

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Яременко Оксана Анатоліївна

УДК 620.952: 620.953

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБҐРУНТУВАННЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ  
ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ІЗ ОСАДУ СТІЧНИХ ВОД  
СИСТЕМ ШТУЧНОГО ВИРОЩУВАННЯ РИБИ**

03.00.20 – біотехнологія (технічні науки)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук

Дисертація містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання  
на відповідне джерело

О.А. Яременко

Науковий керівник  
Голуб Геннадій Анатолійович  
доктор технічних наук, професор,

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

**Яременко О. А. Обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.** – Кваліфікаційна друкована праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 03.00.20 «Біотехнологія (технічні науки)». Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2024.

У сучасних умовах кліматичних змін людство має приділяти максимум уваги ефективному використанню енергії та природних ресурсів. Аквакультура одна із галузей харчової індустрії, яка має значні темпи розвитку. Для забезпечення потреб людства у рибній продукції до 2030 року її річне виробництво повинно зрости до 120 млн. т. В установках аквакультури виробляється більше половини рибної продукції.

Все більшого поширення набуває виробництво продукції аквакультури в рециркуляційних системах аквакультури (РСА). Обсяги вирощування за допомогою таких систем прісноводних риб (найчастіше вугра і сома) та форелі невпинно зростають. Використання РСА – найбільш перспективна світова тенденція. Такі системи забезпечують низький рівень впливу на навколишнє середовище, а також зменшують потреби у воді та енергії. Вихід риби в таких системах є постійним і передбачуваним. Мають вони також суттєвий недолік – високі капітальні та експлуатаційні витрати.

Культивування риби в РСА повинні забезпечити часткову енергетичну автономність за рахунок тепла і електроенергії, отриманих при когенерації біогазу, який утворюється при метановому зброджуванні органічних складових осаду (залишки кормів, продукти метаболізму, відходи переробки риби та ін.), що відстоюється при функціонуванні системи.

Таким чином, використання РСА потребує подальшого поширення з метою забезпечення населення рибною продукцією, а самі РСА – подальшого удосконалення для підвищення їх енергетичної ефективності.

Останнім часом виконаний значний обсяг досліджень щодо розробки технічних засобів для реалізації процесу біогазового зброджування органічної біомаси. Виконаний значний обсяг досліджень щодо розробки біотехнологічних процесів та технічних засобів для реалізації процесу біогазового зброджування біомаси. Отримано кінетичні рівняння анаеробної ферментації органічної біомаси для умов порційного зброджування. Досліджено процес анаеробного зброджування осаду, що утворюється в морських рециркуляційних системах аквакультури та в установках аквапоніки. Однак, процес виробництва біогазу із осаду стічних вод РСА при штучному вирощуванні риби потребує подальшого удосконалення в напрямку обґрунтування параметрів біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод РСА та підвищення їх енергетичної автономності.

Дослідження сточується підвищення ефективності використання біогазових установок шляхом обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

В роботі проаналізовано РСА, які знайшли найбільше поширення у виробництві продукції аквакультури, оскільки дають можливість забезпечити підготовку води у відповідності до встановлених вимог. Однак їх суттєвим недоліком, як і великої кількості конструктивних реалізацій даних установок є те, що при їх використанні відсутня можливість утилізації промивної води та осадів, що утворюється під час роботи РСА на стадії механічної фільтрації води. Біологічній деградації осадів 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 із розробкою відповідного наукового обґрунтування біотехнологічних процесів та технічних засобів для їх реалізації.

Оцінка питомого виходу осаду в установці для вирощування риби проводилася на базі підприємств по вирощуванню риби у Васильківському районі Київської області. Вміст сухої речовини визначався шляхом фільтрування стічних вод і осадів із наступним висушування залишків на фільтрах у муфельній печі. Вміст органічної маси в осаді визначалася шляхом висушування проб у муфельній печі. На першому етапі досліджень стічна змивна вода механічного фільтра відбиралася у

мірні циліндри для відстоювання. Відбір стічної змивної води проводився перед її надходженням у відстійник. На другому етапі досліджень стічна змивна вода механічного фільтра відстоювалася у відстійнику. Відбір осаду та стічної води проводився після відстоювання у відстійнику упродовж доби. Для порівняння вмісту сухої речовини у стічній воді після відстоювання у відстійнику та рециркуляційної води після механічного фільтра відбиралися і аналізувалися проби рециркуляційної води після механічного фільтра.

Оцінка агрохімічних показників осаду та стічної води після відстоювання у відстійнику проводилося за стандартними методиками у спеціалізованій лабораторії Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Експериментальне дослідження процесу анаеробного зброджування осаду стічної змивної води проводилися в урахуванням положень, викладених в німецькому стандарті VDI 4630:2016. Відібрані проби осаду стічної змивної води, а також інокулят, було проаналізовано на предмет вмісту сухих речовин та зольності. Інокулят, що містив активну популяцію метаногенних бактерій та архей, отримано в лабораторних умовах в процесі метанового бродіння органічних матеріалів змінного складу. На основі даних про вміст сухої органічної речовини в осадах та в інокуляті було підготовлено тестові суміші. Після внесення дослідних сумішей в реактори, в залишковий газовий простір реакторів було подано газоподібний азот з метою витіснення кисню повітря, після чого кожен реактор було герметично з'єднано з евдіометром за допомогою гнучкої силіконової трубки. Утворення біогазу в реакторі приводило до збільшення його парціального тиску в газовому просторі евдіометра, в результаті чого рухома частина евдіометра піднімалась на певну висоту. Рухома частина евдіометра є градуйованою в мл. Зчитування об'єму виділеного біогазу проводилось візуально. Абсолютна похибка візуального зчитування об'єму накопиченого в евдіометрі біогазу складала  $\pm 10$  мл. Відносна похибка візуальної фіксації об'єму виділеного біогазу не перевищувала 2% кумулятивного виходу біогазу, виділеного за увесь період експерименту. Дослідження показників анаеробного зброджування проводилися на базі лабораторії виробництва біогазу Інституту

технічної теплофізики НАН із використанням осаду стічної змивної води механічного фільтра РСА для вирощування нільського кларійового сома (*Clarias gariepinus*).

Для умов роботи біогазових реакторів із періодичним завантаженням та на основі використання експоненціальних залежностей рівня розкладу органічної речовини та питомого виходу метану від часу анаеробного зброджування, отримано залежність для визначення інтегрального середнього рівня розкладу органічної біомаси, її інтегральної середньої швидкості розкладу та інтегрального середнього питомого виходу метану в залежності від часу зброджування та періодичності завантаження біогазового реактора, на основі яких розроблено алгоритм розрахунку питомого виходу метану.

Експериментально встановлено залежності, які пов'язують: ефективність відстоювання твердої речовини промивної води механічних фільтрів рециркуляційних системах аквакультури та її подальшого гравітаційного ущільнення. Встановлено, що вміст твердих речовин у відстояній стічній воді після відстійника становив  $0,07 \pm 0,015$  г/л, у той же час їх вміст у рециркуляційній воді після механічного фільтра мав значення на рівні  $0,057 \pm 0,023$  г/л, що дозволяє використовувати відстійник на заміну механічного фільтра в рециркуляційній системі аквакультури та видаляти із неї лише осад із відстійника, кількість якого становитиме не більше 7% від кількості стічної змивної води механічних фільтрів. Встановлено також, що відстоювання осаду безпосередньо у відстійнику упродовж 15 діб дозволило отримати диференційний та інтегральний розподіл результатів визначення вологості осаду, які показали, що вологість осаду на рівні 92% може бути отримана після відстоювання осаду упродовж 15 діб із ймовірністю 69,23%, а вологість осаду на рівні 93% можна отримати після відстоювання осаду упродовж 15 діб із ймовірністю 92,31%.

Експериментально встановлено залежності, які пов'язують: рівень розкладу органічної речовини осаду, отриманого після гравітаційного ущільнення та питомого виходу метану із даного осаду від часу анаеробного зброджування; вихід біогазу й метану та концентрацію метану в біогазі під час анаеробної ферментації

осаду, отриманого після гравітаційного ущільнення. Встановлено, що експоненціальна залежність адекватно описує експериментальні дані зміни рівня розкладу органічної речовини ущільненого осаду стічних вод аквакультури в залежності від часу анаеробного зброджування. Максимальний рівень розкладу органічної речовини досягнутий за 38 діб анаеробного зброджування становив 0,74 відн. од. При цьому параметр, який характеризує швидкість процесу розкладу органічної речовини становив 0,108 відн. од. за добу. У той же час інтегральний середній рівень розкладу органічної речовини упродовж 21 доби анаеробного зброджування може досягати лише 0,43 відн. од., а інтегральна середня швидкість розкладу встановлюється на рівні 0,033 відн. од. за добу. Встановлено також, що вихід біогазу та метану під час анаеробної ферментації на 21 добу анаеробного зброджування становлять 4,083 та 2,627 л відповідно. При цьому концентрація метану в біогазі на 7 добу зброджування досягала 74–75% і трималася на цьому рівні до 21 доби, у подальшому, до 38 доби концентрація метану в біогазі рівномірно знижувалася до 64–65%. Було також встановлено, що експоненціальна залежність адекватно описує експериментальні дані зміни питомого виходу метану на одиницю розкладеної органічної речовини в залежності від часу анаеробного зброджування. Максимальний рівень питомого виходу метану під час анаеробного зброджування досягнутий на 38 добу становив 803,936 мл (н.у.)/г розкладеної органічної речовини. При цьому параметр, який характеризує швидкість зміни величини питомого виходу метану під час анаеробного зброджування осаду стічних вод аквакультури становив 0.207 мл (н.у.)/г розкладеної органічної речовини за добу. У той же час інтегральний питомий вихід метану упродовж 21 доби анаеробного зброджування може досягати лише 580–590 мл (н.у.)/г розкладеної органічної речовини.

Встановлено, що при часі зброджування 21 доба, питомий вихід метану під час анаеробної ферментації має максимальне значення в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора. Це значення становить 1,05 м<sup>3</sup> метану на один кубічний метр біомаси в реакторі за одну добу при періодичності завантаження біогазового реактора один раз за час від 1 до 3 діб. Із урахуванням щільності біомаси на рівні 1,05 т/м<sup>3</sup>, питомий вихід метану становитиме 1 м<sup>3</sup> метану на одну

тону біомаси в реакторі за одну добу. А із урахуванням концентрації метану в біогазі на рівні 59%, значення виходу біогазу із реактора за нормальних умов становитиме 1,69 м<sup>3</sup> на одну тону біомаси в реакторі за одну добу, що не більше, ніж на 6,5% перевищує середні значення, що приводяться в літературних джерелах, де досліджувався вихід біогазу.

Розроблено і отримано патенти на винахід 113249 «Метантенк» та 114971 «Відстійник», а також патенти на корисні моделі: 116270, 125463, 125464 та 125465 під загальною назвою «Установка замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури».

Розрахунок економічних показників виробництва метану із осаду, отриманого після гравітаційного ущільнення стічних вод систем штучного вирощування риби показав, що при оптимальному значенні питомого виходу метану, розрахунковий прибуток від виробництва метану становив 5,63 грн/м<sup>3</sup>, а прибуток від виробництва електроенергії на основі метану 3,73 грн/кВт год. Впровадження обладнання для підготовки змивної води механічних фільтрів до анаеробного зброджування з метою отримання біогазу із продуктивністю за кількістю змивної води механічних фільтрів 1577 м<sup>3</sup>/рік в ТОВ «Аква Систем Органік» дозволило отримати фактичний економічний ефект 10 тис. грн/м<sup>3</sup> ущільненого осаду та додатковий розрахунковий економічний ефект від виробництва електроенергії на основі метану – 250 грн/м<sup>3</sup> збродженого осаду.

**Ключові слова:** рециркуляційна система аквакультури, механічний фільтр, осад, ущільнювач, відстій, біогаз, метан, питомий вихід метану.

## ANNOTATION

Yaremenko O. A. Justification of the biotechnological process of biogas production from sewage sludge of artificial fish farming systems. – Qualifying printed work with manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences in the specialty 03.00.20 "Biotechnology (technical sciences)". National University of

Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

In today's conditions of climate change, humanity should pay maximum attention to the efficient use of energy and natural resources. Aquaculture is one of the branches of the food industry, which has significant rates of development. To ensure humanity's needs in fish products, its annual production should increase to 120 million tons by 2030. More than half of fish products are produced in aquaculture facilities.

The production of aquaculture products in recirculating aquaculture systems (RAS) is becoming more and more widespread. The volumes of freshwater fish (most often eel and catfish) and trout grown with the help of such systems are constantly growing. The use of RAS is the most promising global trend. Such systems ensure a low level of impact on the surrounding environment, and also reduce water and energy needs. The output of fish in such systems is constant and predictable. They also have a significant drawback - high capital and operating costs.

Cultivation of fish in the RAS should ensure partial energy autonomy due to heat and electricity obtained during the cogeneration of bio-gas, which is formed during methane fermentation of organic components of the sediment (feed residues, metabolic products, fish processing waste, etc.), which is defended during the functioning of the system.

Thus, the use of RAS needs to be further spread with the aim of providing the population with fish products, and the RAS needs to be further improved to increase their energy efficiency.

Recently, a significant amount of research has been carried out on the development of technical means for the implementation of the process of biogas fermentation of organic biomass. A significant amount of research has been carried out on the development of biotechnological processes and technical means for the implementation of the process of biogas fermentation of biomass. Kinetic equations of anaerobic fermentation of organic biomass for batch fermentation conditions were obtained. The process of anaerobic fermentation of sediment formed in marine recirculation systems of aquaculture and in aquaponics installations was studied. However, the process of biogas production from the sewage sludge of the RAS during artificial fish cultivation needs further improvement in the direction of substantiating the parameters of the biotechnological process of biogas

production from the sewage sludge of the RAS and increasing their energy autonomy.

The research focuses on improving the efficiency of using biogas plants by substantiating the biotechnological process of biogas production from sewage sludge of artificial fish farming systems.

In the research analyzes the RAS, which have found the most widespread use in the production of aquaculture products, as they provide an opportunity to ensure the preparation of water in accordance with the established requirements. However, their significant drawback, as well as a large number of constructive implementations of these installations, is that when they are used, there is no possibility of recycling the washing water and sediments formed during the operation of the RAS at the stage of mechanical water filtration. Today, insufficient attention is paid to the biological degradation of aquaculture sediments, and therefore such classic methods as aerobic and anaerobic degradation of sediment organic substances should be considered in combination with the development of appropriate scientific justification of biotechnological processes and technical means for their implementation.

The assessment of the specific yield of sediment in the installation for growing fish was carried out on the basis of enterprises for growing fish in the Vasylkiv district of the Kyiv region. The content of dry matter was determined by filtering wastewater and sediments, followed by drying the residues on the filters in a muffle furnace. The content of organic mass in the sediment was determined by drying the samples in a muffle furnace. At the first stage of research, the wastewater from the mechanical filter was collected in measuring cylinders for settling. Wastewater was collected before entering the sump. At the second stage of the research, the wastewater from the mechanical filter was settled in a sedimentation tank. Sediment and waste water were collected after settling in a clarifier for 24 hours. To compare the content of dry matter in wastewater after settling in a settling tank and recirculation water after a mechanical filter, samples of recirculation water after a mechanical filter were taken and analyzed.

Evaluation of agrochemical indicators of sediment and wastewater after settling in a clarifier was carried out according to standard methods in the specialized laboratory of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

Experimental study of the process of anaerobic fermentation of the sludge of sewage flushing water took into account the provisions set forth in the German standard VDI 4630:2016. The selected samples of the sediment of wastewater washing water, as well as the inoculum, were analyzed for the content of dry substances and ash content. The inoculum, which contained an active population of methanogenic bacteria and archaea, was obtained under laboratory conditions in the process of methane fermentation of organic materials of variable composition. Test mixtures were prepared based on the data on the content of dry organic matter in the sediments and in the inoculum. After introducing the experimental mixtures into the reactors, gaseous nitrogen was supplied to the residual gas space of the reactors in order to displace oxygen from the air, after which each reactor was hermetically connected to the eudiometer using a flexible silicone tube. The formation of biogas in the reactor led to an increase in its partial pressure in the gas space of the eudiometer, as a result of which the moving part of the eudiometer rose to a certain height. The moving part of the eudiometer is graduated in ml. The volume of the extracted biogas was read visually. The absolute error of the visual reading of the volume of biogas accumulated in the eudiometer was  $\pm 10$  ml. The relative error of visual fixation of the volume of biogas released did not exceed 2% of the cumulative yield of biogas released over the entire period of the experiment. Anaerobic fermentation indicators were studied on the basis of the biogas production laboratory of the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences using sediment from the sewage washing water of the mechanical filter of the RAS for the cultivation of Nile clary catfish (*Clarias gariepinus*).

For the operating conditions of biogas reactors with periodic loading and based on the use of exponential dependences of the level of decomposition of organic matter and the specific yield of biomethane on the time of anaerobic fermentation, a dependence was obtained for determining the integral average level of decomposition of organic biomass, its integral average rate of decomposition and of the integrated average specific yield of biomethane depending on the fermentation time and frequency of loading of the biogas reactor, based on which the algorithm for calculating the specific yield of biomethane was developed.

