коливаннях збурювачів кавітації (номери позицій запозичено із рис. 2)

По мірі переміщення коливної деки 7 від однієї нерухомої деки 13 до іншої (протилежної) оброблювана рідина із високою швидкістю омиває зовнішню гіперболоїдну поверхню тих збурювачів кавітації 16, що віддаляються від нерухомої деки 13. Обігнувши зовнішню поверхню рухомих збурювачів кавітації 16, оброблювана рідина завихрюється у їх внутрішню сферичну заглибину (рис. 3). При рекомендованій амплітуді коливань деки $A = (1,5 - 2,0)$ мм і частоті 100 Гц швидкість, з якою оброблювана рідина омиває зовнішню поверхню і завихрюється у внутрішній сферичній заглибині збурювачів кавітації 16, становить приблизно $(1,4 - 2,0)$ м/с. Завдяки збільшенню тиску струмені рідини втрачають щільність, огинаючи збурювачі кавітації, потоки рідини завихрюються у їх сферичних заглибинах і із ламінарних режимів перетворюються на турбулентні. При цьому із розчинених у воді повітря та газів за сферичною впадиною у збурювачах кавітації 16 самоформуються кавітаційні каверни.

Нашими лабораторними дослідженнями встановлено, що ефективність кавітаційної обробки синьо-зелених водоростей наростає при подачі в кавітаційну зону робочої камери 9 газу. Обумовлено це компенсацією додатково поданим газом явища дегазации оброблюваної рідини у кавітаційній області, а також можливістю утворення за присутності газу додаткових радикалів-окиснювачів, що руйнують стінки бактерій. Найефективнішими при кавітаційній обробці субстрату синьо-зелених водоростей виявились кисень та більш дешевий азот. Утворені в кавітаційній області радикали, першого володіють високою окисною здатністю, а сполуки другого – підвищеною хімічною активністю. Всі ці, новоутворені в кавітаційній області, сполуки активізують роз'їдання і, обумовлене цим, руйнування стінок синьо-зелених водоростей, а високочастотні мікроудари від сплескування кавітаційних мікробульбашок успішно довершують руйнівні процеси. Оптимальною виявилась величина витрати газу в діапазоні $(0,15 \div 0,25)$ м³ на кубічний метр оброблюваного субстрату.

При проектуванні електромагнітних віброрезонансних кавітаторів опираються на задану продуктивність кавітаційної обробки водяних суспензій та технологічну тривалість кавітаційної обробки порції, наповнюючої робочу камеру 9, рідини. Приймають також до уваги дискретний (порційний) чи неперервний характер обробки рідини. Із цих міркувань розраховують та задають об'єм робочої камери та діаметри трубопроводів подачі та відводу оброблюваної рідини.

Розрахунок пружності коливних систем (циліндричних стрижнів 5), потужності електромагнітних приводу та їх конструктивних елементів (форму та розміри електромагнітного заліза, поперечний перетин та кількість витків обмотки тощо) здійснюють за методикою розрахунку вібраційних машин із електромагнітним приводом [17].

В основу ефективної роботи віброрезонансних кавітаторів, як власне і кавітаторів інших типів та принципів дії, закладено енергетичний вплив на рідинне середовище, який супроводжується втратою міцності міжмолекулярних зв'язків рідини та самозбуренням в ній специфічних кавітаційних явищ. Із позицій молекулярної фізики створення певних передумов для збурення кавітаційної області, насиченого кавітаційними мікробульбашками, регламентується так званим числом Рейнольдса Re . Цей безрозмірний параметр пов'язує зміни характеру потоків рідин певних густини та в'язкості із переїнами швидкості та тисків рідини. Величину критичного значення числа Рейнольдса $Re_{кр}$ можна трактувати як параметр, що обумовлює поріг зародження в рідинному потоці кавітації. Число Рейнольдса Re визначається із математичної залежності [5]

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{v \cdot L}{\nu}, \quad (1)$$

де ρ – густина рідини, кг/м³;
 v – швидкість рідинного потоку, м/с;
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини, Па/с;
 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кінематична в'язкість рідини, м²/с;

L – характерний для конкретного обладнання лінійний розмір, м.

По суті, число Рейнольдса Re відображає взаємозв'язок між швидкістю рідинного потоку та його характером.

