

ПЕРЕДУМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ АВТОНОМНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ АКВАКУЛЬТУРИ

Отримано 29 трав. 2023; рекомендовано до публікації 22 чер. 2023
Доступно онлайн 30 чер. 2023

Г. О. Четверик¹, О. А. Яременко², Г. А. Голуб³

Автор для кореспонденції: Оксана Яременко,
e-mail: oxanalutak@ukr.net

¹ канд. техн. наук.
<https://orcid.org/0000-0001-9398-1968>

² пров. інженер.
<https://orcid.org/0000-0001-5440-4682>

³ д-р техн. наук, професор.
<https://orcid.org/0000-0002-2388-0405>

^{1,2} Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
м. Київ, Україна.

³ Національний університет біоресурсів та природо-
користування України, м. Київ, Україна.

Набуває поширення використання рециркуляційних систем водопостачання для розведення прісноводної риби. Важливим і актуальним є забезпечення енергетичної автономності таких систем. Одним із способів енергетичного використання відходів рибних господарств є метанове зброджування осадів стічних вод підприємств аквакультури. Метою роботи є оцінка можливості виробництва біогазу із осадів стічних вод в аквакультурі для забезпечення часткової енергетичної автономності рециркуляційних систем водопостачання. Стаття присвячена аналізу сучасного стану досліджень метанового зброджування осадів стічних вод рециркуляційних систем водопостачання. Аналіз виконано на основі наукових публікацій в даному напрямку та власних досліджень. Наведено аналіз технічних рішень для систем штучного вирощування риби з використанням біогазу. Встановлено, що осад стічних вод рибних господарств є перспективною сировиною для отримання біогазу, що дає змогу досягнути часткової автономності рециркуляційних систем водопостачання. Бібл. 48, рис. 4.

Ключові слова: рециркуляційна система водопостачання, аквакультура, осад стічних вод, біогаз, енергетична автономність.

PREREQUISITES FOR ENSURING ENERGY AUTONOMY AQUACULTURE ENTERPRISES

Received 29 May. 2023; accepted 22 Jun. 2023
Available online 30 Jun. 2023

Н. Chetveryk¹, О. Yaremenko², G. Golub³

Author for correspondence: Oksana Yaremenko,
e-mail: oxanalutak@ukr.net

¹ Cand. of Tech. Sciences.
<https://orcid.org/0000-0001-9398-1968>

² Senior engineer.
<https://orcid.org/0000-0001-5440-4682>

³ Doctor of Tech. Sciences, professor.
<https://orcid.org/0000-0002-2388-0405>

^{1, 2} Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sci-ences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

³ National University of Life and Environ-mental Sciences of Ukraine , Kyiv, Ukraine.

The use of recirculating water supply systems for breeding freshwater fish is becoming widespread. It is important and urgent to ensure the energy autonomy of such systems. One of the methods of energy use of waste from fish farms is methane fermentation of sewage sludge from aqua culture enterprises. The purpose of the work is to assess the possibility of biogas production from sewage sludge in aquaculture to ensure partial energy autonomy of recirculating water supply systems. The article is devoted to the analysis of the current state of research on methane fermentation of sewage sludge in water recirculation systems. The analysis was performed on the basis of scientific publications in this direction and own research. An analysis of technical solutions for artificial fish farming systems using biogas is provided. It has been established that sewage sludge from fish farms is a promising raw material for obtaining biogas, which makes it possible to achieve partial autonomy of recirculating water supply systems. Bibl. 48, fig. 4.

Keywords: installation of closed water supply, aquaculture, sewage sludge, biogas, energy autonomy.

Вступ. Аквакультура – одна з галузей харчової індустрії, що має значні темпи розвитку. Підвищення попиту на рибу й морепродукти супроводжується стабільним зростанням обсягів виробництва аквакультури. Для забезпечення потреб людства в рибній продукції до 2029 року її річне виробництво має зрости до 102 млн т [1].

В установках аквакультури виробляється більше половини рибної продукції. Дедалі більшого поширення набуває виробництво продукції аквакультури в установках рециркуляційного водопостачання (УРВ). Обсяги вирощування за допомогою таких систем прісноводних риб (найчастіше вугра і сома) та форелі невпинно зростають, в Європі вони становлять декілька тисяч тонн, також зростає використання прісноводної аквакультури в кра-

їнах Азії. Використання УРВ – найперспективніша світова тенденція.

УРВ – це системи, в яких вода після механічного та біологічного очищення використовується повторно під час виробництва продукції аквакультури. Такі системи забезпечують низький рівень впливу на навколишнє середовище, а також зменшують потреби у воді та енергії. На думку спеціалістів, аквакультура набагато менше здійснює викидів парникових газів порівняно з виробництвом м'яса у тваринництві. Це означає, що розведення та споживання білка, отриманого із риби, може сприяти пом'якшенню наслідків зміни клімату.

На рис. 1 показано стандартну УРВ [2].

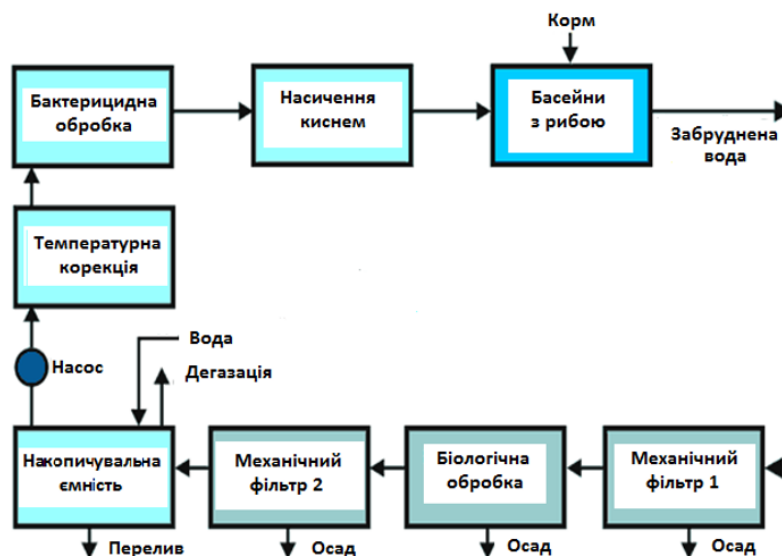


Рис. 1. Блок-схема установки рециркуляційного водопостачання для аквакультури

Fig. 1. Block diagram of a recirculating water supply for the production of aquaculture

При вирощуванні риби в рециркуляційних установках всі параметри технологічного процесу підтримуються за допомогою автоматизованих пристроїв, а вплив природних факторів на хід технологічного процесу мінімальний. Вихід продукції в таких системах є постійним і передбачуваним. Однак такі системи потребують складного технологічного забезпечення, яке підлягає постійному вдосконаленню. Споживаючи кисень і корми, риби забруднюють воду екскрементами, вуглекислим газом і аміаком. Головне завдання всього технологічного процесу – очищення оборотної води, оскільки від 85 до 95 % води, зливої з рибних басейнів, повертається в систему, а продукти життєдіяльності риб із неї мають бути видалені.