Dependencies were established experimentally, which connect: the efficiency of settling solid matter of washing water of mechanical filters in recirculation systems of aquaculture and its subsequent gravitational compaction. It was established that the content of solids in the settled wastewater after the settling tank was  $0.07 \pm 0.015$  g/l, while their content in the recirculation water after the mechanical filter was  $0.057 \pm 0.023$  g/l, which allows - to prepare a sedimentation tank to replace the mechanical filter in the recirculation system of aquaculture and to remove from it only sediment from the sedimentation tank, the amount of which will be no more than 7% of the amount of wastewater washing water of mechanical filters. It was also established that settling the sediment directly in the clarifier for 15 days made it possible to obtain a differential and integral distribution of the results of determining the moisture content of the sediment, which showed that the humidity of the sediment at the level of 92% can be obtained after settling the sediment for 15 days with a probability of 69.23%, and the humidity of the sediment at the level of 93% can be obtained after settling the sediment for 15 days with a probability of 92.31%.

Experimentally established dependencies that connect: the level of decomposition of organic matter of the sediment obtained after gravity compaction and the specific output of biogas from this sediment from the time of anaerobic fermentation; yield of biogas and biomethane and concentration of biomethane in biogas during anaerobic fermentation of sludge obtained after gravity compaction. It was established that the exponential dependence adequately describes the experimental data on the change in the level of decomposition of organic matter in the compacted sludge of aquaculture wastewater depending on the time of anaerobic fermentation. The maximum level of decomposition of organic matter achieved in 38 days of anaerobic fermentation was 0.74 rel. unit. At the same time, the parameter that characterizes the speed of the decomposition process of organic matter was 0.108 relative to unit per day. At the same time, the integrated average level of decomposition of organic matter during 21 days of anaerobic fermentation can reach only 0.43 relative units, and the integral average decomposition rate is set at the level of 0.033 relative unit per day. It was also established that the output of biogas and biomethane during anaerobic fermentation for 21 days of anaerobic fermentation is 4.083

and 2.627 l, respectively. At the same time, the concentration of biomethane in biogas on the 7th day of fermentation reached 74–75% and remained at this level until the 21st day, subsequently, until the 38th day, the concentration of biomethane in the biogas decreased uniformly to 64–65%. It was also established that the exponential dependence adequately describes the experimental data on the change in the specific yield of biomethane per unit of decomposed organic matter depending on the time of anaerobic fermentation. The maximum level of specific yield of biomethane during anaerobic fermentation was reached on the 38th day of 803.936 ml (n.c.)/g of complex organic matter. At the same time, the parameter that characterizes the rate of change in the specific yield of biomethane during the anaerobic fermentation of aquaculture wastewater sludge was 0.207 ml (n.c.)/g of decomposed organic matter per day. At the same time, the integrated specific yield of bio-methane during 21 days of anaerobic fermentation can reach only 580–590 ml (n.u.)/g of decomposed organic matter.

It was established that with a fermentation time of 21 days, the specific yield of biomethane during anaerobic fermentation has an optimal value depending on the frequency of loading the biogas reactor. This value is 1.05 m<sup>3</sup> of biomethane per one cubic meter of biomass in the reactor for one day, with the periodicity of loading the biogas reactor once every 1 to 3 days. Taking into account the density of biomass at the level of 1.05 t/m<sup>3</sup>, the specific yield of biomethane will be 1 m<sup>3</sup> of biomethane per one ton of biomass in the reactor for one day. And taking into account the concentration of biomethane in biogas at the level of 59%, the value of biogas output from the reactor under normal conditions will be 1.69 m<sup>3</sup> per one ton of biomass in the reactor for one day, which is no more than 6.5% higher average values given in literary sources, where biogas output was studied.

Patents for the invention 113249 "Methane tank" and 114971 "Storage tank" were developed and obtained, as well as patents for useful models: 116270, 125463, 125464 and 125465 under the general title "Installation of a closed water supply for the production of aquaculture products".

The calculation of the economic indicators of biomethane production from sedi-

ment obtained after gravity compaction of wastewater from artificial fish breeding systems showed that at the optimal value of the specific yield of biomethane, the estimated profit from biomethane production was 5.63 UAH /m<sup>3</sup>, and the profit from electricity production on the basis of biomethane 3.73 UAH /kWh. The introduction of equipment for the preparation of washing water of mechanical filters for anaerobic fermentation in order to obtain biogas with a productivity of 1,577 m<sup>3</sup>/year in terms of the amount of washing water of mechanical filters in Aqua System Organic LLC made it possible to obtain an actual economic effect of 10,000 UAH/m<sup>3</sup> of compacted sediment and additional estimated economic effect from the production of electricity based on biomethane – 250 UAH/ m<sup>3</sup> fermented sludge.

**Key words:** recirculation aquaculture system, mechanical filter, sediment, thickener, sludge, biogas, biomethane, specific output of biomethane.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Монографії, брошури, навчальні посібники**

1. Голуб Г. А., Сидорчук О. В., Кухарець С. М., Гох В. В., Осауленко С. В., **Завадська О. А.**, Рубан Б. О., Поліковська Н. Л., Швець Р. Л., Чуба В. В., Павленко М. Ю. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обортовими реакторами / за ред. Г. А. Голуба. Київ : НУБіП України, 2014. 106 с. (*Здобувачем обґрунтовано параметри процесу анаеробного зброджування біомаси у біогазових реакторах*).

2. Голуб Г. А., Цивенкова Н. М., Марус О. А., Павленко М. Ю., **Яременко О. А.** Машини та обладнання для біоенергетики : навчальний посібник / за ред. Г. А. Голуба. Київ : НУБіП України, 2022. 203 с. (*Здобувачем підготовано розділи по обґрунтовано параметри процесу анаеробного зброджування біомаси у біогазових реакторах*).

**Статті у наукових виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі даних Scopus**

3. Golub G., Kukharets S., **Zavadska O.**, Marus O. 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, p. 1741–1750. Режим доступу: <http://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/10163>. (Здобувачем визначено інтегральні рівень та швидкість процесу розкладу СОР під час процесу анаеробного зброджування біомаси у біогазових реакторах, розроблено алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу).

4. Golub G., **Zavadska O.**, Kukharets V. Development of block-scheme of installation of closed water supply for production of aquaculture products | Розробка блок-схеми установки замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури. – Scientific Horizons, 2019, no. 5, p. 105–111. Режим доступу: <https://sciencehorizon.com.ua/uk/journals/5-78-2019/rozrobka-blok-skhyem-ustanovki-zamknutogo-vodopostachannya-dlya-virobnitstva-produktsiyi-akvakulturi>. (Здобувачем розроблено блок-схему РАС та проведено її аналіз).

5. Четверик Г. О., **Яременко О. А.**, Голуб Г. А. Передумови забезпечення енергетичної автономності підприємств аквакультури. – Відновлювана енергетика, 2023, no. 2(73), p. 66–75. (Здобувачем розроблено блок-схеми РАС та проведено їх аналіз). DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2\(73\).66-75](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73).66-75). Режим доступу: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/400>.

6. Golub G., **Yaremenko O.**, Kucheruk P., Marus O., Tsyvenkova N., Nadykto V., Chuba V., Yarosh Y. Defining indicators for the anaerobic fermentation process of aquaculture wastewater sediments. – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2024, vol. 6/8(132), Energy-saving technologies and equipment, p. 66–78. (Здобувачем проведено експериментальні дослідження та виконано їх аналіз). DOI: [10.15587/1729-4061.2024.317019](https://journals.uran.ua/eejet/article/view/317019). Режим доступу: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/317019/310258>.

7. Golub G., **Yaremenko O.**, Marus O., Tsyvenkova N., Chetveryk H. Sedimentation properties of aquaculture wastewater sludge during the cultivation of *Clarias gariepinus*. – Відновлювана енергетика, 2025, no. 1(80), p. 148–158. (Здобувачем проведено експериментальні дослідження та виконано їх аналіз). DOI:

### **Статті у наукових фахових виданнях України**

8. Голуб Г. А., **Завадська О. А.**, Щербак С. Д. Дослідження виходу та властивостей осаду в установках для виробництва продукції аквакультури // Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. – Київ, Україна : Ред.-кол. С.М. Ніколаєнко (відп. ред.) та ін., 2019. – Вип. 10. № 2. – С. 83-88. – 162 с. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження та виконано їх аналіз).*

9. Голуб Г., Кепко О., **Яременко О.**, Марус О., Кепко В. Ефективність виробництва біогазу в аграрному виробництві // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2023. – № 1(61). – С. 26-33. – DOI: 10.32782/2072-2052.2023.1.60.2. *(Здобувачем виконано розрахунки економічної ефективності виробництва біогазу).*

### **Патенти на винаходи**

10. Голуб Г. А., Швець Р. Л., **Завадська О. А.**, Чуба В. В., Дворник А. В., Гох В. В. Метантенк // Патент на винахід № 113249. – Україна : МПК C02F 11/04, A01C 3/02, C02F 3/28, C02F 103/20, 2016. – Заявка № а 2016 11159; заявлено 13.11.2015; опубліковано 26.12.2016, Бюл. № 24. – 3 с. *(Здобувачем проведено патентний пошук і розроблено конструкцію метантенка).*

11. Голуб Г. А., **Завадська О. А.**, Павленко М. Ю., Чуба В. В., Осипчук О. Ю. Відстійник // Патент на винахід № 114971. – Україна : МПК C02F 1/52, C02F 103/00, B01D 21/02, B01D 21/24, 2017. – Заявка № а 2015 11160; заявлено 13.11.2015; опубліковано 28.08.2017, Бюл. № 16. – 3 с. *(Здобувачем проведено патентний пошук і розроблено конструкцію відстійника).*

### **Патенти на корисну модель**

12. Голуб Г. А., **Завадська О. А.**, Кузьменко М. С., Кухарець С. М., Щербак С. Д., Маєвська А. Г. Установа замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури // Патент на корисну модель № 116270. – Україна : МПК A01K 61/10, A01K 63/00, 2017. – Заявка № а 2016 12663; заявлено 12.12.2016; опубліковано 10.05.2017, Бюл. № 9. – 2 с. *(Здобувачем проведено патентний пошук і розроблено конструкцію установки).*

13. Голуб Г. А., Маєвська А. Г., **Завадська О. А.**, Щербак С. Д. Установа замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури // Патент на корисну модель № 125463. – Україна : МПК А01К 61/00, 2018. – Заявка № u 2017 12145; заявлено 11.12.2017; опубліковано 10.05.2018, Бюл. № 9. – 2 с. (*Здобувачем проведено патентний пошук і розроблено конструкцію установки*).

14. Щербак С. Д., Голуб Г. А., **Завадська О. А.**, Маєвська А. Г. Установа замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури // Патент на корисну модель № 125464. – Україна : МПК А01К 61/00, 2018. – Заявка № u 2017 12146; заявлено 11.12.2017; опубліковано 10.05.2018, Бюл. № 9. – 2 с. (*Здобувачем проведено патентний пошук і розроблено конструкцію установки*).

15. Голуб Г. А., **Завадська О. А.**, Щербак С. Д., Чуба В. В., Маєвська А. Г. Установа замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури // Патент на корисну модель № 125465. – Україна : МПК А01К 61/00, 2018. – Заявка № u 2017 12147; заявлено 11.12.2017; опубліковано 10.05.2018, Бюл. № 9. – 2 с. (*Здобувачем проведено патентний пошук і розроблено конструкцію установки*).

### **Тези наукових доповідей**

16. **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.): зб. наук. статей.* – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2017. – 325 с. – С. 121–122. (*Здобувачем розроблено блок-схему установки та проведено її аналіз*).

17. Голуб Г. А., **Завадська О. А.** Стан та перспективи розвитку установок замкнутого водопостачання для аквакультури. – *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь: матеріали доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, 28–29 березня 2018 р.* – Житомир : ЖАТК, 2018. – 327 с. – С. 29–32. (*Здобувачем проаналізовано*

стан та перспективи розвитку установок замкнутого водопостачання для аквакультури).

18. **Завадська О. А.**, Голуб Г. А. Тенденції розвитку виробництва продукції аквакультури в установках замкнутого водопостачання. – *Кліматичні зміни та сільське господарство: збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції за участю ФАО, 13–14 березня 2018 р.* – Київ : Агроосвіта, 2018. – 791 с. – С. 301–303. (Здобувачем проаналізовано тенденції розвитку виробництва продукції аквакультури).

19. Голуб Г. А., **Завадська О. А.** Екологічна актуальність виробництва продукції аквакультури в установках замкнутого водопостачання. – *Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, 15–16 листопада 2018 р.* – Житомир : ЖНАЕУ, 2018. – 106 с. – С. 30–35. (Здобувачем проаналізовано екологічну актуальність виробництва продукції аквакультури).

20. Голуб Г. А., **Завадська О. А.** Інтеграція аграрного виробництва та аквакультури. – *Водні екосистеми у контексті євроінтеграції: реалії та перспективи: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 21–22 березня 2019 р.* – Житомир : ЖНАЕУ, 2019. – 148 с. – С. 75–78. (Здобувачем проаналізовано можливість інтеграції аграрного виробництва та аквакультури).

21. Голуб Г. А., **Завадська О. А.** Аквакультура в системі аграрного виробництва. – *Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання», 21–22 лютого 2019 р.* – Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2019. – 384 с. – С. 336–338. (Здобувачем проаналізовано можливість аквакультури в агровиробництві).

22. □ Голуб Г. А., **Завадська О. А.** Апроксимація експоненціальними залежностями рівня розкладу органічної біомаси під час анаеробного зброджування. – *Збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції "Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку", присвячена 90-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України, 7–8 листопада*

2019 р. – Київ : НУБіП України, 2019. – 205 с. – С. 65–68. (Здобувачем проаналізовано можливості апроксимації рівня розкладу органічної біомаси).

23. Голуб Г.А., **Завадська О. А.** Системи аквакультури на основі замкнутого водопостачання. – *Тези наукових доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій», 13 вересня 2019 р.* – Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2019. – 138 с. – С. 128–130. (Здобувачем проаналізовано системи аквакультури на основі замкнутого водопостачання).

24. Golub G., Kukharets S., Yarosh Y., **Zavadska O.** 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>. (Здобувачем проаналізовано використання аквакультури в системі біоенергоконверсії).

25. Golub G., Kukharets S., Yarosh Ya., **Zavadska O.** Structural models of agroecosystems and calculation of their energy autonomy. – *Proceedings of the 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2019*, Jelgava, Latvia, May 22–24, 2019, 1344–1350. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N073. (Здобувачем проаналізовано використання аквакультури в системі біоенергоконверсії).

26. Golub G., Lutak V., Керко О., Marus O., **Yaremenko O.** Determining impact of difference in price of liquid manure and digestate on production costs of biomethane and electricity. – *Proceedings of the 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2021*, Jelgava, Latvia, May 26–28, 2021, 314–319. DOI: 10.22616/ERDev2021.20.TF067. (Здобувачем виконано розрахунки економічної ефективності виробництва біогазу).

27. Голуб Г. А., **Яременко О. А.** Методика розрахунку виходу біогазу. – *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20–21 травня 2021 р.)* – Київ : Інтерсервіс, 2021. – 1104 с. – С. 847–850. (Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу).

28. **Яременко О. А.**, Голуб Г. А. Алгоритм розрахунку виходу біогазу. – *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 18–19 травня 2023 р.)* – Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2023. – 520 с. – С. 395–396. (Здобувачем розроблено методика розрахунку виходу біогазу).

29. **Яременко О. А.**, Голуб Г. А. Методика визначення періодичності завантаження біогазового реактора. – *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXVI міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 21–23 травня 2025 р.)* – Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2025. – 568 с. – С. 484–485. (Здобувачем розроблено методика періодичності завантаження біогазового реактора).

30. Голуб Г. А., **Яременко О. А.** Інженерна методика розрахунку параметрів процесу біогазового зброджування осаду рециркуляційних систем аквакультури. – *Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві: XIV Міжнародна науково-технічна конференція, смт Глеваха Київської області, 1–17 жовтня 2025 р.: матеріали конференції* – Глеваха–Київ, 2025. – 204 с. – С. 35–37. (Здобувачем розроблено методика періодичності завантаження біогазового реактора).