Для віброрезонансного збурення кавітації у субстраті синьо-зелених водоростей критичне число Рейнольдса $Re_{кр}$ має бути наближеним до значень $Re \geq (1,5 \dots 2,0) \cdot 10^5$ [6]. Тому, задавши у залежності (1) значення параметрів оброблюваної рідини та критичного числа Рейнольдса $Re_{кр}$, можна визначити необхідну для збурення кавітації швидкість просторових переміщень збурювачів кавітації $V_{Д*}$ у оброблюваному рідинному середовищі субстрату синьо-зелених водоростей із залежності

$$V_{Д*} = \frac{\mu \cdot Re_{кр}}{\rho \cdot L_{\partial}} = \frac{v \cdot Re_{кр}}{L_{\partial}}, \quad (2)$$

де L_{∂} – сумарний приведений розмір довжини кіл на торцевій поверхні збурювачів кавітації, м.

Віброшвидкість коливних просторових переміщень збурювачів кавітації обумовлюється амплітудою та частотою їх коливань. Тому при заданій амплітуді коливань збурювачів кавітації A , прирівнявши між собою швидкості $V_{к} = V_{Д*}$, можна визначити основний конструктивний параметр віброкавітатора – необхідну частоту коливань збурювачів кавітації

$$f = \frac{V_{к}}{2 \cdot \pi \cdot A} = \frac{\mu \cdot Re_{кр}}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot \rho \cdot L_{\partial}} = \frac{v \cdot Re_{кр}}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot L_{\partial}}, \frac{1}{с}.$$

Інший не менш вагомий параметр віброрезонансного кавітатора, це тягове зусилля F_T електроприводу, яке забезпечує коливні переміщення робочої камери. Його величина пропорційна величині тиску $\sum P_c$ на коливну деку, сумарній величині площі отворів у деці для перетікання рідини $\sum S_o$ та куту β нахилу деки до рідинного потоку

$$F_T = (\sum P_c) \cdot (\sum S_o) \cdot \sin \beta.$$

Це тягове зусилля забезпечується електромагнітними приводу віброкавітатора. Його визначають із залежності [17]

$$F_T = \frac{M_{св} \cdot \omega^2 \cdot A_{ом}}{\lambda \cdot z^2},$$

де $M_{св}$ – так звана, приведена коливна маса,
 $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – колова частота коливань збудувачів кавітації;
 f – частота коливань робочої камери;
 A_{om} – амплітуда коливань робочої камери;
 λ – динамічний коефіцієнт;
 $z = 0,96-0,98$ – коефіцієнт резонансного налаштування.

Ефективність використання віброрезонансного кавітатора запропонованої конструкції для гомогенізації біомаси синьо-зелених водоростей, яка супроводжується руйнуванням їх оболонок та вивільненням внутріклітинного вмісту, перевірено на діючій моделі віброкавітатора. На рис. 4 відображена світлина діючої моделі віброкавітатора для гомогенізації біомаси синьо-зелених водоростей із пультом керування мережею її електроживлення.

Основними складовими елементами діючої моделі віброкавітатора є циліндрична робоча камера об'ємом 1 дм³, системи подачі до неї субстрату синьо-зелених водоростей та газів, електромагнітний вібропривід з, приєднаною до нього, коливною декою із збудувачами кавітації та мережа електричного живлення віброприводу.

Встановлений на нерухомій основі кавітатор складається із двох, вертикально розташованих одна на другій, прозорих циліндричних трубок, що з'єднані за допомогою металевого кільця. З'єднувальне металеве кільце оснащено патрубками для подачі оброблюваної рідини та супутніх обробці газів, а також штуцером для кріплення манометра, фіксуючого тиск у робочій зоні кавітатора. Над кавітатором на нерухомій площадці зафіксовано електромагнітний вібраційний привід кавітатора, який складається із, розміщеного в корпусі, електромагніта з котушкою обмотки, та, встановленого на пружних елементах, коливного якоря. До якоря приєднано шток, який вільним його кінцем заведено всередину кавітатора.

Над кавітатором на нерухомій площадці зафіксовано електромагнітний вібраційний привід кавітатора, який складається із, розміщеного в корпусі, електромагніта з котушкою обмотки, та, встановленого на пружних елементах, коливного якоря. До якоря приєднано шток, який вільним його кінцем заведено всередину кавітатора. До, опущеного в кавітатор, штока жорстко закріплено рухому деку з, прикріпленими до неї, збудувачами кавітації. Форма збудувачів кавітації відповідає формі вище описаних збудувачів, відображених на рис. 2 та рис. 3. Нижче рухомої деки на, прикріпленій до днища кавітатора, стійці розміщена нерухома дека із збудувачами кавітації, повернутими своєю торцевою поверхнею до збудувачів рухомої деки. Окрім збудувачів кавітації рухома та нерухома деки оснащені отворами для перетікання оброблюваної рідини.