Основні параметри, що впливають на процес розвитку та вирощування риби в таких системах – температура і концентрація розчиненого кисню у воді. Для УРВ характерним є висока частка витрат на підтримання оптимальної температури води в складі собівартості вирощуваної риби. Тому важливим є забезпечення енергетичної автономності УРВ.

Останнім часом виконаний значний обсяг досліджень щодо розробки технічних засобів для реалізації процесу метанового зброджування органічної сировини [3]. Отримано кінетичні рівняння анаеробної ферментації органічної біомаси для умов порційного зброджування [4]. Досліджено процес анаеробного зброджування осаду, що утворюється в морських рециркуляційних системах аквакультури та в установках аквапоніки [5]. Однак процес виробництва біогазу з осаду стічних вод систем штучного вирощування риби потребує подальшого удосконалення в напрямку створення ефективних біогазових реакторів та забезпечення енергетичної автономності УРВ.

Мета роботи – оцінити можливості виробництва біогазу з осадів стічних вод в аквакультурі для забезпечення часткової енергетичної автономності УРВ.

Виклад основного матеріалу. Намагання вирішити проблему енергетичної автономності відкрили новий перспективний напрямок у конструюванні техніки та обладнання для аграрного виробництва. Аналіз свідчить про стрімке впровадження у виробництво інноваційних ресурсощадних технологій. Ряд країн останніми роками

зробили значний крок у використанні відновлюваних джерел енергії та продовжують розвивати свої науково-технічні досягнення в цій галузі [6].

До рибних господарств висуваються дедалі суворіші вимоги до утилізації осаду, а тому триває активний пошук економічно вигідних рішень для обробки рибного осаду. Досліджуючи чотири речовини, що мали різне співвідношення рибного осаду та гною дійних корів, було зроблено висновок, що чим вище частка рибного осаду (вміст сухої маси 13 %, органічної маси – 79 %), який подається в процес анаеробного розщеплення, тим вище частка мінералізованого азоту в переробленому осаді [7].

У світі є приклади впровадження промислових рішень зброджування відходів на крупному рибному підприємстві. Це біогазова станція «Біокрафт» (Biokraft LBG, Skogn, Norway), яка є найбільшою у світі, що виробляє зріджений біометан, який використовують як паливо для важких автомобілів і автобусів. Річний вихід зрідженого біометану становить 12,5 млн м³. Для отримання біогазу використовують сумішевий субстрат, що складається з відходів рибного підприємства (the Norwegian salmon farming industry) і осадів стічних вод від локальної промислової очисної споруди паперової фабрики «Тронделаг» (Norske Skog's pulp and paper industry in Skogn). Такий субстрат дає змогу отримати стабільний вихід біогазу в реакторах. Для зброджування використовують мезофільний режим у двох конвекційних реакторах, один – типу CSTR, що забезпечує виробництво 85 % метану, другий – реактор типу ECSB. Сирий біогаз очищують до біометану з використанням технології амінового скрубера. Дигестат зневоднюють і використовують як добриво [8].

Попередні дослідження показали, що рибний осад має значний потенціал для виробництва біогазу. Проте коли рибний осад є єдиним субстратом при анаеробному зброджуванні, накопичення аміаку, жирних кислот і летких жирних кислот може призвести до гальмування процесу виділення біогазу. Так, мезофільна анаеробна обробка лососевого осаду з вмістом сухої маси від 6,3 до 12,3 % у безперервному реакторі при температурі 35 °C та гідравлічному утриманні впродовж 55–60 днів давала змогу досягти стабілізації хімічної потреби в кисні від 44 до 54 % та виходу метану від 0,14 до 0,154 л/г доданої органічної маси. Процес був сильно інгібований, при цьому концентрація летких жирних кислот досягала 28 г/л. Буферна ємність була достатньою, щоб забезпечити значення рН від 7,4 до 7,55. Поживна цінність осаду, як добрива, становила від 3,4 до 6,8 кг азоту та від 1,2 до 2,4 кг фосфору на тонну. Енергії метану, яка була досягнута в цьому дослідженні, буде достатньо для покриття приблизно від 2 до 4 % енергетичних потреб рибного господарства. На практиці складно проводити стабільні анаеробні процеси анаеробного зброджування при вмісті рибного осаду більше 20 об.% [9].

Було досліджено зброджування сумішевого субстрату осадів стічних вод рибного господарства і подрібненого очерету. Зразки осаду були взяті з рибного господарства, що розташоване в Краславському районі Калнеської волості. Такий органічний субстрат було підібрано з метою збільшення вмісту органічної речовини і зменшення впливу несприятливих факторів на процес зброджування. При дослідженні процесу отримання біогазу з відходів аквакультури було встановлено, що використання сумішевого субстрату осадів стічних вод рибного господарства і подрібненого очерету призвело до підвищення виходу біогазу і покращення стабільності процесу зброджування [10].

Незважаючи на прогнозоване різке зростання світового рибного виробництва, проведені на цей час дослідження не інтегрують аквакультуру та сільське господарство, таким чином усуваючи можливість оцінити їх взаємовплив. Однак щодо аквакультури та сільського господарства визначено можливі міжгалузеві синергії для забезпечення оптимізації використання фосфору. Показано, що переробка вторинної сировини як в межах секторів, так і між ними, далека від оптимізації, а прогнозоване зростання аквакультури створить майбутні екологічні виклики. Зазначено, що довгострокові зусилля мають зосереджуватися на вдосконаленні методів аналізу технологічних та екологічних систем, щоб забезпечити відновлення фосфору від стоків аквакультури та гною в тваринництві [11].

Вирішальне значення має використання екологічних інженерних інструментів для розвитку стійкої аквакультури. У цьому контексті створюються інтегровані системи мультитрофної аквакультури, засновані на морських водоростях, які були ефективними біофільтрами. Було встановлено, що температура та світло – основні чинники навколишнього середовища, які зумовлювали ефективність вирощування та видалення живильних речовин водоростями. Такі системи готові до впровадження в аквакультурі й мають екологічні та потенційно економічні вигоди для рибного господарства [12, 13].

Інтеграція сільського господарства та аквакультури з анаеробною переробкою біомаси є популярною практикою в невеликих азійських господарствах як спосіб виробництва енергії та риби, тобто забезпечує кращий баланс живильних речовин та переробку ресурсів. Аналіз показав, що поліпшення в такій системі можуть бути досягнуті завдяки кращому управлінню водними ресурсами в аквакультурі та збільшенню рівня використання біогазу [14–18].