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	<b>22</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗРОБОК ТА ДОСЛІДЖЕНЬ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ АКВАКУЛЬТУРИ</b>	<b>28</b>
<b>1.1 Загальна компоновка та конструкція основних елементів установок замкнутого водопостачання</b>	<b>28</b>
<b>1.2 Огляд досліджень по переробці осаду установок замкнутого водопостачання аквакультури</b>	<b>45</b>
<b>1.3 Огляд досліджень по розробці біогазових установок для переробки гною, посліду та осадів стічних вод</b>	<b>52</b>
<b>1.4 Огляд теоретичних та експериментальних досліджень біогазових установок для переробки гною, посліду та осадів стічних вод</b>	<b>59</b>
<b>1.5 Мета і задачі досліджень</b>	<b>68</b>
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БІОГАЗОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ОСАДУ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ АКВАКУЛЬТУРИ</b>	<b>70</b>
<b>2.1 Аналіз основних факторів, що впливають на анаеробну ферментацію</b>	<b>70</b>
<b>2.2 Дослідження інтегрального значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації та роботі біогазового реактора в режимі періодичного завантаження</b>	<b>73</b>
<b>2.3 Алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу та метану під час анаеробної ферментації та роботі біогазового реактора в режимі періодичного завантаження</b>	<b>80</b>
<b>2.4 Висновки до розділу 2</b>	<b>85</b>
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕЛОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ІЗ ОСАДУ СТІЧНИХ ВОД СИСТЕМ ШТУЧНОГО ВИРОЩУВАННЯ РИБИ</b>	<b>87</b>
<b>3.1 Програма досліджень</b>	<b>87</b>

	21	
<b>3.2</b>	<b>Методика досліджень питомого виходу осаду в рециркуляційних системах аквакультури</b>	<b>87</b>
<b>3.3</b>	<b>Методика досліджень кількості та рівня ущільнення осаду змивної води рециркуляційних систем аквакультури</b>	<b>91</b>
<b>3.4</b>	<b>Методика визначення кінетичних параметрів анаеробного зброджування та питомого виходу біогазу із осаду рециркуляційних систем аквакультури</b>	<b>94</b>
	<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ БІОГАЗОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ОСАДУ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ АКВАКУЛЬТУРИ</b>	<b>99</b>
<b>4.1</b>	<b>Результати визначення питомого виходу осаду в рециркуляційних системах аквакультури</b>	<b>99</b>
<b>4.2</b>	<b>Результати досліджень ущільнення осаду установок замкнутого водопостачання аквакультури</b>	<b>101</b>
<b>4.3</b>	<b>Результати досліджень питомого виходу біогазу із ущільненого осаду установок замкнутого водопостачання аквакультури</b>	<b>107</b>
<b>4.4</b>	<b>Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень</b>	<b>121</b>
<b>4.5</b>	<b>Висновки по розділу 4</b>	<b>122</b>
	<b>РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ВИРОБНИЧОЇ ПЕРЕВІРКИ ТА ОЦІНКИ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БІОГАЗОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ОСАДУ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ АКВАКУЛЬТУРИ</b>	<b>125</b>
<b>5.1</b>	<b>Інженерна методика розрахунку параметрів процесу та результати впровадження результатів досліджень</b>	<b>125</b>
<b>5.2</b>	<b>Економічна ефективність процесу біогазового зброджування осаду рециркуляційних систем аквакультури</b>	<b>132</b>
	<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>	<b>145</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>147</b>
	<b>ДОДАТКИ</b>	<b>165</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У сучасних умовах кліматичних змін людство має приділяти максимум уваги ефективному використанню енергії та природних ресурсів. Аквакультура одна із галузей харчової індустрії, яка має значні темпи розвитку. Для забезпечення потреб людства у рибній продукції до 2030 року її річне виробництво повинно зрости до 120 млн. т. В установках аквакультури виробляється більше половини рибної продукції.

Все більшого поширення набуває виробництво продукції аквакультури в рециркуляційних системах аквакультури (РСА). Обсяги вирощування за допомогою таких систем прісноводних риб (найчастіше вугра і сома) та форелі невпинно зростають. Використання РСА – найбільш перспективна світова тенденція. Такі системи забезпечують низький рівень впливу на навколишнє середовище, а також зменшують потреби у воді та енергії. Вихід риби в таких системах є постійним і передбачуваним. Мають вони також суттєвий недолік – високі капітальні та експлуатаційні витрати.

Культивування риби в РСА повинно забезпечити часткову енергетичну автономність за рахунок тепла і електроенергії, отриманих при когенерації біогазу, який утворюється при метановому зброджуванні органічних складових осаду (залишки кормів, продукти метаболізму, відходи переробки риби та ін.), що відстоюється при функціонуванні системи.

Таким чином, використання РСА потребує подальшого поширення з метою забезпечення населення рибною продукцією, а самі РСА – подальшого удосконалення для підвищення їх енергетичної ефективності.

Останнім часом виконаний значний обсяг досліджень щодо розробки технічних засобів для реалізації процесу біогазового зброджування органічної біомаси. Однак, процес виробництва біогазу із осаду стічних вод РСА при штучному виро-

щуванні риби потребує подальшого удосконалення в напрямку обґрунтування параметрів біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод РСА та підвищення їх енергетичної автономності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за обраним напрямком дисертації виконувалися у відповідності з планами науково-дослідних робіт Національного університету біоресурсів і природокористування України за темою: «Розробити технологію інтегральної переробки біологічних відходів у біогазових установках нового покоління» (номер державної реєстрації 0111U003687).

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи – підвищити вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби шляхом обґрунтування показників ущільнення осаду та процесу анаеробного зброджування.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання:

- провести аналіз технологічних операцій та технічних засобів очистки стічних вод систем штучного вирощування риби та виробництва біогазу із осаду стічних вод;
- обґрунтувати вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування біомаси в метантенках із періодичним завантаженням;
- розробити експериментальний зразок відстійника та обґрунтувати показники ущільнення осаду стічних вод систем штучного вирощування риби;
- обґрунтувати вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби;
- виконати техніко-економічну оцінку ущільнення та анаеробного зброджування осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

*Об'єкт дослідження* – біотехнологічний процес анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

*Предмет дослідження* – обґрунтування показників ущільнення та виходу метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

**Методи дослідження.** Оцінка питомого виходу осаду в установці для вирощування риби проводилася на базі підприємств по вирощуванню риби у Васильківському районі Київської області. Вміст сухої речовини визначався шляхом фільтрування стічних вод і осадів із наступним висушування залишків на фільтрах у муфельній печі. Вміст органічної маси в осаді визначалася шляхом висушування проб у муфельній печі. Оцінка агрохімічних показників осаду та стічної води після відстоювання у відстійнику проводилося за стандартними методиками у спеціалізованій лабораторії Національного університету біоресурсів і природокористування України. Дослідження показників анаеробного зброджування проводилися на базі лабораторії виробництва біогазу Інституту технічної теплофізики НАН із використанням осаду стічної змивної води механічного фільтра РСА для вирощування нільського кларійового сома (*Clarias gariepinus*).

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше отримані залежності, які дозволяють визначити інтегральний рівень розкладу органічної біомаси, її інтегральну швидкість розкладу та інтегральний питомий вихід метану в залежності від часу зброджування та періодичності завантаження біогазового реактора, а також максимальне значення періодичності завантаження біогазового реактора для забезпечення максимального виходу метану під час анаеробної ферментації.

Вперше, для умов відстоювання та анаеробного зброджування осаду стічної змивної води механічних фільтрів РСА при вирощуванні нільського кларійового сома (*Clarias gariepinus*), експериментально встановлено показники ущільнення осаду стічних вод систем штучного вирощування риби; залежність рівня та швидкості розкладу сухої органічної речовини (СОР) та питомого виходу метану від часу анаеробного зброджування; вихід біогазу й метану та концентрацію метану в біогазі під час анаеробної ферментації.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу та метану під час анаеробної ферментації та роботи

біогазового реактора в режимі періодичного завантаження. Встановлено доцільність створення системи відстоювання на основі двох відстійників: перший для відстоювання стічної змивної води механічних фільтрів; другий – для ущільнення отриманого осаду. Розроблено технологічну схему відстоювання та анаеробного збродження осаду стічної змивної води механічних фільтрів РСА, яка дозволить отримати прибуток від виробництва метану 4,29 грн/м<sup>3</sup> та 3,39 грн/кВт год від виробництва електроенергії на основі метану. Впровадження обладнання для підготовки змивної води механічних фільтрів до анаеробного збродження з метою отримання біогазу із продуктивністю за кількістю змивної води механічних фільтрів 1577 м<sup>3</sup>/рік в ТОВ «Аква Систем Органік» дозволило отримати фактичний економічний ефект 10 тис. грн/м<sup>3</sup> ущільненого осаду та додатковий розрахунковий прибуток від виробництва електроенергії на основі метану – 320 грн/м<sup>3</sup> зброженого осаду. Результати досліджень впроваджено в навчальний процес Національного університету біоресурсів і природокористування України.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертації отримано здобувачем самостійно, а саме: проаналізовано сучасний стан РСА; узагальнено сучасні системи анаеробного збродження біомаси, на основі яких розроблено математичну модель для визначення інтегрального рівня розкладу органічної біомаси, її інтегральної швидкості розкладу та інтегрального питомого виходу метану в залежності від часу збродження та періодичності завантаження біогазового реактора; експериментально досліджено умови відстоювання та анаеробного збродження осаду стічної змивної води механічних фільтрів РСА при вирощуванні нільського кларійового сома (*Clarias gariepinus*); проведено економічну оцінку виробництва біогазу. Дисертація є самостійно виконаною науковою працею. Наукові положення, висновки й рекомендації, що викладені в дисертації і виносяться на захист, одержано автором особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на: Дев'ятій міжнародній науково-практичній конференції

«Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні» (м. Львів, 2017); 8th International Scientific Conference «Rural Development» (Lithuania 2017); IV-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» (м. Житомир, 2018); Міжнародній науково-практичній конференції за участю ФАО «Кліматичні зміни та сільське господарство. Виклики для аграрної науки та освіти» (м. Київ, 2018); II-й міжнародній науково-практичній конференції «Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві», (м. Житомир, 2018); Міжнародній науково-практичній конференції приуроченої до Всесвітнього дня водних ресурсів «Водні екосистеми у контексті євроінтеграції: Реалії та перспективи» (м. Житомир, 2019); VI-й Міжнародній науково-технічній конференції «Крамаровські читання» з нагоди 112-ї річниці від дня народження д.т.н., професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ Крамарова Володимира Савовича (м. Київ, 2019); II-й Міжнародній науково-практичній конференції "Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку", присвяченій 90-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України (м. Київ, 2019); XIX-й Міжнародній науковій конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій», присвяченій 85-річчю від дня народження академіка Л.В. Погорілого та 150-річчю від дня народження професора К.Г. Шиндлера (Дослідницьке, 2019); 18-th International Scientific Conference Engineering for Rural Development (Jelgava, Latvia, 2019); XXII-й міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2021); 20-th International Scientific Conference Engineering for Rural Development (Jelgava, Latvia, 2021); XXV-й міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2024).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 30 наукових праць, із яких 1 монографія, 1 навчальний посібник, 5 статей у періодичних наукових виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази Scopus, 2 статті у наукових

фахових виданнях України, 2 патенти України на винахід, 4 патенти України на корисну модель та 15 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 183 сторінки. Список використаних джерел налічує 148 найменувань. Дисертація містить 62 рисунків та 17 таблиць.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗРОБОК ТА ДОСЛІДЖЕНЬ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ АКВАКУЛЬТУРИ

### 1.1 Загальна компоновка та конструкція основних елементів рециркуляційних системах аквакультури

Ринок риби і морепродуктів в Україні в значній мірі є залежним від імпортованих поставок. Крім того, якість поверхневих вод не завжди відповідає нормам, прийнятим для розведення риби через їх забрудненість стічними водами міст та тваринницьких комплексів. Виходом з даної ситуації може стати використання рециркуляційних системах аквакультури.

У сучасних умовах кліматичних змін людство має приділяти максимум уваги ефективному використанню енергії та природних ресурсів. Що стосується кормової бази то ефективність використання корму характеризується коефіцієнтом конверсії (відношення кількості витраченого корму до одиниці отриманого приросту маси).

Загальновідомо, що за 180 днів відгодівлі свиней до досягнення маси 110 кг витрачається 321 кг повнораціонних комбікормів. Це говорить про те, що конверсія комбікорму становить 2,9 кг корму на один кг приросту маси. Середнє значення величини коефіцієнта конверсії комбікорму при відгодівлі свиней (90 кг приросту маси) становить від 2,8 до 3,2 кг корму на один кг приросту маси.

Опубліковані багатьма авторами результати наукових досліджень свідчать про те, що молодняк ВРХ до 6 місяців на кілограм приросту маси потребував від 3,8 до 4,5 кормових одиниць, ВРХ від 6 до 12 місяців – від 5,6 до 6,7 кормових одиниць, а від 12 до 18 місяців на кілограм приросту маси потребувалось уже до 9 кормових одиниць. Крім того, відгодівля ВРХ від 15-20-денного віку до реалізації в 16 місяців живою масою 450 кг із середньодобовим приростом маси від 850 до 950 г потребує 30 ц кормових одиниць на весь період вирощування до реалізації на м'ясо. Середнє значення величини коефіцієнта конверсії корму при відгодівлі ВРХ становить від 7 до 8 кормових одиниць. Також відомо, що інтенсивна и відгодівля

ВРХ до віку від 15 до 18 місяців і ваги від 450 до 500 кг потребує від 7 до 8 кормових одиниць на 1 кг приросту маси при середньодобовому прирості маси в межах від 0,8 до 1,2 кг. Враховуючи, що одну кормову одиницю можна перевести в 0,9 кг комбікорму, середнє значення величини коефіцієнта конверсії комбікорму при відгодівлі ВРХ становить від 6,3 до 7,2 кг корму на один кг приросту маси.

За останні роки жива маса бройлерів збільшилася в 2,3 рази, термін відгодівлі до 2 кг скоротився із 63 до 37 днів. При цьому коефіцієнт конверсії корму знизився із 2,5 до 1,67 кг корму на один кг приросту маси. У середньому значення коефіцієнта конверсії корму при вирощуванні бройлерів становить від 1,6 до 2 кг на один кг приросту маси.

При годівлі форелі до повного насичення виявилось, що найбільший приріст маси був отриманий при температурі води 14 °С. Межі зміни величини коефіцієнта конверсії комбікорму становили від 1,2 до 2 кг корму на один кг приросту маси, причому більші його значення відповідали більшій масі риби, а середнє значення величини коефіцієнта конверсії комбікорму становило 1,6 кг корму на один кг приросту маси. При годівлі сомів комбікормом для форелі середнє значення величини коефіцієнта конверсії комбікорму становило 1,2 кг корму на один кг приросту маси.

Серйозне значення на сучасному етапі розвитку людства мають також викиди парникових газів CO<sub>2</sub> у результаті виробництва продукції тваринництва. Так, викиди метану (CH<sub>4</sub>) за рахунок внутрішньої ферментації та під час збору і зберігання гною та викиди оксиду азоту (N<sub>2</sub>O) під час збору і зберігання гною становлять відповідно 60 і 0,62 кг/рік на одну голову при відгодівлі ВРХ, 4,64 кг/рік і 0,33 кг/рік на одну голову при відгодівлі свиней та по 0,02 кг/рік під час збору і зберігання посліду на одну голову при відгодівлі бройлерів [91].

Із урахуванням коефіцієнтів перерахунку викидів парникових газів в еквівалентні викиди CO<sub>2</sub> (21 для метану та 310 для оксиду азоту) отримаємо значення еквівалентних викидів CO<sub>2</sub> за рахунок внутрішньої ферментації та під час збору і зберігання гною 1452,2 кг/рік на одну голову при відгодівлі ВРХ, 199,74 кг/рік на одну голову при відгодівлі свиней та 6,62 кг/рік на одну голову при відгодівлі бройлерів.

На думку спеціалістів ФАО аквакультура набагато менше здійснює викидів парникових газів у порівнянні з виробництвом м'яса у тваринництві. Це означає, що розведення та споживання білка, отриманого із риби може сприяти пом'якшенню наслідків зміни клімату.

Аквакультура одна із галузей харчової індустрії, яка має значні темпи розвитку. Для забезпечення потреб людства у рибній продукції до 2030 року її річне виробництво повинно зрости до 120 млн. т. В установках аквакультури виробляється більше половини рибної продукції.

Все більшого поширення набуває виробництво продукції аквакультури в рециркуляційних системах аквакультури (РСА). Обсяги вирощування за допомогою таких систем прісноводних риб (найчастіше вугра і сома) та форелі невпинно зростають. Використання РСА – найбільш перспективна світова тенденція. Такі системи забезпечують низький рівень впливу на навколишнє середовище, а також зменшують потреби у воді та енергії. Вихід риби в таких системах є постійним і передбачуваним. Мають вони також суттєвий недолік – високі капітальні та експлуатаційні витрати.

Собівартість виробництва товарного коропа в таких установках становить близько двох американських доларів, що приблизно в 4-5 разів вище вартості коропа, вирощеного в ставках і майже в 2 рази ніж у садкових господарствах. Тому РСА найчастіше використовуються для вирощування делікатесної дорогої продукції, такої як осетрові, вугри, річкові раки та креветки. Інший шлях використання РСА – вирощування посадкового матеріалу різних видів риб.

Знизити собівартість виробництва риби в РСА можна за рахунок підвищення продуктивності, використовуючи технологію безперервного вирощування у порівнянні з вирощуванням партій риби.

Системи культивування риби в РСА повинні забезпечити часткову енергетичну автономність за рахунок тепла і електроенергії, отриманих при когенерації біогазу, який утворюється при метановому зброджуванні органічних складових осаду (залишки кормів, продукти метаболізму, відходи переробки риби та ін.), що відстоюється при функціонуванні системи.

Таким чином, використання РСА потребує подальшого поширення з метою забезпечення населення рибною продукцією, а самі РСА – подальшого удосконалення для підвищення їх енергетичної ефективності.

РСА – це системи, у яких вода після механічної та біологічної очистки використовується повторно під час виробництва продукції аквакультури. Такі системи забезпечують низький рівень впливу на навколишнє середовище, а також зменшують потреби у воді та енергії. Вихід продукції в таких системах є постійним і передбачуваним. Головний їх недолік – високі капітальні та експлуатаційні витрати. Основні параметри, які впливають на процес розвитку та вирощування риби в таких системах – температура і концентрація розчиненого кисню у воді.