Електрична мережа управління електромагнітним приводом віброкавітатора оснащена лабораторним автотрансформатором для здійснення регулювання величиною живлення електромагніту, а також ватметром для обліку споживаної ним потужності.

Програма експериментальних досліджень ефективності віброрезонансної кавітаційної обробки субстрату синьо-зелених водоростей передбачала декілька етапів:

- на першому визначали оптимальні умови коливних режимів збудувачів кавітації;
- на другому визначали доцільну тривалість кавітаційної обробки водяної суспензії синьо-зелених водоростей;
- на третьому досліджували вплив різновиду та обсягів, поданого у кавітатор, газу на ефективність кавітаційної обробки синьо-зелених водоростей.



Рис. 4. Світлина діючої моделі віброкавітатора для дослідження гомогенізації біомаси синьо-зелених водоростей із пультом керування мережею її електроживлення

Метою досліджень першого етапу було встановлення оптимальних параметрів мережі живлення електромагніту віброприводу, при яких за мінімального рівня енерговитрат забезпечується найвища інтенсивність просторових переміщень збудувачів кавітації, а відповідно і найвища інтенсивність кавітаційної області у водяній суспензії синьо-зелених водоростей. Для цього кавітатор на 0,75 його об'єму заповнювали водяною суспензією синьо-зелених водоростей у співвідношенні 1:1 об'єму води до об'єму субстрату синьо-зелених водоростей. Задавшись певною і сталою амплітудою коливань деки із збудувачами кавітації, наприклад, $A = 2$ мм, змінюючи регулятором частоти напругу живлення електроприводу в діапазоні від 25 до 100 Гц, заміряли через кожні 2,5 Гц величину потужності споживної електроенергії. Стабільності амплітуди коливань деки із збудувачами кавітації при цьому досягали регулюючи автотрансформатором величину сили струму живлення обмотки котушки електромагніта.

Встановлено, що мінімальне споживання електроенергії віброприводом при кавітаційній обробці синьо-зелених водоростей на даному віброкавітаторі спостерігається для амплітуди коливань $A = 2$ мм при частоті напруги живлення $f = 37$ Гц, при якій коливна дека здійснює коливання із частотою, рівною $f_0 = 74$ Гц. Ця частота для коливної системи даного віброприводу співпадає із його власною частотою, тобто коливна система працює в наближеному до резонансу режимі.

На другому етапі визначали оптимальну тривалість кавітаційної обробки синьо-зелених водоростей. Для цього при частоті коливань деки із збудувачами кавітації, рівній $f_0 = 37$ Гц, та амплітуді $A = 2$ мм впродовж різного часу в інтервалі від 1 хв. до 10 хв. здійснювали кавітаційну обробку синьо-зелених водоростей. Інтервал зміни тривалості обробки становив 1 хв. Контрольованим параметром була кінцева ефективність обробки, яку оцінювали по кількості одержаного із кавітаційно обробленого субстрату водоростей біогазу. Біогаз отримували в результаті зброджування анаеробними мікроорганізмами біомаси кавітаційно оброблених проб синьо-зелених водоростей на лабораторній дослідній установці «метанового бродіння».

Встановлено, що по мірі збільшення тривалості кавітаційної обробки суспензій синьо-зелених водоростей кількість отриманого від їх анаеробного бродіння біогазу наростає, асимптотично наближаючись до певних, залежних від концентрації водоростей, значень. При цьому, в перші 4–5 хвилин кавітаційної обробки швидкість нарощування виходу біогазу доволі висока, а в останні 5 хвилин вона суттєво понижується. Так, у перші 5 хвилин обробки приріст об'єму одержаного біогазу щохвилино нарастив, сягнувши значення 22...25 дм³ із 0,75 дм³ переробленої суспензії, кавітаційно оброблених водоростей. Подальші 5 хвилин кавітаційної обробки підвищили вихід біогазу лише на 10 – 15 %. Це дає підставу вважати оптимальною тривалістю віброкавітаційної обробки суспензій синьо-зелених водоростей за вище вказаних параметрів кавітації ($f_0 = 37$ Гц, $A = 2$ мм) в інтервалі 4,5 – 5 хвилин.