Розроблена установка рециркуляційного водопостачання для виробництва продукції аквакультури, у складі якої резервуари для культивування риби, механічний фільтр, біофільтр із відстійником, пристрої для бактеріцидної обробки води та насичення її киснем, пристрій для видалення вуглекислого газу з води, що пройшла біофільтрацію, біогазова установка для метанового зброджування осаду, що утворюється під час біофільтрації, та когенераційна установка для виробництва тепла й електроенергії [19, 20, 21].

На рис. 2 зображено блок-схему установки рециркуляційного водопостачання для виробництва продукції аквакультури з виробництвом біогазу.

У процесі обробки потоку циркулюючої води, яка надходить із резервуарів з рибою, вона надходить у біофільтр та відстоюється для видалення осаду. Далі з потоку води за допомогою пристрою для видалення вуглекислого газу видаляють його надлишок і насичують воду киснем за допомогою пристроїв для бактерицидної обробки води та насичення її киснем. Осад, що утворюється при

відстоюванні води у біофільтрах, спрямовується в біогазову установку для забезпечення виробництва біогазу при метановому зброджуванні органічних складових осаду. Утворений біогаз потрапляє в когенераційну установку для виробництва тепла й електроенергії, що забезпечує часткову енергетичну автономність УРВ для виробництва аквакультури. Зброджений осад після подальшого компостування може бути утилізований як органічні добрива. На компостування подається також вода та осад після промивання фільтрів.

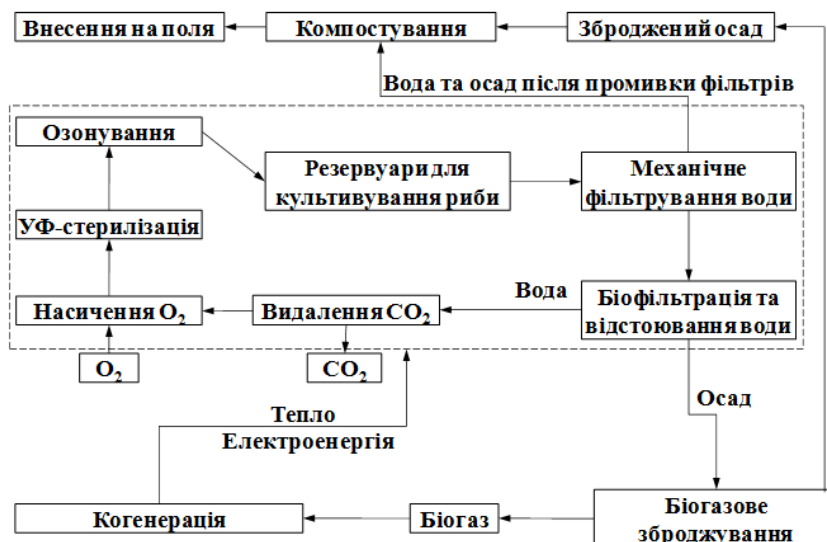


Рис. 2. Блок-схема установки рециркуляційного водопостачання для виробництва продукції аквакультури з виробництвом біогазу

Fig. 2. Block diagram of a recirculated water supply installation for the production of aquaculture products with biogas production

Таке технічне рішення установки рециркуляційного водопостачання для виробництва продукції аквакультури дає змогу забезпечити часткову енергетичну автономність за рахунок тепла й електроенергії, отриманих при когенерації біогазу, який утворюється при метановому зброджуванні органічних складових осаду (залишки кормів, продукти метаболізму, відходи переробки риби тощо), що відстоюється при функціонуванні системи. На рис. 3 зображено блок-схему установки рециркуляційного водопостачання для виробництва продукції аквакультури (ракоподібних, риби й двостулкових молюсків) з культивуванням водоростей для очищення води та виробництвом біогазу.

Наведена установка рециркуляційного водопостачання для виробництва продукції аквакультури була удосконалена шляхом додавання резервуарів для вирощування продукції аквакультури у такий послідовності по ходу циркулюючої води [22–26]:

- перший резервуар – для вирощування ракоподібних, оскільки вони є найвимогливішими до чистоти води, що дає можливість більш повного використання культивованих об'єктів аквакультури та отримання додаткової товарної продукції у вигляді ракоподібних, які

мають подібні з рибою вимоги до температурного режиму, але різну витривалість щодо вмісту у воді сполук азоту та насиченості води киснем;

- другий резервуар – для вирощування риби;
- третій резервуар – для вирощування двостулкових молюсків, оскільки вони забезпечують можливість більш повного використання поживних речовин, що виходять разом з водою з резервуарів для вирощування риби, як основного об'єкта аквакультури та поглибленої агломерації органічної речовини під час вирощування двостулкових молюсків та її ефективнішої подальшої механічної фільтрації, оскільки одним з продуктів життєдіяльності двостулкових молюсків є фекальні пелети, що ефективно затримуються.

Ця установка рециркуляційного водопостачання для виробництва продукції аквакультури також має пристрої для видалення вуглекислого газу з води, що пройшла біофільтрацію, та насичення її киснем, які об'єднані в один пристрій та виконані у вигляді блока для культивування водоростей, сполученого з біогазовою установкою для забезпечення зброджування надлишкової маси водоростей [27].



Рис. 3. Блок-схема установки рециркуляційного водопостачання для виробництва продукції аквакультури (ракоподібних, риби і двостулкових молюсків) з культивуванням водоростей для очистки води та виробництвом біогазу

Fig. 3. Block diagram of a recirculated water supply installation for the production of aquaculture products (crustaceans, fish and bivalve molluscs) with algae cultivation for water purification and biogas production

Важливе значення при переробці осадів має їх попереднє ущільнення. Для його реалізації розроблено значну кількість ущільнювачів, які працюють на основі використання явища гравітаційного розшарування осаду і води [28].

Видалення твердих завислих частинок із води здійснюється седиментацією або механічною фільтрацією [29]. Дослідження за трьома системам УРВ [30, 31] показали, що більше 95 % завислих твердих частинок мали діаметр менше 20 мкм, а тому концентрація твердих завислих частинок у воді має тенденцію до зростання в системах рециркуляції. Слід уникати високих концентрацій зважених твердих частинок, оскільки вони утворюють додаткове джерело аміаку, який токсичний для риби. Крім того, вони можуть викликати пошкодження зябер, що призводить до стресу й підвищення сприйнятливості до хвороби. Видалення дрібних зважених твердих частинок доцільно здійснювати біологічним окисленням, коли поживні речовини, що вивільняються в системі УРВ, можуть бути перетворені в рослинну або іншу біомасу, що легко підлягає видаленню і часто може бути цінним побічним продуктом. Цей «екологічний» підхід викликає неабиякий інтерес і останнім часом спонукає до збільшення дослідницьких зусиль [32–36].