Рибоводні системи з РСА, розташовані в закритих будівлях використовують близько 0,2 м<sup>3</sup> свіжої води на кілограм виробленої риби, а під відкритим небом – до 3 м<sup>3</sup>. У той же час, традиційна проточна система для вирощування форелі зазвичай використовує близько 30 м<sup>3</sup> свіжої води на кілограм [64].

Підвищення попиту на рибу і морепродукти супроводжується стабільним зростанням обсягів виробництва аквакультури. Згідно з оцінками, середньорічні темпи зростання обсягів виробництва аквакультури за період із 1990 по 2005 рр. становив 8,5 %. Внесок аквакультури у забезпечення населення рибними продуктами значно виріс, досягнувши майже половини (47 відсотків) світового обсягу в 2008 році, у порівнянні із 8 % з 1970 роком. Згідно з прогнозами ця тенденція продовжиться, при цьому внесок аквакультури у виробництво рибних продуктів досягне до 2020 року 60 % [67].

Собівартість виробництва товарного коропа в таких установках становила близько двох американських доларів, що приблизно в 4-5 разів вище вартості коропа, вирощеного в ставках і майже в 2 рази в садкових господарствах. Тому установки такого типу найчастіше використовуються для вирощування делікатесної дорогої продукції, такої як осетрові, вугри, річкові раки та креветки. Інший шлях використання РСА – вирощування посадкового матеріалу різних видів риб. Подібні господарства можуть бути розміщені поблизу великих міст або в густонаселених зонах, звідки вони легко можуть поставляти свіжу рибу споживачам.

Знизити собівартість виробництва риби в РСА можна за рахунок підвищення продуктивності, використовуючи технологію безперервного вирощування у порівнянні з вирощуванням партій риби [38, 35, 93]. У цьому випадку відбувається постійне і безперервне зариблення та збір риби, а сама система постійно працює при максимальному навантаженні, частота годування риби у кожній ємності підтримується на максимальному рівні. Цей принцип успішно реалізується на прикладі вирощування форелі [21].

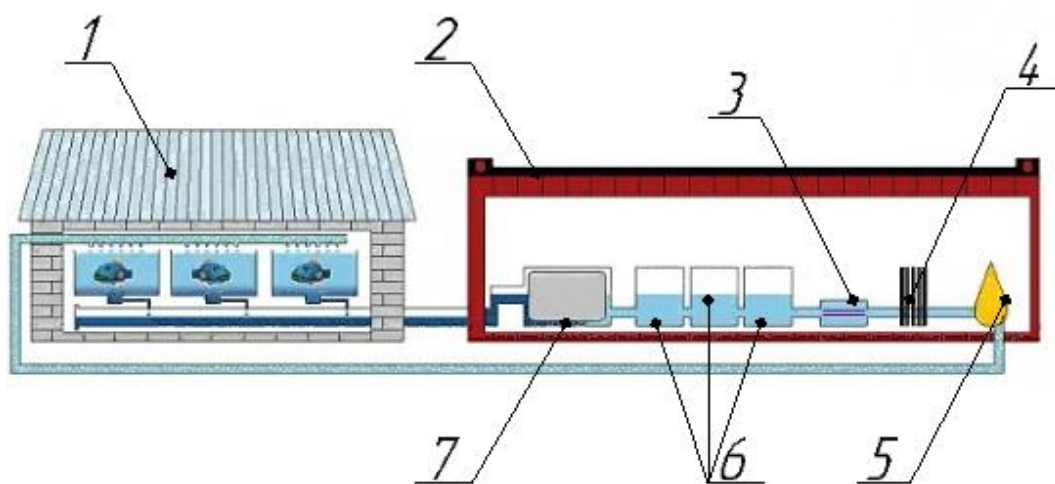
Виробництво продукції аквакультури в РСА набуває все більшого поширення, а обсяги вирощування за допомогою таких систем прісноводних риб (найчастіше вугра і сома) становлять в Європі декілька тисяч тон. Зростає використання прісноводної аквакультури також в країнах Азії. Використання РСА – найбільш перспективна світова тенденція. При вирощуванні в замкнених установках всі параметри технологічного процесу підтримуються за допомогою автоматизованих пристроїв, а вплив природних факторів на хід технологічного процесу мінімальний. Однак такі системи потребують складного технологічного забезпечення, яке потребує постійно удосконалення.

Рециркуляційні системи аквакультури походять із США, де їх використання було обумовлено Національною програмою відновлення чисельності природних популяцій форелі в північно-західних штатах у середині 20 століття. Сьогодні РСА активно використовуються для виробництва продукції аквакультури по всьому світу.

Основним завданням РСА є штучне створення середовища проживання гідробіонтів, яке забезпечувало б максимальний вихід товарної продукції високої якості в скорочені терміни. Якісно очищена вода в РСА дозволяє підвищити щільність посадки риби та більш ефективно використовувати виробничі площі.

В РСА вода після механічної та біологічної очистки використовується повторно для зменшення випуску поживних речовин в навколишнє середовище і потреби у воді і енергії. Основним завданням РСА є штучне створення сприятливого середовища проживання при мінімальних витратах води і енергії.

Для комплектування рециркуляційних системах аквакультури використовуються спеціальне обладнання, за допомогою якого очищають відпрацьовану воду і використовують її повторно. Приклад реалізації такої системи приведено на рис. 1.1.



1 – басейни з рибою; 2 – біофільтр РСА контейнерного типу; 3 – установка УФ знезараження води; 4 – теплообмінник; 5 – конусний оксигенатор; 6 – трьохсекційний біофільтр; 7 – барабанний механічний фільтр

Рис. 1.1. Рециркуляційних система аквакультури контейнерного типу [128]

Відома система, яка включає в себе три резервуара по 1850 літрів кожен, механічний фільтр, біофільтр, компресор, водяний насос, УФ-стерилізатор, автоматичні кормушки, відстійник та допоміжне обладнання (рис. 1.2). Система компактна і швидко монтується. Вона може бути використана, як при розведенні так і при вирощуванні риби, а також при карантині і роздрібній торгівлі живою рибою. Кожен басейн має клапани для коригування рівня води, наприклад, система дозволяє знизити рівень води при лікуванні риб, коли потрібно тимчасово досягти високої концентрації медичних препаратів.

На рис. 1.3 показано стандартну РСА. Основним недоліком РСА є висока частка витрат на підтримання оптимальної температури води в складі собівартості вирощуваної риби.



Рис. 1.2. Рециркуляційна система аквакультури контейнерного типу [9]

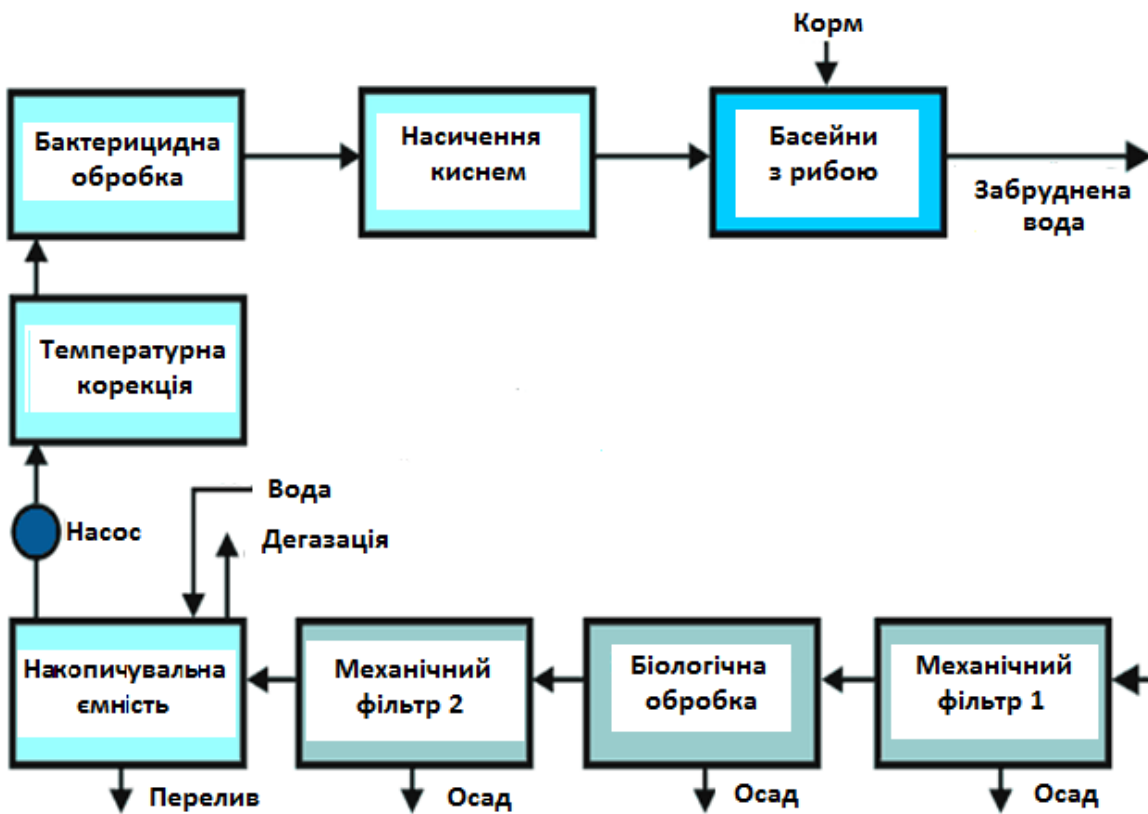


Рис. 1.3. Блок-схема рециркуляційної системи аквакультури [120]

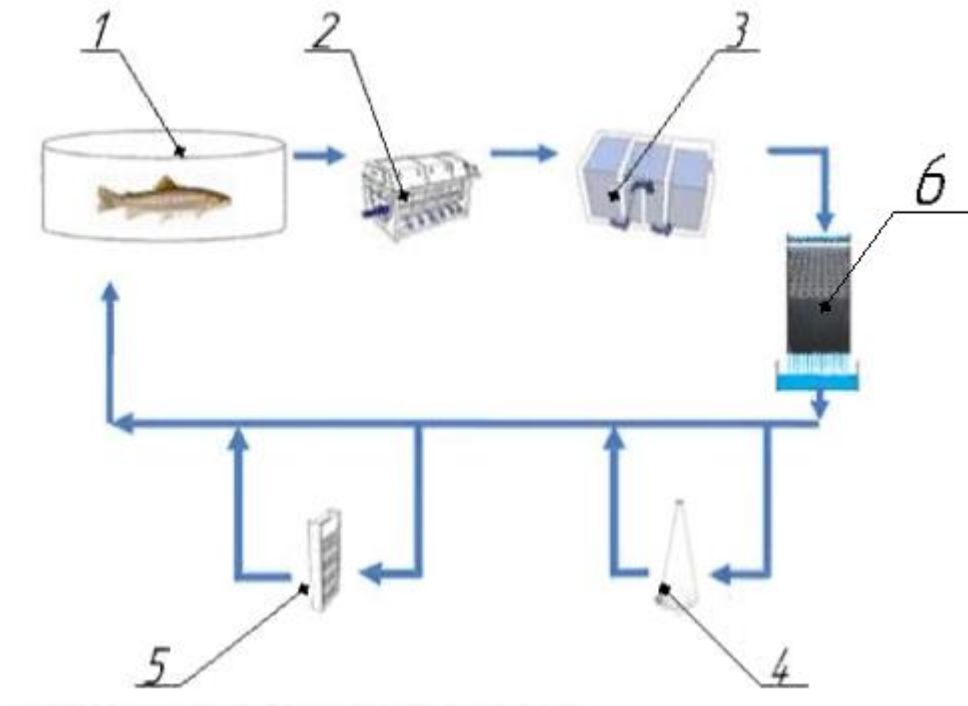
Запропоновано також РСА для розведення раків у домашніх умовах (рис. 1.4). Для забезпечення розведення раків в РСА необхідно, щоб температура повітря не опускалася нижче плюс 15°C, а також необхідно мати мінімум три ємності з чистою водою та обладнання для насичення води киснем.



Рис. 1.4. Рециркуляційна система аквакультури для розведення раків [96]

Щоб видаляти відходи, які виділяються рибами, і додавати кисень для підтримки їх життя і здоров'я, воду в РСА необхідно постійно очищати. Під час очищення вода надходить в механічний фільтр, звідти в біологічний фільтр, потім вона піддається аерації, з неї видаляється вуглекислий газ, після чого вона знову подається в рибоводні басейни (рис. 1.5). Таким чином, система очищення води складається з механічної фільтрації, біологічної очистки та аерації з дегазацією. Використовують також збагачення киснем та УФ-дезінфекцію.

Корм з'їдається і перетравлюється рибами для використання в обміні речовин, забезпечення енергією і поживними речовинами для росту та інших фізіологічних процесів. Кисень ( $O_2$ ) надходить через зябра і витрачається для виробництва енергії і розщеплення білків, тоді як вуглекислий газ ( $CO_2$ ) і аміак ( $NH_3$ ) виробляються як відходи. Неперетравлений корм виділяється у воду в формі екскрементів, які містять органічну речовину. Вуглекислий газ і аміак виділяються в воду через зябра. Отже, споживаючи кисень і корми, риби забруднюють воду екскрементами, вуглекислим газом і аміаком.

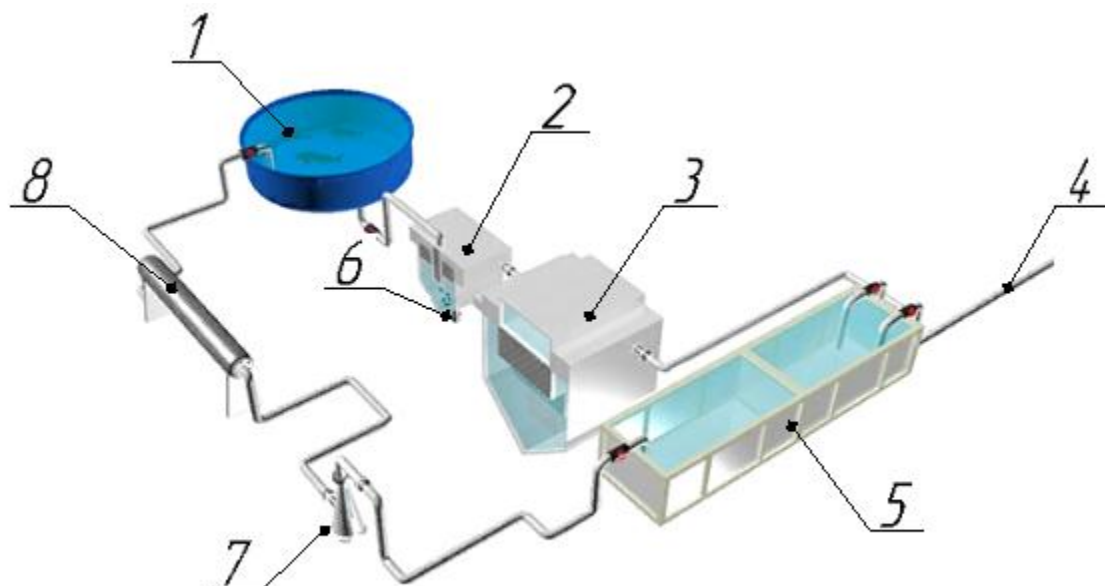


1 – басейни з рибою; 2 – механічний фільтр; 3 – біофільтр; 4 – збагачення води киснем; 5 – УФ дезінфекція води; 6 – аератор

Рис. 1.5. Схема рециркуляційної системи аквакультури [11, 63]

Розроблено і випускається також повний комплект обладнання для вирощування риби в РСА (рис. 1.6), який включає пластикові басейни і ємності, труби, насоси, обладнання для водоочищення та водопідготовки (механічне і біологічне очищення, знезараження, дегазація, регулювання температури і насичення киснем). Витрата води коливається від 0,8 до 3 л в хвилину на 1 кг риби, зміна води в басейні забезпечується кожні 20-25 хв.

Механічним фільтром грубої очистки вода очищається від залишків корму, екскрементів. В якості фільтруючого шару застосовується поліетиленова гранула діаметром 2,5 мм. Фільтри з плаваючим завантаженням знайшли широке застосування в практиці рибоводних установок. Забруднена вода подається в зону відстою. У цій зоні фільтри з плаваючим завантаженням працює як звичайний вертикальний відстійник. Повільно піднімаючись вгору, вода проходить фільтруючий шар і очищеною зливається через сітку в кільцевої лоток. Очищення фільтруючого шару проводиться при відключенні подачі води, що очищається.