На третьому етапі досліджували вплив, поданих у робочу зону віброкавітатора, газів на продуктивність і тривалість кавітаційної обробки водоростей. Для цього в робочу зону віброкавітатора подавали із витратою 0,15 – 0,2 дм³ на 1 дм³ оброблюваної суспензії газу, а саме кисень та азот. Було встановлено, що подача в зону кавітаційної обробки газів нарощує вихід біогазу із субстрату в середньому на 20 – 30 %. При цьому з 5 хв. до 4 хвилин зменшується і оптимальна тривалість кавітаційної обробки. Ефективність подачі кисню виявилась лише на 15 – 20 % вищою за ефективність азоту. Однак, враховуючи високу вартість кисню та значні обсяги підлягаючої переробці у виробничих умовах біомаси, очевидно, доречно орієнтуватись на дешевший азот.

Таким чином, експериментальними дослідженнями віброрезонансної кавітаційної обробки водяних суспензій синьо-зелених водоростей встановлено, що, завдяки підвищенню інтенсивності кавітаційної області, цей метод гомогенізації водоростей на 20 – 25 % ефективніший лопатевої гідродинамічної та ультразвукової кавітаційних обробок. При цьому виявлено, що подача в робочу зону віброкавітатора супутнього кавітаційній обробці газу на 10 – 15 % нарощує вихід готового продукту. Із двох досліджуваних газів, а саме кисню та азоту, ефективнішою виявилась подача кисню із витратою 0,15 – 0,20 дм³ газу на 0,75 дм³ оброблюваної субстанції. Визначено також оптимальну тривалість кавітаційної обробки синьо-зелених водоростей. Вона становить для досліджуваної моделі віброкавітатора приблизно 4 – 4,5 хвилин при амплітуді коливань збудувачів кавітації $A = 2$ мм та частоті $f_0 = 74$ Гц.

На підставі даних експериментальних досліджень віброрезонансної кавітаційної обробки суспензій синьо-зелених водоростей із врахуванням конструктивних можливостей та особливостей розробленої конструкції промислового віброкавітатора пропонується вдосконалена принципова технологічна схема процесу переробки синьо-зелених водоростей на біогаз. Ця схема зображена на рис.5 і включає три основні блоки.

Схема передбачає три основні блоки, а саме: I блок – блок накопичення сировини і підготовки водяної суспензії синьо-зелених водоростей, II блок – блок віброрезонансної гомогенізації суспензії водоростей і III блок – блок ферментації біогазу анаеробним «метановим бродінням». Відповідно і переробка сировини здійснюється в три етапи. На першому етапі зібрані із відкритої водойми чи спеціально вирощені у водяних ваннах-резервуарах синьо-зелені водорості разом з водою заливають у накопичувачі-відстійники, позначені позицією 1 на рис. 5. Після 25 – 30 годинного відстоювання у накопичувачах-відстійниках синьо-зелені водорості, питома вага яких менша питомої ваги води, відфракціонуються від води, тобто спливають у

верхню частину накопичувача, а вода осідає у нижню його частину. Воду із накопичувача зливають у водойму чи у ванни вирощування сировини, а готову водяну суспензію синьо-зелених водоростей подають насосами на блок віброкавітаційної гомогенізації. Тут облаштовано 2 – 3 промислові віброрезонансні кавітатори, позначені позицією 2 на рис. 5. Крім кавітаторів у блок II включено підстанцію 3 подачі у кавітатори газу та регульовальну апаратуру 4 перемикачів пневмозолотниками 5 потоків оброблюваної суспензії між кавітаторами.

Гомогенізована у кавітаторах біомаса, перероблених синьо-зелених водоростей, після кавітаційної обробки знову поступає у проміжний накопичувач 6, у якому відділяється від зайвої води. Відфільтровану тут воду зливають у відстійник 7, а підготовлений субстрат біомаси поступає на третій блок у ферментаційну камеру 8 для переробки його у біогаз. Разом із біомасою водоростей у камеру 8 подають із біопідстанції 9 анаеробні бактерії, які поглинаючи біомасу водоростей ферментують біогаз. Для пришвидшення процесу, завантажену у ферментаційну камеру, біомасу підігрівають до температури 60 °С. Із ферментаційної камери утворений біогаз відпompовується на газову підстанцію 10, де ним наповнюють спеціальні балони та ємності для подальшого використання. Відпрацьовані продукти ферментації біогазу видаляють із камери 8 і спрямовують у спеціальний накопичувач 11 для подальшої переробки у органічні добрива для підживлювання рослин. Таким чином забезпечується безвідходність технологічного процесу переробки синьо-зелених водоростей.