З погляду біологічної потреби в кисні, вихід органічних забруднень при виробництві 1 т риби еквівалентний кількості необробленої стічної води від 20 осіб [37]. Невикористані корми й екскременти є основним джерелом твердих речовин в УРВ для аквакультури. Їх кількість може бути зменшена за рахунок ускладнення систем годування, при яких втрати кормів можуть становити до 1 % загальної кількості [38].

Встановлено, що виробництво твердих речовин (не з'їдені корми й екскременти) в системах аквакультури варіюється від 11 до 38 % використаного корму [39–41].

Біологічній деградації твердих органічних речовин аквакультури на сьогоднішній день приділяється недостатньо уваги, а тому такі класичні методи, як аеробна та анаеробна деградація органічних речовин осадів, доцільно розглядати в їх поєднанні з розробкою відповідного наукового обґрунтування біотехнологічних процесів та технічних засобів для їх реалізації.

Досліджено процес анаеробного збродження соляного осаду, що утворюється в морських рециркуляційних системах аквакультури та з використанням інокулянту, виготовленого з анаеробного зброженого відвару морської риби [42]. Біогазовий реактор підживлювався солоним осадом у кількості 250 мл на перших трьох стадіях і 190 мл на останніх двох стадіях, в результаті чого час утримання осаду в реакторі становив 32 і 42 дні, відповідно. Вихід метану становив 283 мл CH_4 з одного грама органічної маси (рис. 4).

Аналогічні дослідження анаеробного збродження осаду морських УРВ із солоністю 14 г/л та вмістом органічних речовин від 45,2 до 70,9 % в реакторі з безперервним перемішуванням упродовж 32–42 днів, дозволило отримати від 0,126 до 0,35 л метану на один грам доданої органічної речовини (від 25,5 до 56,7 л метану на один літр доданого осаду). Вихід метану становив від 0,797 до 1,772 л на один літр об'єму реактора за день або від 0,017 до 0,031 л метану на один грам органічної речовини в реакторі за день. При цьому вміст метану в біогазі становив від 46,1 до 65,5 % [43].

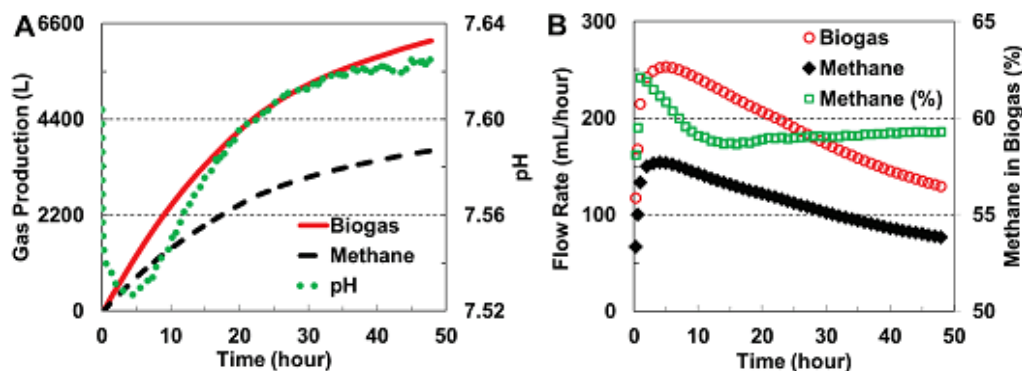


Рис. 4. Показники процесу зброджування солоного осаду аквакультури:

Gas production (L) – виробництво газу (л); Biogas – біогаз; methane – метан; Flow rate (ml/hour) – вихід біогазу (мл/год); Methane in biogas – вміст метану в біогазі

A – сукупний біогаз, виробництво метану та зміна pH осаду; B – швидкість потоку біогазу та вміст метану в біогазі

Fig. 4. Indicators of the process of digestion of saline sediment of aquaculture:

A – total biogas, methane production and change in sediment pH; B – biogas flow rate and methane content in biogas

Аналіз енергетичного балансу для концептуальної моделі аквапоніки, яка поєднує вирощування риби в УРВ з вирощуванням томатів [44], показав, що різниця між потенційною енергією, яка може бути вироблена шляхом анаеробного зброджування органічної маси в цій системі та потребою цієї системи в енергії буде мати позитивне значення при річному виробництві риби близько 3,4 т і близько 35 т томатів. Така система потребує резервуарів об'ємом 15 м³ для риби і 0,5 га землі для вирощування томатів. Проте площа, необхідна для такого виробництва, добре укладається в межі дрібної ферми з площею від 1 до 2 га [45].

Встановлено також, що найперспективнішими очисними агентами, здатними трансформувати амонійний нітроген у доступну рибакам білкову масу, є ряски – представники родини *Araceae* Juss підродина *Lemnoideae*. Інтерес до ряскових як очисних агентів забрудненої води в УРВ обумовлюється інтенсивністю видалення біогенних елементів і можливістю ефективною утилізації приросту біомаси рослин як корму для риб [46]. Ряскові можуть також використовуватися як сировина для виробництва біопалива [47]. Очисна потужність фітореактора з рясковими за нітрогеном при обробці циркуляційної води УРВ становить від 9,6 до 14,4 г азоту/(м²·добу) залежно від питомої маси рослин на одиниці площі. Ці показники забезпечуються при організації тривалості світлового періоду в межах від 12 до 16 годин на добу та інтенсивності освітлення від 6500 до 6650 Лк [48].

Висновки. В результаті аналізу сучасного стану досліджень процесу зброджування осаду стічних вод підприємств аквакультури встановлено, що осад стічних вод рибних господарств є перспективною сировиною для отримання біогазу, що дає змогу досягнути часткової автономності установок замкненого водопостачання.