1 – басейн; 2 – механічний фільтр; 3 – біофільтр; 4 – трубопровід свіжої води; 5 – басейн-відстійник води; 6 – патрубок зливу промивної води; 7 – пристрій для збагачення води киснем; 8 – пристрій для УФ знезараження води

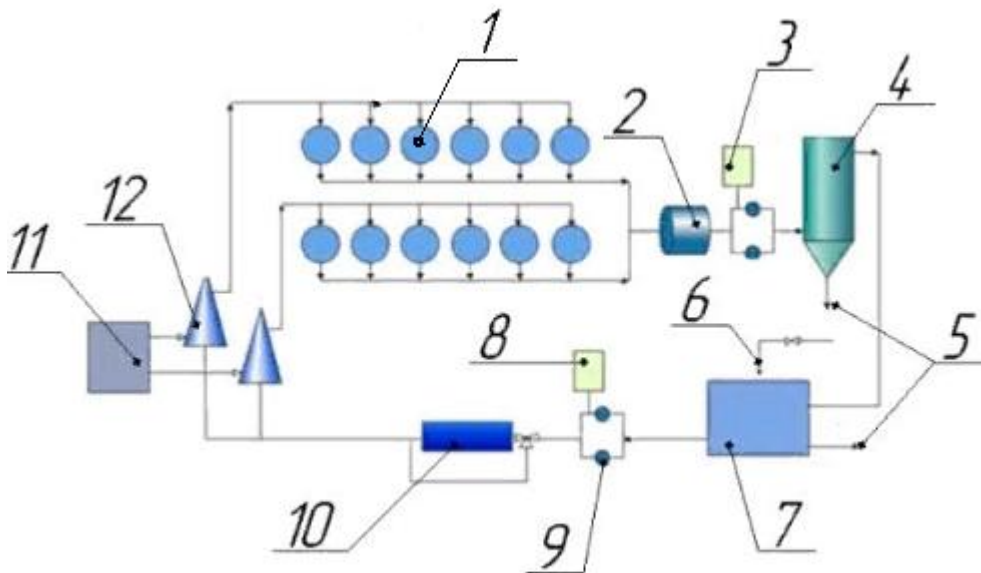
Рис. 1.6. Схема рециркуляційної системи аквакультури із біофільтром на основі поліетиленових гранул [66]

Для очищення використовують барботаж гранули стисненим повітрям або струменем води. Потім воді дають відстоятися і зливають осад, що накопився на дні. Фільтри з плаваючим завантаженням мають високу ефективність очищення – від 82 до 92%. Фільтруючі властивості плаваючого завантаження відновлюються досить легко, так як навіть незначні зусилля, що виникають при барботажі, руйнують шар бруду, який на них накопився. Барботаж проводиться один раз в тиждень. Видалення осаду, що накопився в конусній частині фільтра проводиться щодня, через вентиль випуску бруду.

У корпусі біофільтра розміщується стакан, всередині якого плаває шар поліетиленових гранул із щільністю від  $0,93$  до  $0,95$  т/м<sup>3</sup> і питомою поверхнею від  $750$  до  $1000$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, які є основою для біоплівки. Очищена в фільтрі вода стікає в басейн. Кожен із лотків з гранулою може бути вилучений з фільтра без припинення цирку-

ляції води, і підданий промиванні з видаленням осаду. Дану процедуру слід проводити раз на місяць з одним із лотків.

Ще одна установка для розведення осетрів має у своєму складі (рис. 1.7): круглі поліпропіленові басейни (діаметр 2,5 м і більше, глибина 1 – 1,5 м), систему поліпропіленових трубопроводів, циркуляційні насоси, кисневий генератор для насичення очищеної води киснем, озонатор та флотатор для покращення якості води, систему фільтрації (барабанний механічний фільтр, вугільний фільтр, біофільтр, УФ лампа), теплообмінники і нагрівачі для підтримки температурного режиму води в системі.



1 – басейни для мальків риби; 2 – механічний фільтр; 3, 8 – шафа управління; 4 – біологічний фільтр з плаваючим навантаженням; 5 – патрубки для осаду; 6 – трубопровід свіжої води; 7 – басейн для води; 9 – насоси; 10 – блок УФ знезараження води; 11 – генератор кисню; 12 – кисневий конус

Рис. 1.7. Установка для розведення осетрів [59]

При проектуванні системи РСА важливо передбачити можливі відключення електроенергії, встановивши аварійний електрогенератор.

Вода в РСА постійно циркулює по колу, проходить через систему фільтрації,

збагачується киснем і подається в басейни з рибою (рис. 1.8). Із басейнів вода поступово самопливом зливається в загальний резервуар, із якого насосом подається в систему фільтрів. Вода очищається від залишків життєдіяльності риб, залишків корму і інших забруднень та знезаражується. Далі очищена вода збагачується киснем за допомогою кисневого генератора і подається знову в басейни. В процесі фільтрації частина брудної води зливається в каналізацію і заповнюється новою водою зі свердловини.

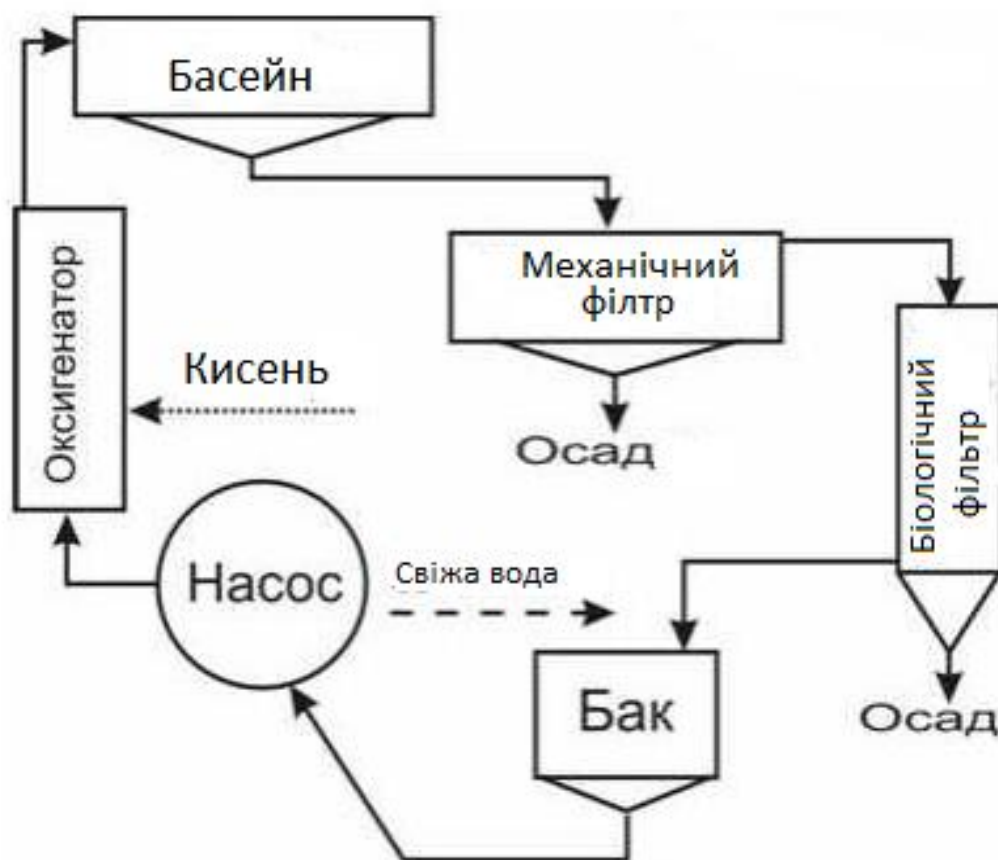


Рис. 1.8. Схема РСА [89]

Середовищем існування гідробіонтів в технологічній лінії є басейни з водою. 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.

Очищення води в РСА починається з механічної фільтрації. Найбільш ефективні пристрої для цієї операції – барабанні фільтри, що являють собою обертовий

мікросітчатий барабан встановлений в корпусі. Барабан потребує періодичного промивання відфільтрованою водою для очищення барабана від твердих нерозчинних частинок (фекалії, корму).

Конструкції фільтрів забезпечують дбайливе поводження з твердими частинками, що дозволяє досягти високої ефективності фільтрації, необхідної в РСА (рис. 1.9). Барабанні фільтри встановлюються у безнапірних системах.



Рис. 1.9 – Барабанний фільтр для механічної фільтрації води в РСА [10]

У напірних системах застосовуються піщані фільтри у вигляді товстого шару кварцового піску.

Наступним етапом очищення води є процес видалення з неї розчиненого азоту. Продукти життєдіяльності риб викликають акумуляцію амонійного азоту в воді, який вкрай токсичний для гідробіонтів. Рішенням даної задачі є перевід амонійного азоту в нітрати, концентрація яких у воді може бути в сотні разів вище

амонійного азоту без шкоди для риб. Така хімічна реакція можлива завдяки бактеріям, які живуть на поверхнях біофільтра. Біофільтр це ємність, яка заповнена біо-загрузкой, на поверхнях якої селяться колонії бактерій. Ємність біофільтра – біореактор, наповнюється водою і піддається аерації. Повітря створює барботажний ефект, що інтенсифікує процес, а також постачає біофільтр необхідним киснем. Крім того, інтенсивна аерація в біофільтрі сприяє видаленню з води накопичується від дихання риб вуглекислого газу.

За допомогою насосного обладнання здійснюється перекачування та забір води. Підживлення чистою водою, як правило, здійснюється в кількості, що дорівнює віддаленій зі стоками води. Зазвичай ця величина знаходиться на рівні від 5 до 15%.

Після біофільтра для ряду видів риб, у тому числі для осетрових, вирішується питання денітрифікації. Незважаючи на високі допустимі норми концентрації нітратів у воді, їх кількість невпинно зростає і вимагає видалення з системи. Здійснюється це або за рахунок збільшення щодобового підживлення, або введенням за рахунок денітрифікації. Денітрифікатор – це той же біофільтр, тільки закритого типу (без доступу кисню). У денітрифікаторах за рахунок бактерій проходить розкладання нітратів на вільний азот. Процес денітрифікації протікає при постійному підживленні джерелом вуглецю. У більшості випадків це метанол. Всі денітрифікатори мають невисоку пропускну здатність по воді, тому встановлюються в систему байпасом, тобто пропускають через себе тільки частину потоку.

У процесі біофільтрації і денітрифікації знижується лужний показник води (рівень рН). Його необхідно регулювати шляхом періодичного додавання до води лугу. Для таких цілей застосовується звичайна харчова сода.

Найбільш ефективна двохстадійна дезінфекція води. Перша стадія – ультрафіолетове опромінення води. Друга – обробка води озоном. Для цього використовують ультрафіолетові установки (рис. 1.10) та озонатори (рис. 1.11), які виробляють озон і розчиняють його в воді.



Рис. 1.10 – Загальний вигляд ультрафіолетової установки для дезінфекції води в РСА [126]



Рис. 1.11 – Загальний вигляд озонатора для дезінфекції води в РСА [125]

Для насичення води озоном використовуються генератори коронного розряду з повітряною системою охолодження, який для роботи використовує повітря з навколишнього середовища.

Оксигенатори (рис. 1.12) дозволяють отримати ефективно розчинення кисню на рівні 95%, насичення води киснем до 25 мг/л при тиску в 1 бар. При більшому тиску можливе отримання більшої концентрації розчиненого кисню у воді.



Рис. 1.12 – Загальний вигляд оксигенатора для насичення води киснем в РСА [123]

Для підтримання температура води використовують теплообмінники, які, встановлюються байпасом. Теплообмінник працює за рахунок підведення тепла – гарячої вода з температурою від 80 до 90°C.

Підготовка води перед подачею в басейни завершується насиченням її киснем. Вода пропускається через оксигенатор, до якого відведено джерело кисню (балони з киснем).

Контроль роботи здійснюється системою, яка зазвичай вимірює температуру, рН і концентрацію кисню.

Годування гідробіонтів здійснюється автоматизовано. У бункер годівниць засипається комбікорм, задається порція годування і встановлюється таймер, після чого годівниця сама викидає корм в заданий час.

Маятникова годівниця (рис. 1.13) приводиться в дію при торканні рибою маятника, розташованого біля поверхні води. У цей момент корм висипається у воду. Дискава годівниця (рис. 1.14) приводиться в дію контролером. Корм проходить через зазор між обертовим диском і корпусом годівниці. Корм розподіляється куполом навколо годівниці [124].

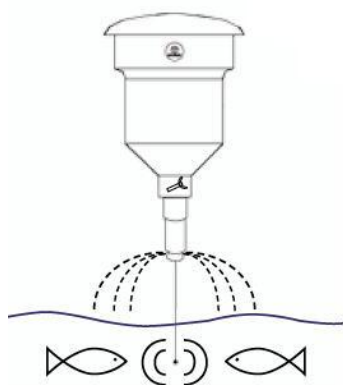


Рис. 1.13 – Маятникова годівниця

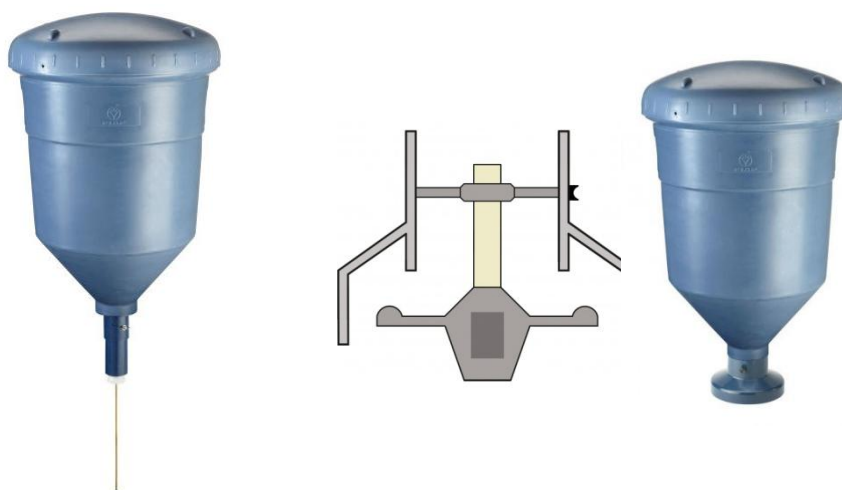


Рис. 1.14 – Дискава годівниця

Шнекова годівниця (рис. 1.15) приводиться в дію також контролером. Корм рівномірно транспортується шнеком і висипається в місце годування [124].

Шнекова годівниця з розкидачем (рис. 1.16) приводиться в дію контролером. Корм рівномірно транспортується шнеком та відцентровою силою обертового диска розкидається навколо годівниці [124].

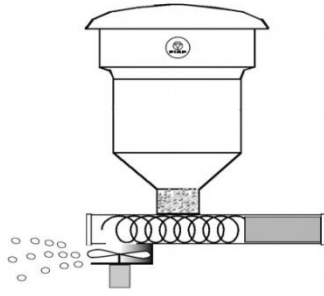
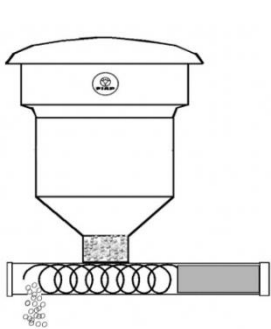


Рис. 1.15 – Шнекова годівниця

Рис. 1.16 – Шнекова годівниця з розкидачем

Годівниця призначена для роздавання гранул розміром від 2 до 10 мм та мають ємність від 3 до 60 кг.

У процесі механічної очистки води на фільтруючому елементі обладнання затримуються зважені частинки, які є продуктами життєдіяльності риб. Як правило, видаляється дана суспензія за допомогою промивання фільтра. При цьому отримують в середньому, від 10 до 20% на добу промивної води від загального обсягу води в системі. У цьому випадку доцільно застосовувати обладнання для зневоднення осаду, який фактично відділяє суспензію від води. Після зневоднення отримують густий осад і умовно чисту воду, яку можна повертати в основний цикл водоочищення. Зневоднення особливо актуально в разі, якщо скидання промивної води йде в каналізацію. Зневоднення також дозволяє отримувати цінне і екологічно безпечне органічне добриво. Зневоднення здійснюють за допомогою стрічкових, шнекових та мішкових фільтрів, а також за допомогою центрифуг.

Установки рециркуляційного водопостачання знайшли найбільше поширення у виробництві продукції аквакультури [93], оскільки дають можливість забезпечити підготовку води у відповідності до встановлених вимог.

Однак їх суттєвим недоліком, як і великої кількості конструктивних реалізацій даних установок є те, що при їх використанні відсутня можливість утилізації промивної води та осадів, що утворюється під час роботи РСА на стадії механічної фільтрації води.

## **1.2 Огляд досліджень по переробці осаду рециркуляційних системах аквакультури**

Одним із методів очищення стічних вод аквакультури є застосування водно-болотних угідь. Так при очистці стічних вод акваферми по вирощуванню форелі з використанням водно-болотних угідь було встановлено, що найвища ефективність очищення за видаленням зважених твердих речовин досягла 68% при гідравлічній швидкості завантаження 13,6 м<sup>3</sup>/день [135]. Хоча водно-болотні угіддя і показують деяку ефективність очистки стоків аквакультури під дією природних факторів, самі фактори забруднення при цьому із екосистеми не усуваються.

Для очищення стічних вод аквакультури використовують також гідропонні системи. Так було встановлено, що гідропонна система із вирощуванням ячменю дозволила зменшити вміст твердих речовин на величину від 52,7 до 60,5% [136], у зв'язку із чим автори рекомендують використання додаткового відстоювання.