Одержаний біогаз переважно використовують як паливо для нагрівання води систем обігріву тепличних господарств або господарських чи виробничих приміщень. Враховуючи доволі високу теплотворну здатність біогазу, яка лише на 25–30 % поступається за цим параметром природному газу метану, біогаз може успішно використовуватись і для біоенергетики.

Відмінністю запропонованого технологічного процесу переробки синьо-зелених водоростей на біогаз від традиційних типових є додаткове облаштування в ньому блоку №II кавітаційної гомогенізації біомаси. Звичайно, на його облаштування, функціонування та обслуговування витратимуться додаткові кошти. Однак підвищення на 20–25 % виходу готового продукту, тобто біогазу, при значних обсягах переробки водоростей не тільки перекриває затрати на облаштування і функціонування блоку віброкавітаційної гомогенізації сировини, а і забезпечуватиме додаткові прибутки.

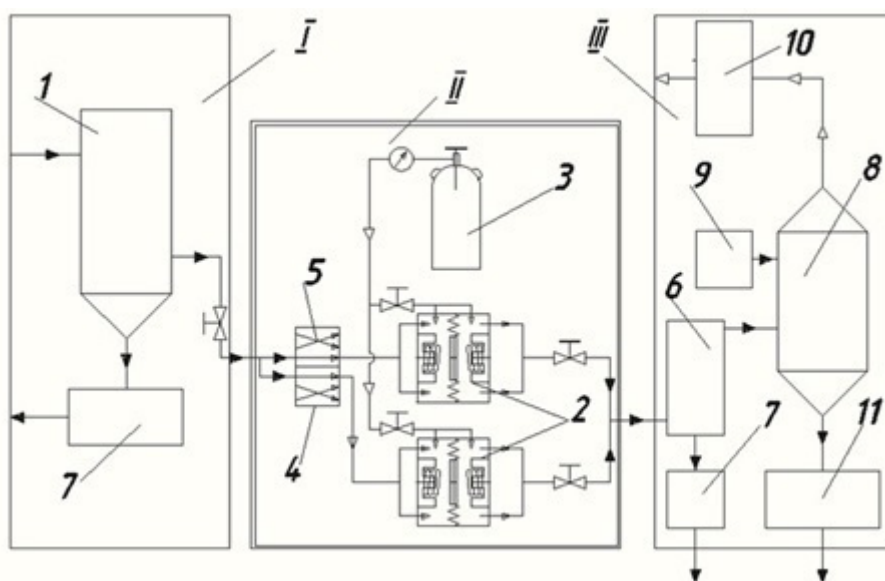


Рис. 5. Принципова технологічна схема процесу переробки синьо-зелених водоростей на біогаз із віброкавітаційною гомогенізацією біомаси: 1 – накопичувач вихідної сировини, 2 – віброрезонансні кавітатори, 3 – підстанція подачі газу, 4 – регульовальна електроапаратура, 5 – пневмозолотникові перемикачі потоків рідини, 6 – проміжний накопичувач, 7 – відстійник, 8 – ферментаційна камера, 9 – біопідстанція анаеробних бактерій, 10 – підстанція накопичення газу, 11 – накопичувач відпрацьованої сировини

Спроможність до руйнування стінок ціанобактерій, яке супроводжується вивільненням їх внутріклітинного вмісту та повною руйнацією, дозволяє успішно застосовувати віброкавітатори для знезараження від біологічного забруднення воду водойм риборозплідних господарств, особливо невеликих за розмірами і мілководних водойм для вирощування молоді (малька) риби. Придатні вони і для очищення від біологічних та органічних забруднень води незначних за розмірами водойм громадського використання,

наприклад, басейнів, ставків, озер тощо. В цьому випадку, оснащену віброкавітаторами із пультом керування їх роботою, очисну підстанцію облаштовують на березі водойми. Насосами воду подають у віброкавітатори, в робочих камерах яких окиснюються органічні забруднювачі і руйнуються стінки бактеріальних клітин. Після нетривалого відстоювання очищену воду повертають у водойму, а осілий у відстійниках намул переробляють на органічні добрива для підживлювання рослин.

Таким чином можна відзначити, що результати даного дослідження повною мірою стосуються двох вагомих для людства аспектів. Перш за все, це покращення екології довкілля завдяки знищенню активних забруднювачів природної води, якими являються ціанобактерії. Поряд з тим, певною мірою вдосконалюється і такий важливий напрямок енергетики, як біоенергетика, що ґрунтується на використанні відновлювальних джерел енергії, якими являються синьо-зелені водорості.