Подальші дослідження. З огляду на вищевикладене доцільно провести аналіз технологічних операцій та тех-

нічних засобів очищення стічних вод систем штучного вирощування риби та виробництва біогазу з осаду стічних вод, дослідити питомі показники процесу метанового зброджування осаду стічних вод систем штучного вирощування риби. Слід установити взаємозв'язок конструкційно-технологічних параметрів біогазової установки при метановому зброджуванні осаду стічних вод систем штучного вирощування риби та енергетичних показників отриманого біогазу, провести дослідження метанового зброджування осаду стічних вод систем штучного вирощування риби, виконати техніко-економічну оцінку ефективності використання біогазової установки для метанового зброджування осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

ПОСИЛАННЯ

1. Пропозиція – Головний журнал з питань агробізнесу [Електронний ресурс] / Прогноз для сільського господарства на наступне десятиліття від ОЕСР: все хороше — позаду. Електрон. дані. 2019. – Режим доступу: <https://propozitsiya.com/ua/prognoz-dlya-sil'skogo-gospodarstva-na-nastupne-desyatlittya-vid-oesr-vse-horoshe-pozadu>. – Дата перегляду: 13.06.2023.
2. Проскурєнко І. В. Замкнутые рыбоводные установки. М.: Изд-во ВНИРО. 2003. 152 с.
3. G. A. Golub, K. Szalay, S. M. Kukharets, O. A. Marus. Energy efficiency of rotary digesters. Progress in Agricultural Engineering Sciences. A Journal of Agricultural, Environmental and Process Engineering. 2017. V. 13. Issue 1, 35–49. doi.org/10.1556/446.13.2017.3.
4. G. Golub, S. Kukharets, O. Zavadzka, O. Marus. Determination of the rate of organic biomass decomposition in biogas reactors with periodic loading. International Journal of Renewable Energy Research. 2019. Vol. 9. No. 4. 1741–1750.

5. Yang, Q., Wu, X., Yang, H., Zhang, S., & Chen, H. (2012). Nonrenewable energy cost and greenhouse gas emissions of a pig-biogas-fish system in china. *The Scientific World Journal*, 2012. doi:10.1100/2012/862021.
6. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В. О. Дубровін, М. О. Корчемний, І. П. Масло, О. Шептицький, А. Рожковський, З. Пасторек, А. Гжибек, П. Євич, Т. Амон, В. В. Криворучко. К.: ЦТІ "Енергетика і електрифікація". 2004. 137 с.
7. Brod, E., Oppen, J., Kristoffersen, A. Ø., Haraldsen, T. K., & Krogstad, T. (2017). Drying or anaerobic digestion of fish sludge: Nitrogen fertilisation effects and logistics. *Ambio*, 46(8), 852–864. doi:10.1007/s13280-017-0927-5.
8. Профіль станції «Біокraft» [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.biokraft.no/>. – Дата перегляду: 13.06.2023.
9. Gebauer, R., and B. Eikebrokk. 2006. Mesophilic anaerobic treatment of sludge from salmon smolt hatching. *Bioresource Technology* 97: 2389–2401.
10. Osipovs, S., Puckins A., Pupins M., Kirilova E., Soms Ju., 2022. Biogas production possibility from aquaculture waste / *Environment. Technologies. Resources. Proceedings of 13-th the International Scientific and Practical Conference, Latvia, Vol. 1*. Pp. 195–199. DOI: <https://doi.org/10.17770/etr2021vol1.6638>.
11. Hamilton, H. A., Brod, E., Hanserud, O. S., Gracey, E. O., Vestrum, M. I., Bøen, A., Steinhoff, F.S., Müller, D.B. Brattebø, H. (2016). Investigating cross-sectoral synergies through integrated aquaculture, fisheries, and agriculture phosphorus assessments: A case study of Norway. *Journal of Industrial Ecology*, 20 (4), 867–881. doi:10.1111/jiec.12324.
12. Установки замкнутого водоснабжения для рыбных хозяйств от «Aqua Plast» [Електронний ресурс] / УРВ для рыбных хозяйств. Електрон. дані. 2018. – Режим доступу: http://www.stroy.kg/promyshlennoe-oborudovanie/fish_industry/502-uzv-dlya-ribnih-hozyaystv.html. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 13.03.2018.
13. Summerfelt S. T., Hankins J. A., Summerfelt S. R., Heinen J. M. Modeling continuous culture with periodic stocking and selective harvesting to measure the effect on productivity and biomass capacity of fish culture systems. – *Techniques for Modern Aquaculture (Proc.)*, 21–23 June 1993, Spokane, WA. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph. P. 581–593.
14. G. Golub, S. Kukharets, Y. Yarosh, O. Zavadsk. Diversified production and bioenergy conversion for rural development. *Proceedings of the 8-th International Scientific Conference Rural Development 2017, Lithuania*, DOI: <http://doi.org/10.15544/RD.2017.186>.
15. G. Golub, S. Kukharets, Ya. Yarosh, O. Zavadsk. Structural models of agroecosystems and calculation of their energy autonomy. *Proceedings of the 18 International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2019, Jelgava, Latvia, May 22–24, 2019*, 1344–1350. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N073.
16. Nhu, T. T., Dewulf, J., Serruys, P., Huysveld, S., Nguyen, C. V., Sorgeloos, P., & Schaubroeck, T. (2015). Resource usage of integrated pig-biogas-fish system: Partitioning and substitution within attributional life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 27–38. doi:10.1016/j.resconrec.2015.06.011.
17. Wu, X. F., Wu, X. D., Li, J. S., Xia, X. H., Mi, T., Yang, Q., Chen, G. Q., Chen, B., Hayat, T., . Alsaedi, A. (2014). Ecological accounting for an integrated "pig-biogas-fish" system based on emergetic indicators. *Ecological Indicators*, 47, 189–197. doi:10.1016/j.ecolind.2014.04.033.
18. Rennert, B., Drews, M., 1989. A possibility of combined fish and vegetable production in greenhouses. *Adv. Fish. Sci.* 8. Pp. 19–27.
19. Голуб Г. А., Завадська О. А. Стан та перспективи розвитку установок замкнутого водопостачання для аквакультури. – Перспективи і тенденції розвитку конструцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь. Матеріали доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, 28–29 березня 2018 р. Житомир: ЖАТК. 2018. С. 29–32.
20. Патент на корисну модель 116270. Україна. МПК А01К 61/10, А01К 63/00. Установа замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури / Голуб Г. А., Завадська О. А., Кузьменко М. С., Кухарець С. М., Щербак С. Д., Маєвська А. Г. – Заявка № а 2016 12663; Заявлено 12.12.2016; Опубліковано 10.05.2017, Бюл. № 9. – 2 с.
21. Завадська О. А., Голуб Г. А. Удосконалена блок-схема установки замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури. – Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 6–7 квітня 2017 р.): 36. наук. статей. Львів: НУ «Львівська політехніка». С. 121–122.
22. Голуб Г. А., Завадська О. А., Кухарець В. В. Розробка блок-схем установки замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури. *Науковий журнал Житомирського агроекологічного університету «Наукові горизонти»*. ЖНАЕУ. 2019. № 5 (78). С. 105–111.
23. Голуб Г. А., Завадська О. А. Аквакультура в системі аграрного виробництва: 36. тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 112-ї річниці від дня народження д. т. н., професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ Крамарова Володимира Савовича 21–22 лютого 2019 р. К.: Вид. центр НУБІП України. 2019. С. 336–338.
24. Патент на корисну модель 125464. Україна. МПК А01К 61/00. Установа замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури / Щербак С. Д., Голуб Г. А., Завадська О. А., Маєвська А. Г. – Заявка № у 2017 12146; Заявлено 11.12.2017; Опубліковано 10.05.2018, Бюл. № 9. 2 с.
25. Патент на корисну модель 125465. Україна. МПК А01К 61/00. Установа замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури / Голуб Г. А., Завадська О. А., Щербак С. Д., Чуба В. В., Маєвська А. Г. – Заявка № у 2017 12147; Заявлено 11.12.2017; Опубліковано 10.05.2018, Бюл. № 9. 2 с.
26. Голуб Г. А., Завадська О. А. Інтеграція аграрного виробництва та аквакультури. – *Водні екосистеми у контексті євроінтеграції: Реалії та перспективи:*

- Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції приуроченої до Всесвітнього дня водних ресурсів, 21–22 березня 2019 р. Житомир: ЖНАЕУ. 2019. – 148. С. 75–78.
27. Патент на корисну модель 125463. Україна. МПК A01K 61/00. Установка замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури / Голуб Г. А., Маєвська А. Г., Завадська О. А., Щербак С. Д. – Заявка № у 2017 12145; Заявлено 11.12.2017; Опубліковано 10.05.2018, Бюл. № 9. 2 с.
 28. Патент на винахід 114971. Україна. МПК C02F 1/52, C02F 103/00, B01D 21/02, B01D 21/24. Відстійник / Голуб Г. А., Завадська О. А., Павленко М. Ю., Чуба В. В., Осипчук О. Ю. – Заявка № а 2015 11160; Заявлено 13.11.2015; Опубліковано 28.08.2017, Бюл. № 16. 3 с.
 29. Watten B. J. Modeling the effects of sequential rearing on the potential production of controlled environment fish-culture systems. *Aquac. Eng.* 11, 1992. Pp. 33–46.
 30. Chen, S., Malone, R. F., 1991. Suspended solids in recirculating aquaculture systems. In: *Engineering Aspects of Intensive Aquaculture*. Proc. from the Aquaculture Symposium, Cornell University, 4–6 April 1991. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, NY. Pp. 170–186.
 31. Chen, S., Timmons, M. B., Aneshansley, D. J., Bisogni, J. J., 1993. Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications. *Aquaculture*, 112. Pp. 143–155.
 32. Naegel, L. C. A., 1977. Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture*, 10. Pp. 17–24.
 33. Sutton, R. J., Lewis, W.M., 1982. Further observations on a fish production system that incorporates hydroponically grown plants. *Progr. Fish-Cult.*, 44. Pp. 55–59.
 34. Heinen J. M., Hankins J. A., Weber A. L., Watten B. J. A semiclosed recirculating-water system for high-density culture of rainbow trout. *Prog. Fish-Cult.* 1996. 58. Pp. 11–22.
 35. Rakocy, J. E., Hargreaves, J. A., Baily, D. S., 1989. Effect of hydroponic vegetable production on water quality in a closed recirculating system. *J. World Aquacult. Soc.*, 20 64A.
 36. Quillere, I., Marie, D., Roux, L., Gosse, F., Morot-Gaudry, J. F., 1993. An artificial productive ecosystem based on fish/bacteria/plant association. 1. Design and management. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 47. Pp. 13–30.
 37. Solbe, J. F. de L. G., 1982. Fish farm effluents: A United Kingdom survey. In: J.S. Alabaster (Editor), *Report of the EIFAC Workshop on Fish-farm Effluents*. EIFAC Tech. Pap. 41, FAO, Rome. Pp. 29–56.
 38. Beveridge, M. C. M., Phillips, M. J., Clarke, R. M., 1991. A quantitative and qualitative assessment of wastes from aquatic animal production. In: D.E. Brune and J.R. Tomasso (Editors), *Aquaculture and Water Quality*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA. Pp. 506–533.
 39. McLaughlin, T. W., 1981. Hatchery effluent treatment, US Fish and Wildlife Service. In: L. J. Allen and E. C. Kinney (Editors). *Proc. of the Bio-Engineering Symposium for Fish Culture*. Publ. No. 1. American Fisheries Society, Bethesda, MD. Pp. 167–173.
 40. Mudrak, V. A., 1981. Guidelines for economical commercial fish hatchery wastewater treatment systems. In: L.J. Allen and E.C. Kinney (Editors), *Proceedings of the Bio-Engineering Symposium for Fish Culture*. Publ. No. 1. American Fisheries Society, Bethesda, MD. Pp. 174–182.
 41. Chen, S., Coffin, D. E., Malone, R. F., 1993. Production, characteristics, and modeling of aquacultural sludge from a recirculating aquacultural system using a granular media biofilter. In: Jaw-Kai Wang (Editor), *Techniques for Modern Aquaculture*. ASAE, St. Joseph, MI. Pp. 16–25.
 42. Rui Carlos Barata Ferreira (2012). *Anaerobic digestion of sludge from marine recirculation aquaculture systems / Integrated Master in Environmental Engineering – 2011/2012 Faculty of Engineering of University of Porto, Porto, Portugal*. 90 p.
 43. Zhang, X. 2014. *Biomethane and Phosphorus Recovery from Brackish Aquaculture Recirculation System*. PhD theses printed by Delft Academic Press, Delft University of Technology. 163 p.
 44. Yogeve, U., Barnes, A., Gross, A. (2016). Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. *Water (Switzerland)*, 8, 589. doi:10.3390/w8120589.
 45. Tinsley, R. L. *Developing Smallholder Agriculture: A Global Perspective*; AgBe Publications: Brussels, Belgium. 2004. P. 585.
 46. Leng, R. A. Duckweed – a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish [Electronic resource] / R. A. Leng, J. H. Stambolie, R. Bell // *Livestock Research for Rural Development*. 1995. Vol. 7. Issue 1. – Available at: <http://www.lrrd.org/lrrd7/1/3.htm>.
 47. Ge, X. Growing Lemna minor in agricultural wastewater and converting the duckweed biomass to ethanol [Text] / X. Ge, N. Zhang, G. C. Phillips, J. Xu // *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 124. P. 485–488. doi: 10.1016/j.biortech.2012.08.050.
 48. Konontcev S., Sabliy L., Kozar M., Korenchuk N. Treatment of recirculating water of industrial fish farms in phytoreactor with lemnoideae / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 5/10 (89). P. 61–66. doi: 10.15587/1729-4061.2017.111910.