Найбільш простим і економічно доцільним способом очистки стічних вод аквакультури є відстоювання із подальшим використанням осаду і відстояної стічної води. Використання седиментації (процес поділу стічної води на відстій і осад за рахунок осідання частинок осаду під дією сили тяжіння) для відділення осаду в рециркуляційних аквасистемах вважається неефективним із-за значних обсягів рециркуляційної води, що призводить до незначного часу її перебування у відстійнику. Однак використання відстійників може виявитися доцільним для осадження осаду стічної води із сіткових механічних фільтрів із обертовими мікроситами, які обробляють основний потік рециркуляційної води. Частинки, що затримуються на сітці, промиваються у збірний жолоб і відводять із рециркуляційних аквасистем. Обсяги

стічної води із сіткових механічних фільтрів складають менше 1% рециркуляційного потоку, а тому вважається, що седиментація є ефективним способом концентрування осаду. Ефективність седиментації (ефективність відстійника) визначається як відношення різниці концентрація твердих речовин на вході та на виході із відстійника у поточний момент часу до концентрації твердих речовин на вході у відстійник [139].

У оглядовій статті [133] було зроблено висновок про те, що відстійники є актуальними для використання для згущення стічної води із сіткових механічних фільтрів.

У статті [137] було виконано огляд, на основі якого встановлено, що щільність фекалій риби знаходиться в межах 1050-1080 кг/м<sup>3</sup>, а рибного корму – 1150-1200 кг/м<sup>3</sup>. Середня щільність становила 1190 кг/м<sup>3</sup>, а за іншими даними середній діапазон щільності знаходився в межах 1050-1160 кг/м<sup>3</sup>. Висновок авторів полягав у тому, що низька різниця щільності твердих речовин по відношенню до щільності прісної води (1000 кг/м<sup>3</sup>) у поєднанні із широким розподілом розмірів, ускладнює сепарування твердих речовин із стічної води рециркуляційних аквасистем.

Використання пілотної очисної системи стоків аквакультури показало, що ефективність видалення твердих речовин відстоюванням становила понад 70%, а за рахунок наступної комбінованої дії озонування та хімічної флокуляції було видалено 99% твердих речовин [138].

У статті [140] приведено результати дослідження системи очистки стічної води при вирощуванні форелі, де на останньому етапі очищення використовувався механічний фільтр і відстійник осаду змивної стічної води. Було встановлено низьку ефективність видалення твердих речовин механічним фільтром (на рівні 33–53%).

Для забезпечення седиментації осаду із стічних вод аквакультури досліджувалася також коагуляція [134]. Використання коагуляції для очищення стоків аквакультури хоча і показує ефективність видалення забруднюючих речовин все ж потребує подальших досліджень, а також ставить питання утилізації забруднених хімічними реагентами осадів, що утворюються під час процесу коагуляції.

На основі виконаного огляду наукових публікацій можна зробити наступні висновки: відстійники стічної води у рециркуляційних аквасистемах доцільно використовувати, оскільки вони є достатньо ефективними щодо видалення твердих речовин; відстійники мають відносно невисоку вартість, що обумовлює їх високу економічну ефективність; відстійники в системах очистки стічної води рециркуляційних аквасистемах використовуються на першому етапі очищення стічної води і не дозволяють забезпечити повну утилізацію утвореного осаду та відстояної стічної води.

Намагання вирішити проблему енергетичної автономності рециркуляційних аквасистем відкрили новий перспективний напрямок у конструюванні техніки та обладнання для аграрного виробництва. Аналіз свідчить про стрімке впровадження у виробництво інноваційних ресурсозберігаючих технологій. Ряд країн за останні роки зробили значний крок у використанні поновлювальних джерел енергії та продовжують розвивати свої науково-технічні досягнення у цій галузі [62].

До рибних господарств встановлюються все більш суворі вимоги до утилізації осаду, а тому іде 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%), що подається в процес анаеробного розщеплення, тим вище частка мінералізованого азоту в переробленому осаді [5]. 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 та летючих жирних кислот може призвести до гальмування процесу виділення біогазу. Так мезофільна анаеробна обробка лососевого осаду (вміст сухої маси від 6,3 до 12,3% у безперервному реакторі при температурі 35°C та гідравлічному утриманні упродовж від 55 до 60 днів дозволяла досягнути 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 летючі концентрації жирних кислот досягали 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 *N* та від 1,2 до 2,4 кг *P* на тонну. Енергія метану, яка була досягнута в даному дослідженні, буде достатньо для покриття приблизно від 2 до 4% енергетичних потреб рибного господарства [16], а тому на практиці складно проводити стабільні анаеробні процеси анаеробного зброджування при вмісті рибного осаду більше 20 об.% [17].

Незважаючи на прогнозоване різке зростання світового рибного виробництва, проведені на даний час дослідження не інтегрують аквакультуру та сільське господарство, таким чином, усуваючи можливість оцінити їх взаємовпливу. Однак, стосовно аквакультури та сільського господарства визначено можливі міжгалузеві синергії для забезпечення оптимізації використання фосфору. Показано, що переробка вторинної сировини, як в межах, так і між секторами, далекі від оптимізації, а прогнозоване зростання аквакультури створить майбутні екологічні виклики. Вказується, що довгострокові зусилля повинні зосереджуватися на вдосконаленні методів аналізу технологічних та екологічних систем, щоб забезпечити відновлення фосфору від стоків аквакультури та гною в тваринництві [20].

Вирішальне значення має використання екологічних інженерних інструментів для розвитку більш стійкої аквакультури. У цьому контексті створюються інтегровані системи мультитрофної аквакультури, заснованої на морських водоростях, які були ефективними біофільтрами. Було встановлено, що температура та світло були основними факторами навколишнього середовища, які зумовлювали ефективність вирощування та видалення живильних речовин водоростями. Такі системи готові до впровадження в аквакультурі і мають екологічні та потенційно економічні вигоди для рибного господарства [1].

Інтеграція сільського господарства та аквакультури з анаеробною переробкою біомаси є популярною практикою в невеликих азіатських 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 [26, 39, 40, 13, 14].

Розроблена рециркуляційна система аквакультури, яка включає резервуари для культивування риби, механічний фільтр, біофільтр із відстійником, пристрої для бактерицидної обробки води та насичення її киснем, пристрій для видалення вуглекислого газу із води, що пройшла біофільтрацію, біогазову установку для метанового зброджування осаду, що утворюється під час біофільтрації та когенераційну установку для виробництва тепла і електроенергії [85, 114, 92]. У ході обробки потоку циркулюючої води (рис. 1.17), яка надходить із резервуарів з рибою, вода надходить у біофільтр та відстоюється для видалення осаду.

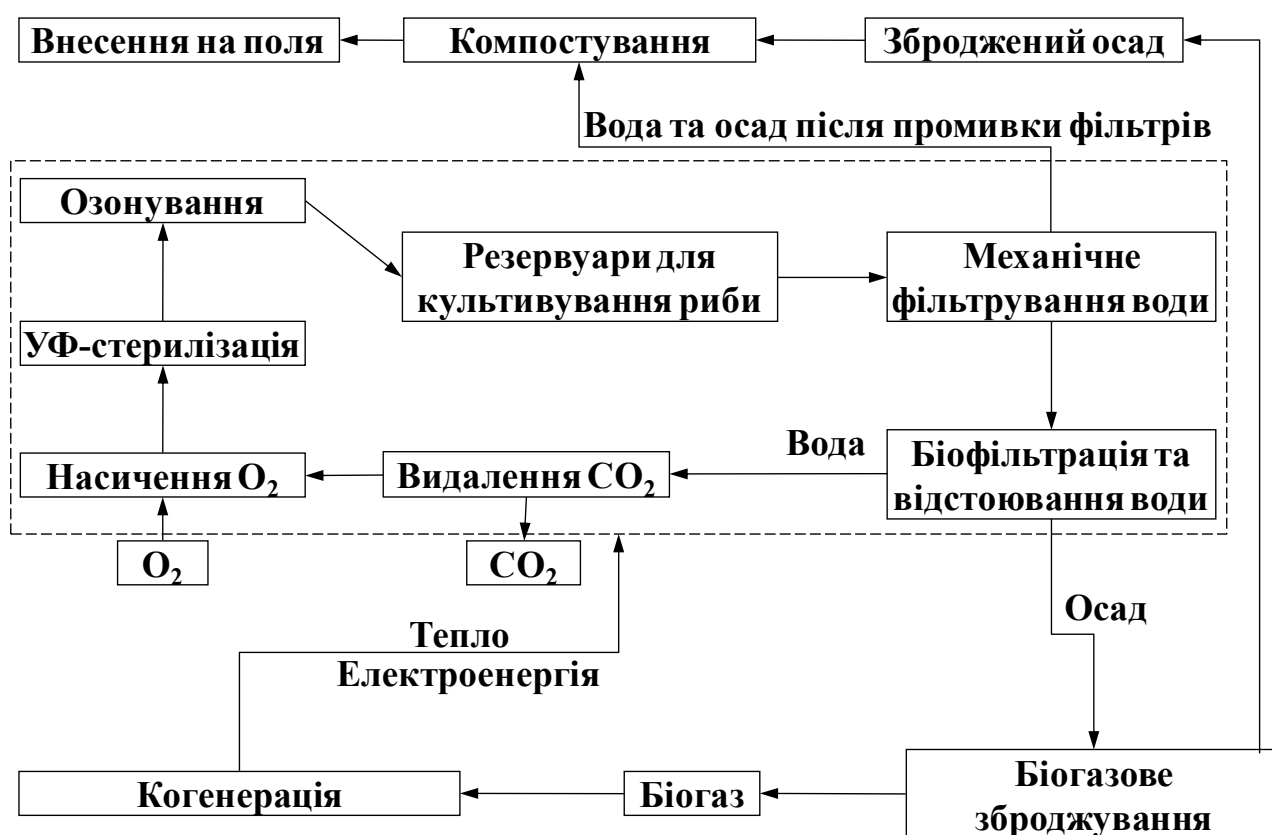


Рис. 1.17 – Блок-схема рециркуляційної системи аквакультури з виробництвом біогазу

Із потоку води, в подальшому, за допомогою пристрою для видалення вуглекислого газу видаляють надлишок вуглекислого газу і насичують воду киснем за допомогою пристроїв для бактерицидної обробки води та насичення її киснем. Осад, що утворюється при відстоюванні води у біофільтрах направляється у біогазову установку для забезпечення виробництва біогазу при метановому

зброджуванні органічних складових осаду. Утворений біогаз направляється у когенераційну установку для виробництва тепла і електроенергії, що забезпечує часткову енергетичну автономність РСА для виробництва аквакультури. Зброджений осад, після подальшого компостування, може бути утилізований в якості органічних добрив. На компостування подається також вода та осад після промивання фільтрів.

Таке технічне рішення рециркуляційної системи аквакультури дозволяє забезпечити часткову енергетичну автономність за рахунок тепла і електроенергії, отриманих при когенерації біогазу, який утворюється при метановому зброджуванні органічних складових осаду (залишки кормів, продукти метаболізму, відходи переробки риби та ін.), що відстоюється при функціонуванні системи.

Приведена рециркуляційної системи аквакультури була удосконалена шляхом додавання резервуарів для вирощування продукції аквакультури у наступній послідовності по ходу циркулюючої води (рис. 1.18) [86, 84, 68, 116, 117]:

- перший резервуар для вирощування ракоподібних, оскільки вони є найбільш вимогливими до чистоти води, що дає можливість більш повного використання об'єктів аквакультури, що культивуються та отримання додаткової товарної продукції у вигляді ракоподібних, які мають подібні з рибою вимоги до температурного режиму, але мають 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 із водою із резервуарів для вирощування риби, як основного об'єкта аквакультури та поглибленої агломерації органічної речовини під час вирощування двостулкових молюсків та її більш ефективною подальшою механічною фільтрації, оскільки одним з продуктів життєдіяльності двостулкових молюсків є фекальні пелети, що ефективно затримуються механічним фільтром.

Дана рециркуляційна система аквакультури також має пристрої для вида-

лення вуглекислого газу із 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 збродження надлишкової маси водоростей [115].

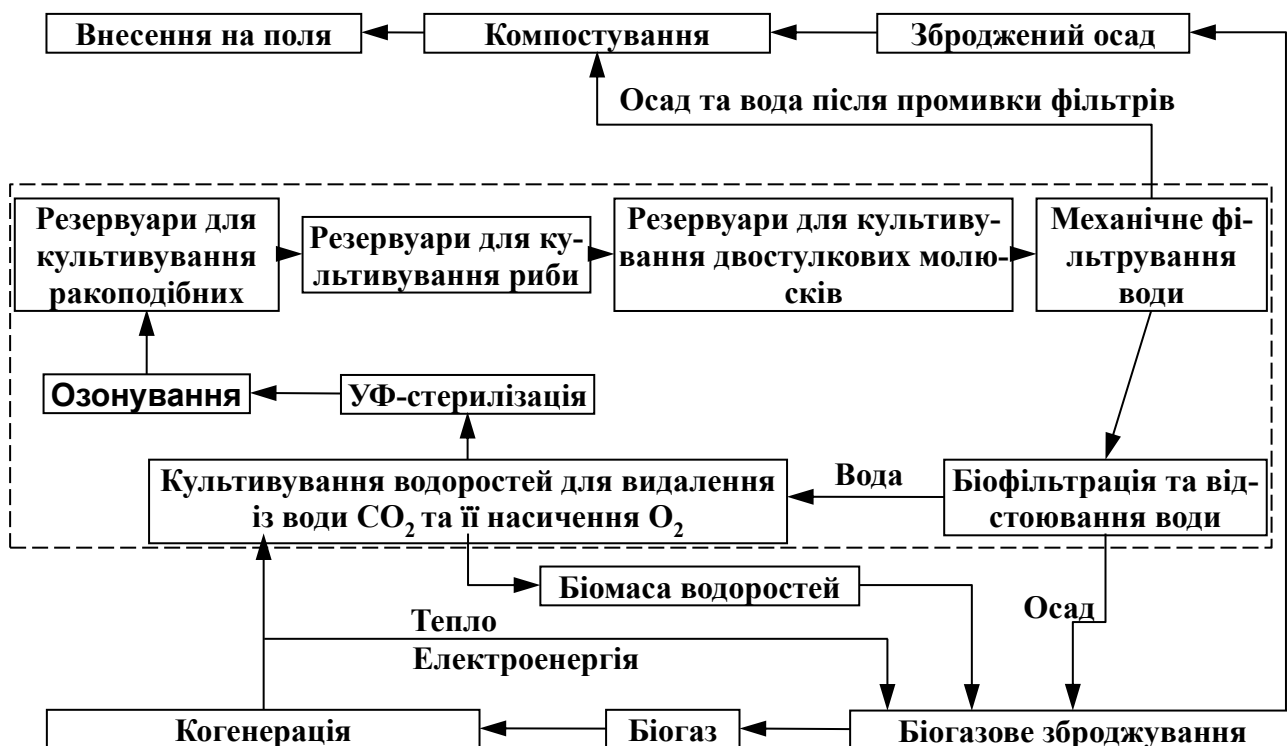


Рис. 1.18 – Блок-схема рециркуляційної системи аквакультури для вирощування ракоподібних, риби і двостулкових моллюсків із культивуванням водоростей для очистки води та виробництвом біогазу

Визначальне 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 [109].

Видалення твердих завислих частинок із води здійснюється седиментацією або механічною фільтрацією [7]. Дослідження за трьома системам РСА [8] показали, що більше 95% завислих твердих частинок мали діаметр менше 20 мкм, а тому концентрація твердих завислих частинок у воді має тенденцію до накопичення в системах рециркуляції. Слід уникати високих концентрацій зв'язаних твердих частинок, оскільки вони утворюють додаткове джерело аміаку,

який токсичний для риби. Крім того, вони можуть викликати пошкодження зябер, що призводить до стресу і підвищена сприйнятливості до хвороб. Видалення дрібних зважених твердих частинок доцільно здійснювати біологічним окисленням, коли поживні речовини, що вивільняються в системі РСА, можуть бути перетворені в рослинну або іншу біомасу, яка може легко видалятися і часто може бути цінним побічним продуктом. Цей "екологічний" підхід має значний інтерес і останнім часом призвів до збільшення дослідницьких зусиль [25, 36, 43, 31, 30, 29].

Із точки зору біологічної потреби в кисні, вихід органічних забруднень при виробництві 1 т риби еквівалентний кількості необробленої стічної води від 20 осіб [34]. Невикористані корми і екскременти є основними джерелами твердих речовин в РСА для аквакультури. Їх кількість може бути зменшено за рахунок ускладнення систем годування, при яких втрати кормів можуть становити до 1 % від загальної кількості [4].

Встановлено, що виробництво твердих речовин (не з'їдені корми і екскременти) в системах аквакультури варіюється від 11 до 38 % від використаного корму [23, 24, 6].

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 із розробкою відповідного наукового обґрунтування біотехнологічних процесів та технічних засобів для їх реалізації.

### **1.3 Огляд досліджень по розробці біогазових установок для переробки гною, посліду та осадів стічних вод**

Уведення в енергетичний баланс біологічних видів палива, які за своєю природою є поновлюваними ресурсами акумульованої сонячної енергії – одне з актуа-

льних завдань сьогодення. Це дає змогу зменшити використання викопних непоновлюваних джерел енергії, забруднення природного середовища токсичними речовинами та парниковими газами [99, 76, 61].