Результати дослідження сприяють і розширенню сфери ефективного промислового застосування кавітації. Специфічна форма коливних збудовувачів кавітації у запропонованій конструкції віброкавітатора надає можливість успішного їх використання для кавітаційного обеззаражування від біологічних забруднень рідин на основі води підвищених, порівняно із водою, густини та в'язкості. Це відкриває перспективу успішного використання даних віброкавітаторів для знезараження від органічних та біологічних забруднень стічних вод підвищених густини та в'язкості підприємств переробної та харчової промисловості, наприклад, пивоваріння, підприємств приготування дріжджів тощо.

Висновки

1. Гомогенізація суспензій синьо-зелених водоростей пристроями віброрезонансної кавітації на 25 – 30 % підвищує обсяги ферментації з їх біомаси біогазу. Це на 10 – 15 % вищий рівень порівняно із гомогенізацією біомаси водоростей гідродинамічною кавітаційною обробкою лопатевими кавітаторами і на 15 – 20 % перевищує обсяги ферментації після ультразвукової кавітаційної обробки.
2. Запропонована конструкція промислового віброрезонансного електромагнітного кавітатора спроможна забезпечити продуктивність процесу гомогенізації синьо-зелених водоростей в межах 0,75 – 1,0 м³/год. Враховуючи тривалість процесу ферментації, яка триває декілька суток, слід відзначити, що для забезпечення безперебійної роботи однієї ферментаційної камери об'ємом 100 м³ достатньо двох працюючих по чергово віброкавітаторів із поперечним перерізом робочої камери 10 дюймів.
3. Вдосконалена технологічна схема ферментаційної переробки синьо-зелених водоростей на біогаз включає три основні блоки, а саме блок накопичення і підготовки водяної суспензії синьо-зелених водоростей, блок підготовки біомаси синьо-зелених водоростей гомогенізацією віброкавітаторами та блок ферментації біогазу процесом “метанового бродіння”. При цьому вихід готового продукту, тобто біогазу, із 1т. біомаси синьо-зелених водоростей знаходиться в межах 30 м³, що еквівалентно 0,6 т нафти або 0,51 т дизельного палива.
4. Вагомою перевагою ферментації біогазу із синьо-зелених водоростей є не тільки доступність та дешевизна сировини, а ще більшою мірою супутній переробці водоростей процес покращення екологічного стану природних водойм очищенням їх вод від такого активного і токсичного забруднювача як синьо-зелені водорості. Адже, для приготування 1 м³, підлягаючого переробці “метановим бродінням”, субстрату синьо-зелених водоростей їх необхідно зібрати із приблизно півтора-двох гектарів водяного дзеркала природної водойми. Це позитивно впливає на екологічний стан природної водойми загалом і якість її води зокрема.

References

1. Мальований М.С. Оптимальні умови отримання енергії із ціанобактерій / М.С. Мальований, О.Д. Синельников, О.В. Харламова, А.М. Мальований // Хімічна промисловість України. – 2014. – № 5. – С. 39–43.
2. Malovanyu Myroslav Reduction of the environmental threat from uncontrolled development of cyanobacteria in waters of Dnipro reservoirs/ Myroslav Malovanyu, Volodymyr Nykyforov, Olena Kharlamova, Olexander Synelnikov, Khrystyna Dereyko // Environmental Problems. – 2016. – № 1. – P. 61–64.
3. Никифоров В.В. О природоохранных и энергосберегающих перспективах использования синезеленых водорослей / В.В.Никифоров // Промышленная ботаника. – 2010. – № 10. – С. 193 – 196.
4. Choi S.P., Nguyen M.T., Sim S.J. Enzymatic pretreatment of *Chlamydomonas reinhardtii* biomass for ethanol production. Bioresour Technol. – 2010. – No. 101. – P. 5330–5336. doi: 10.1016/j.biortech.2010.02.026.
5. Harun R, Jason W, Cherrington T, Danquah M.K. Exploring alkaline pre-treatment of microalgal biomass for bioethanol production. Appl Energy. – 2011. – No. – 88. – P. 3464–3467. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.10.048.