REFERENCES

1. Proposal – The main journal on agribusiness issues [Electronic resource] / Forecast for the agricultural economy for the next decade from the OECD: all good things are behind us - Electronic. data. 2019. – Access mode: <https://propozitsiya.com/ua/prognoz-dlya-silskogo-gospodarstva-na-nastupne-desyatylittya-vid-oesr-vse-horoshe-pozadu>. – Review date: 06/13/2023.
2. Proskurenko I. V. Closed fish farming installations. M.: Izd-vo VNYRO. 2003. 152 p.
3. G. A. Golub, K. Szalay, S. M. Kukharets, O. A. Marus. Energy efficiency of rotary digesters. *Progress in Agricultural Engineering Sciences. A Journal of Agricultural, Environmental and Process Engineering*. 2017 Vol. 13/. Issue 1/ 35–49. doi.org/10.1556/446.13.2017.3.

4. G. Golub, S. Kukharets, O. Zavadzka, O. Marus. Determination of the rate of organic biomass decomposition in biogas reactors with periodic loading. – *International Journal of Renewable Energy Research*. 2019. Vol. 9. No. 4. 1741–1750.
5. Yang, Q., Wu, X., Yang, H., Zhang, S., & Chen, H. (2012). Nonrenewable energy cost and greenhouse gas emissions of a pig-biogas-fish system in china. *The Scientific World Journal*. 2012
doi:10.1100/2012/862021.
6. Biofuels (technologies, machines and equipment) / V. O. Dubrovin, M. O. Korchemny, I. P. Maslo, O. Sheptytskyi, A. Rozhkovskyi, Z. Pastorek, A. Gzhibek, P. Yevych, T. Amon, V. V. Kryvoruchko. K.: CTI "Energy and Electrification". 2004. 137 p.
7. Brod, E., Oppen, J., Kristoffersen, A. Ø., Haraldsen, T. K., & Krogstad, T. (2017). Drying or anaerobic digestion of fish sludge: Nitrogen fertilisation effects and logistics. *Ambio*. 46(8). 852–864. doi:10.1007/s13280-017-0927-5.
8. Biokraft station profile [Electronic resource] / Access mode: <https://www.biokraft.no/>. – Review date: 06/13/2023.
9. Gebauer, R., and B. Eikebrokk. 2006. Mesophilic anaerobic treatment of sludge from salmon smolt hatching. *Bioresource Technology*. 97. 2389–2401.
10. Osipovs, S., Puckins A., Pupins M., Kirilova E., Soms Ju., 2022. Biogas production possibility from aquaculture waste / *Environment. Technologies. Resources. Proceedings of 13-th the International Scientific and Practical Conference*, Latvia. Vol. 1. Pp. 195–199. DOI: <https://doi.org/10.17770/etr2021vol1.6638>.
11. Hamilton, H. A., Brod, E., Hanserud, O. S., Gracey, E. O., Vestrum, M. I., Bøen, A., Steinhoff, F. S., Müller, D. B. Brattebø, H. (2016). Investigating cross-sectoral synergies through integrated aquaculture, fisheries, and agriculture phosphorus assessments: A case study of norway. *Journal of Industrial Ecology*. 20 (4). 867–881. doi:10.1111/jiec.12324.
12. Installations of closed water supply for fish farms from "Aqua Plast" [Electronic resource] / RUV for fish farms. – *Electron. data*. 2018. – Access mode: http://www.stroy.kg/promyshlennoe-oborudovanie/fish_industry/502-uzv-dlya-ribnih-hozyaystv.html. – Name from the screen. – Review date: 13.03.2018.
13. Summerfelt S. T., Hankins J. A., Summerfelt S. R., Heinen J. M. Modeling continuous culture with periodic stocking and selective harvesting to measure the effect on productivity and biomass capacity of fish culture systems. *Techniques for Modern Aquaculture (Proc.)*, 21-23 June 1993, Spokane, WA. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph. Pp. 581–593.
14. G. Golub, S. Kukharets, Y. Yarosh, O. Zavadzka. Diversified production and bioenergy conversion for rural development. – *Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development 2017, Lithuania*, DOI: <http://doi.org/10.15544/RD.2017.186>.
15. G. Golub, S. Kukharets, Ya. Yarosh, O. Zavadzka. Structural models of agroecosystems and calculation of their energy autonomy. *Proceedings of the 18 International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2019, Jelgava, Latvia*, May 22-24, 2019, 1344-1350. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N073.
16. Nhu, T. T., Dewulf, J., Serruys, P., Huysveld, S., Nguyen, C. V., Sorgeloos, P., & Schaubroeck, T. (2015). Resource usage of integrated pig-biogas-fish system: Partitioning and substitution within attributional life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*. 102. 27–38. doi:10.1016/j.resconrec.2015.06.011.
17. Wu, X. F., Wu, X. D., Li, J. S., Xia, X. H., Mi, T., Yang, Q., Chen, G. Q., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A. (2014). Ecological accounting for an integrated "pig-biogas-fish" system based on emergetic indicators. *Ecological Indicators*. 47. 189–197. doi:10.1016/j.ecolind.2014.04.033.
18. Rennert, B., Drews, M., 1989. A possibility of combined fish and vegetable production in greenhouses. *Adv. Fish. Sci*. 8. Pp. 19–27.
19. Golub G. A., Zavadzka O. A. The state and prospects for the development of closed water supply installations for aquaculture. – *Perspectives and trends in the development of constructions and technical service of agricultural machines and tools. Materials of reports of the 4th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference*, March 28–29, 2018. Zhytomyr: ZHATK. 2018. Pp. 29–32.
20. Utility model patent 116270. Ukraine. IPC A01K 61/10, A01K 63/00. Installation of a closed water supply for the production of aquaculture products / Golub G. A., Zavadzka O. A., Kuzmenko M. S., Kukharets S. M., Shcherbak S. D., Mayevska A. G. Application No. a 2016 12663; Announced on 12.12.2016; Published on May 10, 2017, Bull. No. 9. 2 p.
21. Zavadzka O. A., Golub G. A. An improved block diagram of a closed water supply installation for the production of aquaculture products. – *Non-traditional and renewable energy sources as alternatives to primary energy sources in the region: Proceedings of the Ninth International Scientific and Practical Conference (Lviv, April 6–7, 2017): Collection. of science articles .Lviv: NU "Lviv Polytechnic"*. Pp. 121–122.
22. Golub G. A., Zavadzka O. A., Kukharets V. V. Development of block diagrams of a closed water supply installation for the production of aquaculture products. *Scientific journal of the Zhytomyr Agroecological University "Scientific Horizons"*. – *ZhNAEU*. 2019. No. 5 (78). Pp. 105–111.
23. G. A. Golub, O. A. Zavadzka. Aquaculture in the agricultural production system. – *A collection of abstracts of reports of the VI International Scientific and Technical Conference "Kramarov readings" on the occasion of the 112th anniversary of the birthday of Doctor of Technical Sciences, professor, corresponding member of VASGNIL Kramarov Volodymyr Savovych February 21–22, 2019*. K.: Publishing center of NUBiP of Ukraine. 2019. P. 336–338.
24. Utility model patent 125464. Ukraine. IPC A01K 61/00. Installation of closed water supply for the production of aquaculture products / Shcherbak S. D., Golub G. A., Zavadzka O. A., Mayevska A. G. – Application No. u 2017 12146; Announced on 11.12.2017; Published on May 10, 2018, Bull. No. 9. 2 p.
25. Utility model patent 125465. Ukraine. IPC A01K 61/00. Installation of closed water supply for the production of