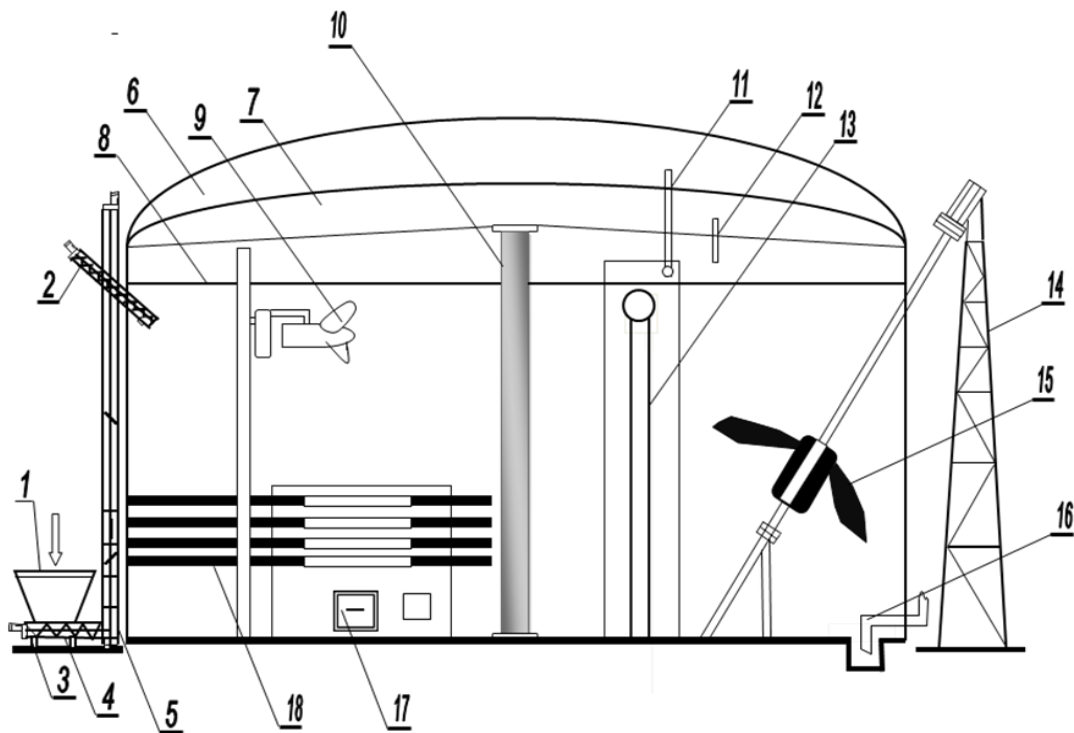
Перші біогазові установки являли собою ізотермічні місткості із гідравлічними затворами та пошаровим перемішуванням. Подальше удосконалення біогазових установок здійснювалося у напрямку забезпечення перемішування шарів біомаси під час зброджування, впровадження інокуляції біомаси перед зброджуванням та забезпечення очистки біогазу перед подальшим використанням [121].

Поширення використання біологічних видів палива зумовлює необхідність збалансування харчових, сировинних та енергетичних потреб з можливостями агроценозів при одночасному накопиченні гумусу та утриманні й розширенні біологічного різноманіття біоценозів. Для реалізації цієї концепції розроблено структурні схеми, які визначають місце і роль біогазових установок в агроекосистемах [75, 77, 18, 19]. Основою для їх створення стало те, що попереднє метанове зброджування гною та посліду дозволяє підвищити якість компосту отриманого на основі збродженої біомаси. Це відбувається за рахунок того, що під час метанового бродіння без доступу кисню, аміачний азот переходить в амонійну форму, що при подальшій аеробній ферментації забезпечує зменшення втрат азоту [102].

Досліджено процес аеробній ферментації різних видів органічної біомаси та їх сумішей в аграрному виробництві [100, 78].

Поширеним методом виробництва біогазу є анаеробне зброджування рідкої біомаси ( $W=90-95\%$ ) метаногенеруючими мікроорганізмами. Застосування рідкофазного зброджування є більш поширеним у практиці використання біогазових установок ніж твердофазного. Цей процес полягає у безперервному введенні невеликими порціями вхідної сировини в метантенк, який представляє собою місткість-змішувач без доступу повітря, де підтримується задана вологість і температура. Схема біореактора, яким в основному комплектують біогазові установки, представлена на (рис. 1.19). Такі реактори виконуються із залізобетону або сталі і мають антикорозійне покриття. Спеціальні мішалки забезпечують перемішування сиро-

вини з основною реагуючою біомасою. Це сприяє певній однорідності ферментаційної суміші, частково стримуючи утворення поверхневої кірки. Виділений в процесі ферментації біогаз накопичується під куполом, потім проходить систему очищення і подається до споживачів (котел або когенераційна установка) [90, 27, 73, 61].



1 – бункер для сипкого субстрату; 2 – подавальний гвинтовий транспортер; 3 – вагова платформа; 4 – гвинтовий нижній транспортер; 5 – піднімаючий гвинтовий транспортер; 6 – повітряний купол; 7 – біогазовий купол; 8 – рівень наповнення; 9 – вертикальна рухома мішалка; 10 – центральна опора; 11 – труба для подачі повітря; 12 – патрубок для біогазу; 13 – труба для подачі рідкого гною; 14 – опора для мішалки; 15 – похила мішалка; 16 – патрубок для відведення біомаси; 17 – система регулювання температури; 18 – система підігріву біомаси

Рис. 1.19 – Схема рідкофазної біогазової установки

В Україні був розроблений і експлуатувався комплект обладнання біогазової установки типу К-Р-9-1 [98], у склад якого входило два горизонтальні реактори по 125

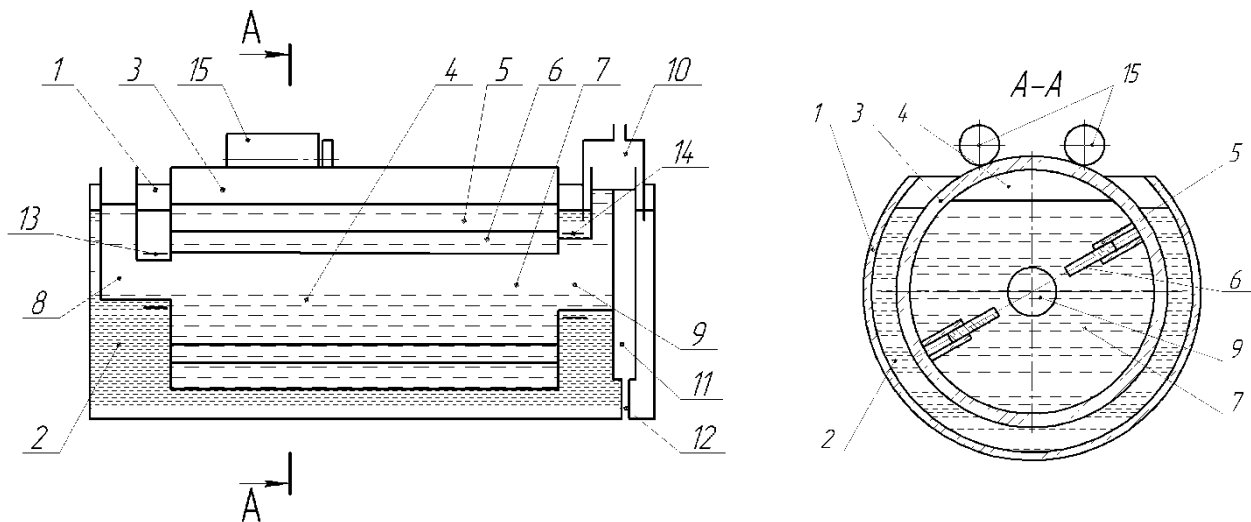
м<sup>3</sup>, але із-за високої вартості та металомісткості, а також ряду недоліків, пов'язаних із недосконалістю системи перемішування субстрату, він не знайшов застосування.

Експлуатація біогазових установок показала, що сприяння контакту анаеробних бактерій із біомасою субстрату забезпечується за рахунок перемішування субстрату, однак при цьому інтенсивного перемішування слід уникати, оскільки це може призвести до погіршення процесу анаеробного зброджування за рахунок порушення симбіозу ацетогенних та метаногенних бактерій. На практиці компроміс досягається за рахунок повільного обертання мішалок або їх роботи упродовж короткого часу [122]. У той же час, досвід експлуатації реакторів біогазових установок показав, що практично неможливо усунути розшарування біомаси в реакторі на мінеральний осад та органічну плаваючу біомасу, що вказує на недоліки в роботі систем перемішування [122, 127].

Для потреб аграрного виробництва розроблено ряд біогазових установок, які забезпечують виробництво біогазу та органічних добрив із рідкого гною та посліду [54, 55, 56, 57, 44, 45, 47, 46, 48, 49, 51, 50, 52, 53, 61]. Головним недоліком цих установок є відсутність перемішування, утворених під час бродіння верхнього, середнього та нижнього шарів із різною щільністю та фізико-механічним складом, що призводить до накопичення в реакторі продуктів метаболізму та припинення газоутворення, а також до необхідності періодичної зупинки та спорожнення біогазової установки. Дані пристрої, у більшості, не забезпечують послідовного переміщення біомаси по мірі бродіння, не виключає можливості виходу з метантенка свіжої біомаси, що поступає на бродіння.

Розроблено також ряд конструкцій метантенків, які мають циліндричний горизонтальний корпус із лопатками для перемішування біомаси та горловиною для завантаження й вивантаження органічної маси, а також патрубком для відводу біогазу, причому сам корпус встановлений у водяному басейні з можливістю обертання навколо своєї геометричної осі [101]. Цей метантенк має можливість зброджувати органічну масу, яка в нього завантажується, з добавкою анаеробного інокулянту, до заданого рівня, після чого зброджену масу повністю видаляють із метантенка, таким чином забезпечується його робота в періодичному режимі. Безперервність отримання

біогазу забезпечується роботою кількох метантенків, що послідовно завантажуються та в один і той же момент часу мають різний рівень розкладу органічної маси. Для удосконалення даної конструкції та забезпечення порціонно-послідовного проходження твердофазної біомаси, розроблено декілька конструкцій обертових метантенків [110, 111, 112, 113, 103, 105, 82, 74]. У цих рішеннях усувається налипання органічної маси на внутрішню поверхню циліндричного твердофазного пристрою, спінювання й попадання біомаси в патрубки для відводу біогазу, забезпечується зменшення енергомосткості процесу зброджування та підвищення якості біогазу при зброджуванні органічної маси із різним фракційним складом. Один із прикладів конструкції обертового метантенка приведений на рис. 1.20.



1 – горизонтальний зовнішній корпус; 2 – рідина; 3 – циліндричний реактор; 4 – камера зброджування; 5 – перегородка; 6 – рухома пластина; 7 – біомаса; 8 – патрубок для підводу біомаси; 9 – патрубок для відводу біомаси; 10 – патрубок для відводу біогазу; 11 – вивантажувальна камера; 12 – патрубок для вивантаження біомаси; 13, 14 – підшипникові вузли; 15 – зовнішній привод

Рис. 1.20 – Конструкція обертового метантенка

Підготовлена до зброджування біомаса відповідної вологості та температури, подається через патрубок для підводу 8 у камеру зброджування 4 циліндричного реактора 3. Біомаса 7 під час зброджування проходить камеру зброджування 4, а потім через патрубок для відводу 9 надходить у вивантажувальну камеру 11. Під

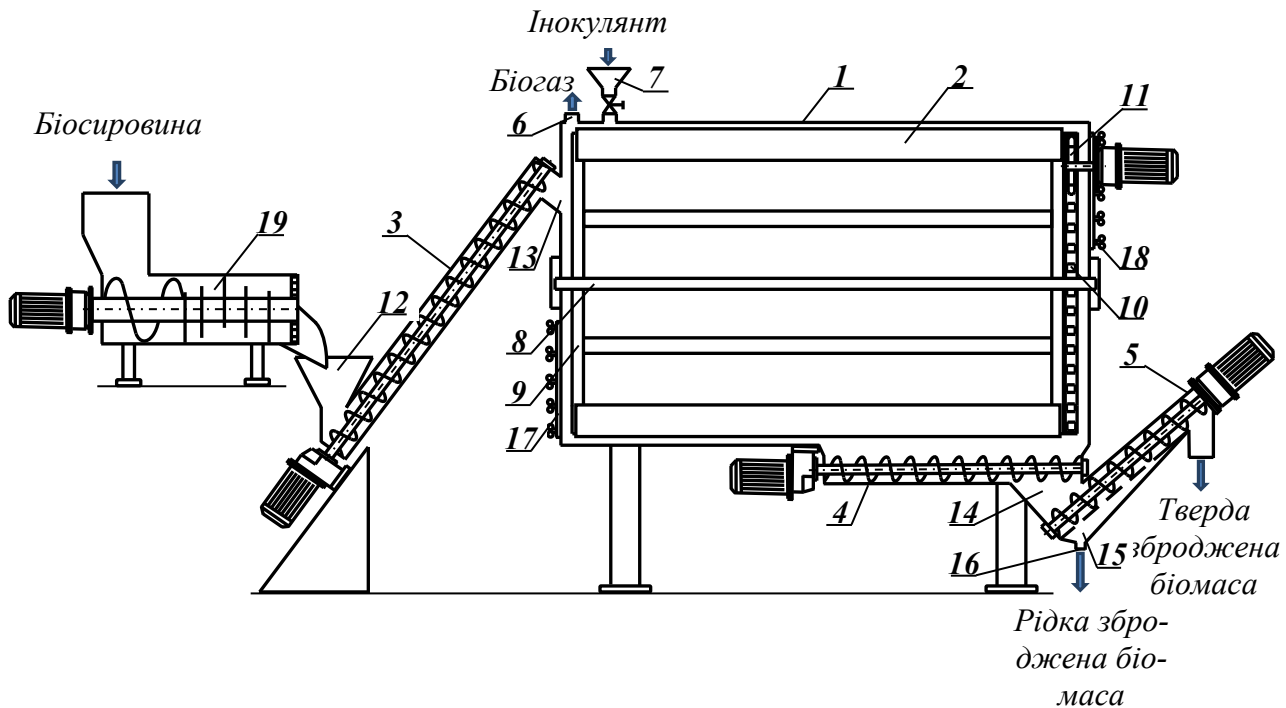
дією анаеробних мікроорганізмів без доступу повітря проходить біохімічне збро-джування органічної біомаси з виділенням біогазу, який через патрубок для відводу 10 направляється в газгольдер, де накопичується для подальшого спалювання та використання, як пального для двигуна внутрішнього згорання. Органічна маса після зброджування порціями видаляється із вивантажувальної камери 11 через пат-рубок 12 для вивантаження органічної маси. У період проходження анаеробного зброджування циліндричний реактор 3 за допомогою зовнішнього приводу 15, обе-ртається навколо своєї геометричної осі, забезпечуючи недопущення розшару-вання органічної маси на фракції за рахунок взаємодії біомаси з перегородкою 5 та внаслідок дії гравітаційної сили.

Набувають поширення також біогазові установки для виробництва біогазу та органічних добрив із пастоподібних субстратів або поєднують зброджування твер-дих та рідких органічних відходів [119, 118]. Такі біогазові установки не набули поширення із-за недосконалості пристроїв для перемішування біомаси, оскільки не усувають утворення в нижній частині камери зброджування осаду, який призво-дить до необхідності зупинення реактора та його очищення.

Для забезпечення перемішування запропоновано біогазовий реактор для твердофазної ферментації (рис. 1.21), що містить горизонтальний циліндричний корпус, лопатки для перемішування біомаси у вигляді рухомих пластин із можли-вістю радіального переміщення, гвинтові транспортери для завантаження біомаси та її вивантаження з можливістю розділення на тверду й рідку фракції та патрубок для відводу біогазу [108].

Подрібнена біомаса потрапляє до бункера 12 і за допомогою гвинтового тра-нспортера 3 потрапляє в реактор. Перемішування біомаси здійснюється за рахунок руху лопаток 2, які приводяться в дію від електроприводу. Одночасно з наповнен-ням реактора біомасою через пристрій для інокуляції біомаси 7 подається іноку-лянт. Біомаса після зброджування вивантажується з реактора гвинтовими транспо-ртерами 4 та 5. Рідка фракція видаляється в камеру збору рідкої збродженої фракції 15 і використовується в якості інокулянту.

Складність систем перемішування біомаси в біогазових реакторах спонукає науковців до створення гідро гравітаційних реакторів [104, 106]. Їх конструкція має окремі камери зброджування з'єднані між собою переливними трубами із перепускними кранами, причому біомаса може перекачуватися насосом або переміщатися за рахунок тиску біогазу та за рахунок гравітаційної сили.



1 – горизонтальний зовнішній корпус; 2 – лопатки для перемішування біомаси; 3 – гвинтовий транспортер для завантаження біомаси; 4, 5 – гвинтові транспортери для вивантаження збродженої біомаси; 6 – патрубок для відводу біогазу; 7 – пристрій для інокуляції біомаси; 8 – вал; 9 – обертовий механізм; 10 – кільцевий ланцюг; 11 – привідна зірочка; 12 – бункер для біомаси; 13 – патрубок для підводу біомаси; 14 – перевантажувальна камера; 15 – камера для збору рідкої збродженої фракції; 16 – патрубок для вивантаження рідкої біомаси; 17, 18 – люки; 19 – подрібнювач біомаси

Рис. 1.21 – Біогазовий реактор для твердофазної біогазової ферментації

Перспективи використання має метантенк, що містить вертикальний корпус, патрубки для завантаження й вивантаження органічної маси та для відводу біогазу,

а також перегородки встановлені в корпусі метантенка, які розділяють корпус у вертикальній площині на верхню та нижні внутрішню та зовнішню камери, з можливістю перетікання біомаси між верхньою та нижньою внутрішніми камерами, а також між нижніми внутрішньою та зовнішньою камерами [107].