6. Li Y. Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid production of *Neochloris oleoabundans* / Y. Li, B.Wang, N. Wu, C.Q. Lan // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2008. – Vol. 4. – № 81. – P. 629–636.
7. Hossain A. Biodiesel fuel production from algae as renewable energy / A. Hossain, A. Salleh, A.N. Boyce, P. Chowdhury, M. Naqiuddin // *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*. – 2008. – Vol. 3, – № 4. – P. 250–254.
8. Mata Teresa M. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review / Teresa M. Mata, Antonio A. Martins, Nidia. S. Caetano // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – Vol. 14, No. 1. – P. 217–232.
9. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія/ Т.М. Вітенько. – Тернопіль: Вид-во ТДУТ ім. І.Пулюя, 2009. – 224 с.
10. Сілін Р.І. Властивості води та сучасні способи її очищення: монографія/ Р.І. Сілін, Б.А. Баран, А.І. Гордєєв. – Хмельницький: ХНУ, 2009. – 254 с.
11. Вітенько Т.М. Механізм та кінетичні закономірності інтенсифікуючої дії гідродинамічної кавітації у хіміко-технологічних процесах: дис. ... д-ра техн. наук. – Львів, 2010.
12. Шевчук Л.І. Автономний кавітатор для знезараження ціанобактерій та аерації води відкритих водойм / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган, І.З. Коваль // *Водне господарство України*. – 2012. – С. 30–36.
13. Шевчук Л.І. Низькочастотні віброрезонансні кавітатори: монографія / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган, В.Л. Старчевський – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 176 с.
14. Rodolfi L. Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor / Rodolfi L., Zittelli G.C., Bassi N., Padovani G., Biondi N., Bonini G., and dr. // *Biotechnology and Bioengineering*. – 2009. – Vol. 1, No. 102. – P. 100–112.
15. Chisti Y. Biodiesel from microalgae / Y.Chisti // *Biotechnology Advances*. – 2007. – Vol. 3, No. 25. – P. 294–306.
16. Malovanyy, M. Production of renewable energy resources via complex treatment of cyanobacteria biomass / M. Malovanyy, V. Nikiforov, O. Kharlamova, O. Synelnikov, // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2016. – Vol. 10, No. 2. – P. 251–254.
17. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): монографія. О.С. Ланець. – Львів: Вид-во Нац. Ун-ту «Львівська політехніка», – 2008. – 324 с.

Виброрезонансний кавітатор для гомогенізації водорослей пресноводних водоемів як сировини для біоенергетики

И. С. Афтаназив, Л. Р. Струтинская, О. И. Строган, И. Г. Свидрак

Аннотация. Усовершенствован технологический процесс переработки сине-зеленых водорослей пресноводных водоемов в биогаз. Для повышения производительности процесса ферментации биогаза создана новая конструкция виброрезонансного кавитатора. Производительность разработанного кавитатора достигает 0,75 – 1,0 м³/час. при поперечном сечении рабочей камеры 10 дюймов. Использование на этапе подготовки суспензии водорослей их кавитационной обработки предложенным виброкавитатором позволяет на 25 – 30 % повысить ферментацию биогаза из биомассы. Целью работы является совершенствование технологического процесса ферментации биогаза из сине-зеленых водорослей, а также разработка пригодной для этого конструкции виброкавитатора. Основные задачи исследования – разработка конструкции виброкавитаторов с электромагнитным приводом и исследования эффективности их применения для гомогенизации сине-зеленых водорослей в процессе их переработки в биогаз. Результаты исследования позволяют повысить производительность технологии переработки водорослей в биогаз, а также улучшить экологическое состояние водоемов и окружающей среды благодаря забору из воды вредных сине-зеленых водорослей.

Ключевые слова: сине-зеленые водоросли, цианобактерии, экология, вода, биогаз, технология, кавитация, виброкавитатор, электромагнит.

Vibroresonant cavitator for homogenization of freshwater algae as raw materials for bioenergy

I. S. Aftanaziv, L. R. Strutyn's'ka, O. I. Strohan, I. H. Svidrak

Abstract. The technological process of processing blue-green algae of freshwater reservoirs into biogas has been improved. To increase the productivity of the biogas fermentation process, a new design of vibration-resonant cavitator was created. Productivity of the developed cavitator reaches 0,75 – 1,0 m³/h. with a cross section of the working chamber of 10 inches. The use of the cavitation treatment of algae suspension at the stage of preparation of the algae suspension allows to increase the fermentation of biogas from biomass by 25 – 30 %. The aim of the work is to improve the technological process of fermentation of biogas from blue-green algae, as well as to develop a suitable design of the vibrocavitator. The main objectives of the study are to develop the design of vibrocavitators with electromagnetic drive and study the effectiveness of their use for homogenization of blue-green algae in the process of their processing into biogas.

The results of the study allow to increase the productivity of the technology of algae processing into biogas, as well as to improve the ecological condition of water bodies and the environment by removing harmful blue-green algae from the water.