- aquaculture products / Golub G. A., Zavadska O. A., Shcherbak S. D., Chuba V. V., Mayevska A. G. – Application No. u 2017 12147; Announced on 11.12.2017; Published on May 10, 2018, Bull. No. 9. 2 p.
26. Golub G. A., Zavadska O. A. Integration of agricultural production and aquaculture. – Water ecosystems in the context of European integration: Realities and prospects: Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the World Water Resources Day, March 21–22, 2019. Zhytomyr: ZhNAEU. 2019. Pp. 75–78.
 27. Utility model patent 125463. Ukraine. IPC A01K 61/00. Installation of closed water supply for the production of aquaculture products / Golub G. A., Mayevska A. G., Zavadska O. A., Shcherbak S. D. – Application No. u 2017 12145; Announced on 11.12.2017; Published on May 10, 2018, Bull. No. 9. 2 p.
 28. Patent for the invention 114971. Ukraine. IPC C02F 1/52, C02F 103/00, B01D 21/02, B01D 21/24. Wastebasket / G. A. Golub, O. A. Zavadska, M. Yu. Pavlenko, V. V. Chuba, O. Yu. Osypchuk – Application No. a 2015 11160; Announced on November 13, 2015; Published on August 28, 2017, Bull. No. 16. 3 p.
 29. Watten B. J. Modeling the effects of sequential rearing on the potential production of controlled environment fish-culture systems. *Aquac. Eng.* 11, 1992. Pp. 33–46.
 30. Chen, S., Malone, R. F., 1991. Suspended solids in recirculating aquaculture systems. In: *Engineering Aspects of Intensive Aquaculture. Proc. from the Aquaculture Symposium, Cornell University, 4-6 April 1991. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, NY.* Pp. 170–186.
 31. Chen, S., Timmons, M. B., Aneshansley, D. J., Bisogni, J. J., 1993. Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications. *Aquaculture*. 112. Pp. 143–155.
 32. Naegel, L. C. A., 1977. Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture*. 10. Pp. 17–24.
 33. Sutton, R.J., Lewis, W.M., 1982. Further observations on a fish production system that incorporates hydroponically grown plants. *Progr. Fish-Cult.* 44: Pp. 55–59.
 34. Heinen J.M., Hankins J.A., Weber A.L., Watten B.J. A semiclosed recirculating-water system for high-density culture of rainbow trout. *Prog. Fish-Cult.* 1996. 58. Pp. 11–22.
 35. Rakocy, J. E., Hargreaves, J. A., Baily, D. S., 1989. Effect of hydroponic vegetable production on water quality in a closed recirculating system. *J. World Aquacult. Soc.* 20: 64A.
 36. Quillere, I., Marie, D., Roux, L., Gosse, F., Morot-Gaudry, J. F., 1993. An artificial productive ecosystem based on fish/bacteria/plant association. 1. Design and management. *Agric. Ecosyst. Environ.* 47. Pp. 13–30.
 37. Solbe, J.F. de L.G., 1982. Fish farm effluents: A United Kingdom survey. In: J.S. Albaster (Editor), *Report of the EIFAC Workshop on Fish-farm Effluents. EIFAC Tech. Pap.* 41, FAO, Rome. Pp. 29–56.
 38. Beveridge, M. C. M., Phillips, M. J., Clarke, R. M., 1991. A quantitative and qualitative assessment of wastes from aquatic animal production. In: D.E. Brune and J.R. Tomasso (Editors). *Aquaculture and Water Quality. World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA.* 506–533.
 39. McLaughlin, T. W., 1981. Hatchery effluent treatment, US Fish and Wildlife Service. In: L.J. Allen and E.C. Kinney (Editors). *Proc. of the Bio-Engineering Symposium for Fish Culture. Publ. no. 1, American Fisheries Society, Bethesda, MD.* Pp. 167–173.
 40. Mudrak, V. A., 1981. Guidelines for economical commercial fish hatchery wastewater treatment systems. In: L.J. Allen and E.C. Kinney (Editors), *Proceedings of the Bio-Engineering Symposium for Fish Culture. Publ. No. 1. American Fisheries Society, Bethesda, MD.* Pp. 174–182.
 41. Chen, S., Coffin, D. E., Malone, R. F., 1993. Production, characteristics, and modeling of aquacultural sludge from a recirculating aquacultural system using a granular media biofilter. In: Jaw-Kai Wang (Editor), *Techniques for Modern Aquaculture. ASAE, St. Joseph, MI.* Pp. 16–25.
 42. Rui Carlos Barata Ferreira (2012). *Anaerobic digestion of sludge from marine recirculation aquaculture systems / Integrated Master in Environmental Engineering – 2011/2012. Faculty of Engineering of University of Porto, Porto, Portugal.* 90 p.
 43. Zhang, X. 2014. *Biomethane and Phosphorus Recovery from Brackish Aquaculture Recirculation System. PhD theses printed by Delft Academic Press, Delft University of Technology.* 163 p.
 44. Yogeve, U., Barnes, A., Gross, A. (2016). Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. *Water (Switzerland)*, 8, 589. doi:10.3390/w8120589.
 45. Tinsley, R.L. *Developing Smallholder Agriculture: A Global Perspective; AgBe Publications: Brussels, Belgium, 2004; P. 585.*].
 46. Leng, R. A. Duckweed – a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish [Electronic resource] / R. A. Leng, J. H. Stambolie, R. Bell // *Livestock Research for Rural Development.* – 1995. – Vol. 7, Issue 1. – Available at: <http://www.lrrd.org/lrrd7/1/3.htm>.
 47. Ge, X. Growing Lemna minor in agricultural wastewater and converting the duckweed biomass to ethanol [Text] / X. Ge, N. Zhang, G. C. Phillips, J. Xu // *Bioresource Technology.* 2012. Vol. 124. P. 485–488. doi: 10.1016/j.biortech.2012.08.050.
 48. Konontcev S., Sabliy L., Kozar M., Korenchuk N. Treatment of recirculating water of industrial fish farms in phytoreactor with lemnoideae. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. 5/10 (89). Pp. 61–66. doi: 10.15587/1729-4061.2017.111910.