Keywords: blue-green algae, cyanobacteria, ecology, water, biogas, technology, cavitation, vibrocavitation, electromagnet.

References

1. Mal'ovanyy, M.S., Synel'nikov, O.D., Kharlamova, O.V. and Mal'ovanyy, A.M. (2014), "Optymal'ni umovy otrymannya enerhiyi iz tsianobakteriy", *Khimichna promyslovisht' Ukrayiny*, no. 5, pp. 39–43.
2. Malovanyy, Myroslav, Nykyforov, Volodymyr, Kharlamova, Olena, Synelnikov, Olexander and Dereyko, Khrystyna (2016), "Reduction of the environmental threat from uncontrolled development of cyanobacteria in waters of Dnipro reservoirs", *Environmental Problems*, no. 1, pp. 61–64.
3. Nikiforov, V.V. (2010), "O prirodookhrannykh i energosberegayushchikh perspektivakh ispol'zovaniya sinezelenykh vodorosley", *Promyshlennaya botanika*, vol. 10, pp. 193–196.
4. Choi, S.P., Nguyen, M.T. and Sim, S.J. (2010), "Enzymatic pretreatment of *Chlamydomonas reinhardtii* biomass for ethanol production", *Bioresour Technol.*, no. 101, pp. 5330–5336, doi: 10.1016/j.biortech.2010.02.026.
5. Harun, R., Jason, W., Cherrington, T. and Danquah, M.K. (2011), "Exploring alkaline pre-treatment of microalgal biomass for bioethanol production", *Appl Energy*, no. 88, pp. 3464–3467, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.10.048.
6. Li, Y., Wang, B., Wu, N. and Lan, C.Q. (2008), "Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid production of *Neochloris oleoabundans*", *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 4, no. 81, pp. 629–636.
7. Hossain, A., Salleh, A., Boyce, A.N. Chowdhury, P. and Naquiuddin, M. (2008), "Biodiesel fuel production from algae as renewable energy", *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, vol. 3, no. 4, pp. 250–254.
8. Mata, Teresa M., Martins, Antonio A. and Caetano, Nidia S. (2010), "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 217–232.
9. Viten'ko, T.M. (2009), Hidrodinamichna kavitatsiya u masoobminnykh, khimichnykh i biolohichnykh protsesakh [Hydrodynamic cavitation in mass transfer, chemical and biological processes], monohrafiya, Vyd-vo TDUT im. I.Pulyuya, Ternopil', Ukraine.
10. Silin, R.I., Baran, B.A. and Hordyeyev, A.I. (2009), Vlastyvosti vody ta suchasni sposoby ziyi ochyshchennya: monohrafiya, KHNU, Khmel'nyts'kyi, Ukraine.
11. Viten'ko, T.M. (2010), Mekhanizm ta kinetychni zakonomirnosti intensyfikuyuchoyi diyi hidrodinamichnoyi kavitatsiyi u khimiko-tehnolohichnykh protsesakh: dys. ... d-ra tekhn, Nauk, Lviv, Ukraine.
12. Shevchuk, L.I., Aftanaziv, I.S., Strohan, O.I. and Koval', I.Z. (2012), "Avtonomnyy kavitator dlya znezarazhennya tsianobakteriy ta aeratsiyi vody vidkrytykh vodoyom", *Vodne hospodarstvo Ukrayiny*, pp. 30–36.
13. Shevchuk, L.I. Aftanaziv I.S., Strohan O.I., Starchevs'kyi V.L. (2013), "Nyz'kochastotni vibrorezonansni kavitatory, monohrafiya, Vydavnytstvo L'vivs'koyi politekhniki, L'viv, Ukraine.
14. Rodolfi, L., Zittelli, G.C., Bassi, N., Padovani, G., Biondi, N., Bonini, G. and dr. (2009), "Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor", *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 1, no. 102, pp. 100–112.
15. Chisti, Y. (2007), "Biodiesel from microalgae", *Biotechnology Advances*, vol. 3, no. 25, pp. 294–306.
16. Malovanyy, M., Nikiforov, V., Kharlamova, O. and Synelnikov, O. (2016), "Production of renewable energy resources via complex treatment of cyanobacteria biomass", *Chemistry & Chemical Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 251–254.
17. Lanets', O.S. (2008), Vysokoeffektyvni mizhrezonansni vibratsiyini mashyny z elektromahnitnym pryvodom (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorenniya), monohrafiya, Vyd-vo Nats. Un-tu "L'vivs'ka politekhnika", Lviv, Ukraine.