Таким чином, технічні засоби виробництва біогазу повинні удосконалюватися в напрямку усунення явища розшарування органічної біомаси на плаваючу органічну складову та мінеральний осад, або використовувати це явище для підвищення ефективності біогазового зброджування.

#### 1.4 Огляд теоретичних та експериментальних досліджень біогазових установок для переробки гною, посліду та осадів стічних вод

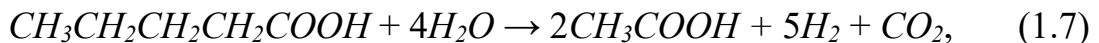
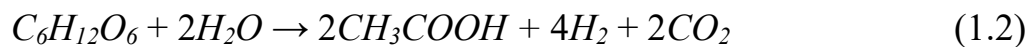
Потенціал виробництва біогазу при використанні рослинної біомаси та використанні гною та посліду запропоновано визначати за наступною залежністю [95, 127]:

$$B = B_P + B_T = k_{БГР} k_{BP} \sum_{i=1}^n S_i 100 Y_i (k_{Bi} - k_{zi}) + k_{БГТ} k_{BT} \sum_{j=1}^m N_j T_j (m_{Ej} + m_{Bj}) k_{Гj}, \quad (1.1)$$

де  $B$  – потенціал виробництва біогазу при зброджуванні рослинної біомаси та гноївки, м<sup>3</sup>;  $B_P$  – вихід біогазу при зброджуванні рослинної біомаси, м<sup>3</sup>;  $B_T$  – вихід біогазу при зброджуванні гноївки, м<sup>3</sup>;  $k_{БГР}$ ,  $k_{БГТ}$  – питомий вихід біогазу при анаеробному зброджуванні відповідно рослинної біомаси та гноївки, м<sup>3</sup>/кг;  $k_{BP}$ ,  $k_{BT}$  – коефіцієнт використання відповідно рослинної біомаси та гноївки в біогазових установках, відносних од.;  $n$  – кількість культур в сівозміні, які використовуються для виробництва рослинної біомаси;  $S_i$  – площа вирощування  $i$ -ї культури, га;  $Y_i$  – урожайність  $i$ -ї культури, ц/га;  $k_{Bi}$  – коефіцієнт виходу біомаси  $i$ -ї культури, відносних од.;  $k_{zi}$  – коефіцієнт втрат біомаси  $i$ -ї культури під час збирання, відносних од.;  $m$  – кількість груп тварин та птиці;  $N_j$  – поголів'я тварин та птиці  $j$ -го виду, гол.;  $T_j$  – стійловий період поголів'я тварин та птиці  $j$ -го виду, діб;  $m_{Ej}$  – маса екскрементів

$j$ -го виду тварин та птиці, кг/гол. за добу;  $m_{Bj}$  – маса води, що надходить в екскременти  $j$ -го виду тварин та птиці, кг/гол. за добу  $k_{Tj}$  – коефіцієнт виходу гноївки придатної для рідкофазного зброджування, відносних од.

Відомо [60, 130], що на першій стадії анаеробного зброджування під дією бактерій відбувається гідроліз субстрату з утворенням органічних кислот, спиртів, простих вуглеводів. На другій стадії утворюється оцтова кислота, водень та вуглекислий газ. Ці стадії анаеробного зброджування можуть бути узагальнені наступними рівняннями:



де  $C_6H_{12}O_6$  – глюкоза;  $CH_3CH_2OH$  – етанол;  $CH_3CH(OH)COOH$  – лактат;  $CH_3CH_2CH_2COOH$  – масляна кислота;  $CH_3CH_2COOH$  – пропіонова кислота;  $CH_3CH_2CH_2CH_2COOH$  – валеріанова кислота;  $H_2O$  – вода;  $CH_3COOH$  – оцтова кислота;  $H_2$  – водень;  $CO_2$  – вуглекислий газ.

У подальшому, метаногенез відбувається за рахунок діяльності мікроорганізмів, які відновлюють вуглекислий газ до метану, а також таких, що розкладають в кінцевому підсумку оцтову кислоту на метан і вуглекислий газ [60]. Рівняння біохімічних реакцій стадії метаногенезу анаеробної ферментації мають наступний вигляд:



де  $CH_4$  – метан.

Розрахунок матеріального балансу показав [81], що при анаеробній ферментації від 60 до 80 % метану утворюється за рахунок розщеплення оцтової кислоти та від 20 до 40 % за рахунок використання водню для відновлення вуглекислого газу до метану, що підтверджує дані наведені в роботі [60].

Прийнявши допущення про те, що кількість утвореного біогазу визначається інтенсивністю розкладу органічної речовини під час зброджування органічної біомаси [81, 12, 28, 19], було визначено вихід біогазу при зброджуванні у перерахунку на нормальні умови, який може бути визначений наступним чином:

$$V_{BG} = \rho_{BM} \left( 1 - \frac{W_{BM}}{100} \right) k_{OM} k_{OM}^P \frac{m_{BG}}{\rho_{BG}^H}, \quad (1.10)$$

де  $V_{BG}$  – питомий вихід біогазу із реактора за нормальних умов,  $\text{м}^3_{BG} / \text{м}^3_{BM}$  за добу;  $\rho_{BM}$  – густина біомаси,  $\text{кг}_{BM} / \text{м}^3_{BM}$ ;  $W_{BM}$  – вологість біомаси, %;  $\left( 1 - \frac{W_{BM}}{100} \right)$  – вміст сухої речовини по відношенню до загальної кількості біомаси,  $\text{кг}_{CM} / \text{кг}_{BM}$ ;  $k_{OM}$  – вміст органічної маси по відношенню до загальної кількості сухої маси у біомасі, що зброджується,  $\text{кг}_{OM} / \text{кг}_{CM}$ ;  $k_{OM}^P$  – кількість розкладеної за добу органічної маси по відношенню до загальної кількості органічної маси,  $\text{кг}_{ROM} / \text{кг}_{OM}$  за добу;  $m_{BG}$  – вихід біогазу в розрахунку на одиницю розкладеної органічної маси,  $\text{кг}_{BG} / \text{кг}_{ROM}$ ;  $\rho_{BG}^H$  – щільність біогазу за нормальних умов,  $\text{кг}_{BG} / \text{м}^3_{BG}$ , при цьому питомий вихід метану становитиме:

$$V_{CH_4} = V_{BG} k_{CH_4}, \quad (1.11)$$

де  $V_{CH_4}$  – питомий вихід метану із реактора за нормальних умов,  $M_{CH_4}^3 / M_{БМ}^3$  за добу;  $k_{CH_4}$  – об'ємний вміст метану в біогазі,  $M_{CH_4}^3 / M_{БГ}^3$ .

Враховуючи, що густина рідини в яку занурений обертовий метантенк приблизно дорівнює густині органічної сировини в обертовому метантенку, а також те, що густина біогазу в обертовому метантенку приблизно на три порядки менша густини рідини в яку занурений обертовий метантенк циліндричної форми, встановлено [80, 127] об'ємний і габаритний рівень занурення обертового метантенка в рідину та коефіцієнт заповнення обертового метантенка органічною біомасою для випадку, коли обертовий метантенк повністю занурений в рідину:

$$\varepsilon_V = \frac{\rho_M V_M}{\rho_P V_{OM}} + \gamma = \frac{\rho_M \delta}{\rho_P D} \left( 2 \frac{D}{L_{OM}} + 4 \right) + \gamma; \quad (1.12)$$

$$\varepsilon_T = 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \frac{2h}{D} + \frac{4h}{\pi D^2} \sqrt{\frac{D^2}{4} - h^2}; \quad (1.13)$$

$$\gamma = 1 - \frac{\rho_M \delta}{\rho_P D} \left( 2 \frac{D}{L_{OM}} + 4 \right), \quad (1.14)$$

де  $\varepsilon_V = \frac{V_3}{V_{OM}}$  – об'ємний рівень занурення обертового метантенка в рідину, відносних од.;  $\varepsilon_T$  – рівень занурення торцевої поверхні обертового метантенка в рідину, відносних од.;  $V_3$  – об'єм зануреного в рідину обертового метантенка,  $m^3$ ;  $V_{OM}$  – повний об'єм обертового метантенка,  $m^3$ ;  $\rho_M$  – щільність метала,  $kg/m^3$ ;  $V_M$  – об'єм метала використаного для виготовлення обертового метантенка,  $m^3$ . Де  $\rho_P$  – густина рідини в яку занурений обертовий метантенк,  $kg/m^3$ ;  $\gamma$  – коефіцієнт заповнення обертового метантенка органічною біомасою, відносних од.;  $\delta$  – товщина метала із якого виготовлено циліндричний обертовий метантенк, м;  $D$  – діаметр циліндричного обертового метантенка, м;  $L_{OM}$  – довжина циліндричного обертового

метантенка, м;  $h$  – відстань від центра циліндричного обертового метантенка до рівня рідини в яку він занурений, м.

Експериментально визначено [83, 127] середнє значення споживаної потужності необхідної для приводу обертового реактора в залежності від його коефіцієнта занурення, яка приведена на рис. 1.22.

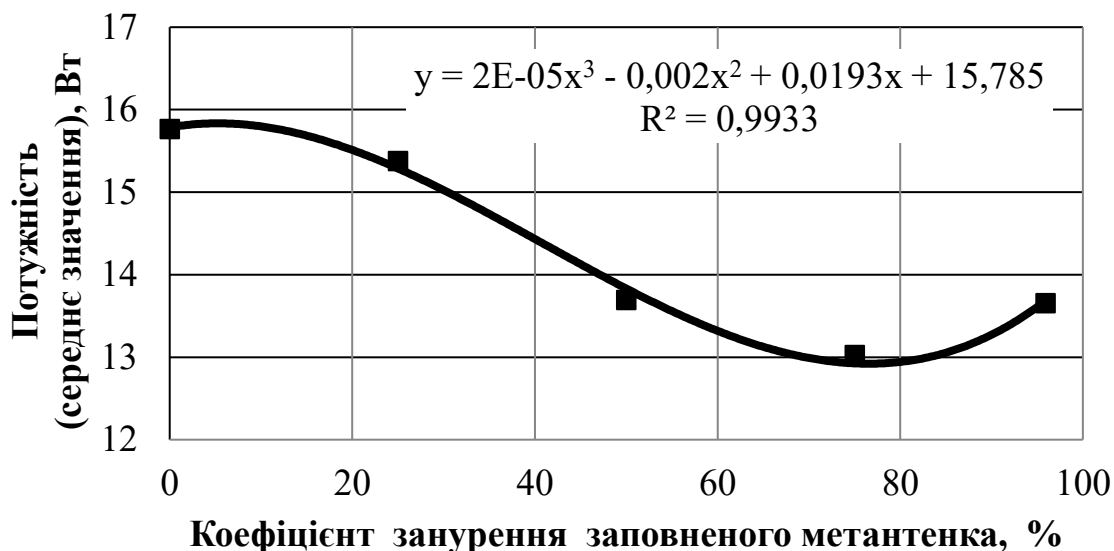


Рис. 1.22 – Вплив коефіцієнта занурення заповненого обертового метантенка на потужність приводного механізму

Аналіз показав, що при збільшенні коефіцієнта занурення обертового реактора в рідину, середнє значення споживаної потужності зменшується до досягнення мінімального значення, що обумовлено зменшенням витрат на опір у підшипникових вузлах. При подальшому збільшенні коефіцієнта занурення обертового реактора середнє значення споживаної потужності дещо збільшується за рахунок збільшення зворотного тиску на підшипникові вузли та в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурений реактор.

У результаті експериментальних досліджень твердофазного зброджування гною [73, 127], отримано рівняння регресії, які встановлює залежність питомого виходу біогазу від температури, експозиції зброджування і вологості гною, яке має

наступний вигляд:

$$V = 94,2 - 2,235W - 0,6389T - 0,4358\tau + 0,0146W^2 + 0,0047T^2 + 0,0042\tau^2 + 0,0032WT + 0,0045W\tau - 0,0002T\tau \quad (1.15)$$

де:  $V$  – питомий вихід біогазу, л/кг сухої маси за добу;  $W$  – вологість біомаси, %;  $T$  – температура зброджування,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  – експозиція зброджування, діб.

Графічна інтерпретація рівняння (1.6) приведена на рис. 1.23. Було встановлено, що питомий вихід біогазу збільшується при збільшенні вологості гною та температури і експозиції зброджування. Так при експозиції ферментації гною 15 діб та при вологості твердофазної маси гною  $W=77\%$  і температурі зброджування  $T=35^{\circ}\text{C}$  питомий вихід біогазу не перевищував 1 л/кг сухої маси за добу, а при вологості твердофазної маси  $W=87\%$  та температурі зброджування  $T=53^{\circ}\text{C}$  питомий вихід біогазу знаходився в межах 4-5 л/кг сухої маси за добу.

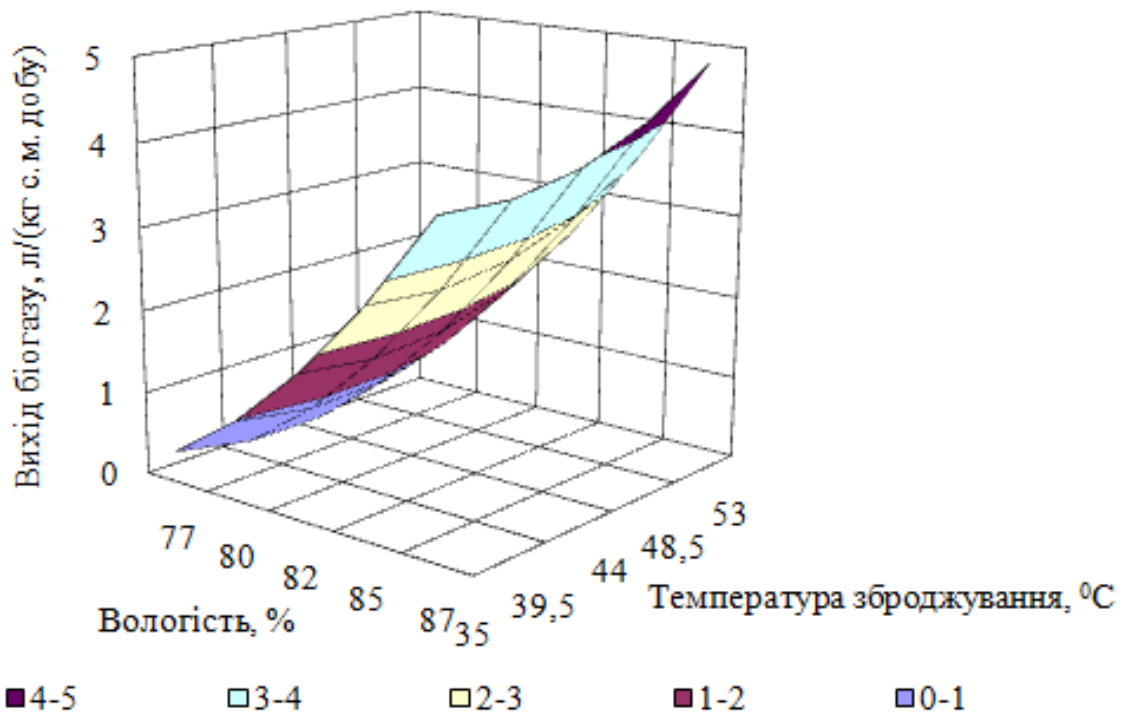


Рис. 1.23 – Залежність виходу біогазу від температури зброджування і вологості біомаси

Таким чином, у питанні розвитку технологій твердофазного зброджування необхідно приділяти увагу удосконаленню мікробіологічних процесів ферментації біомаси та пошуку ефективних конструкційно-технологічних рішень ферментерів, особливо це стосується технологічних операцій завантаження біомаси, її безперервного перемішування та дотримання стабільного температурного режиму роботи ферментера.

Вважаючи, що швидкість розкладу органічної речовини під час біогазової ферментації пропорційна кількості нерозкладеної органічної речовини [129], що ще може бути розкладена, а також, що максимальний рівень розкладу органічної силовини біомаси при довгостроковій експозиції під час анаеробної ферментації становить для біомаси зеленої маси трав – 45 %, а для кукурудзяного силосу – 59 % [3, 2], отримано кінетичні рівняння анаеробної ферментації рослинної органічної біомаси, які мають наступний вигляд [79]:

– для зеленої маси трав

$$\alpha = 0,45 [1 - \exp(-0,095\tau)]; \quad (1.16)$$

– для кукурудзяного силосу

$$\alpha = 0,59 [1 - \exp(-0,119\tau)]. \quad (1.17)$$

де  $\alpha$  – рівень розкладу органічної речовини біомаси в процесі анаеробної ферментації, відносних од.;  $\tau$  – час біогазової ферментації, діб.

У графічному вигляді кінетичні рівняння (16, 17) приведені на рис. 1.24.

На основі використання принципів руху матеріальних частинок по шорстких поверхнях [65, 97, 131, 70, 71, 72, 69], отримано рішення неоднорідного диференційного рівняння, яке визначає положення і швидкість руху частинок біомаси по лопатках обертового барабана при зброджуванні біомаси в наступному вигляді [88, 87, 94]:

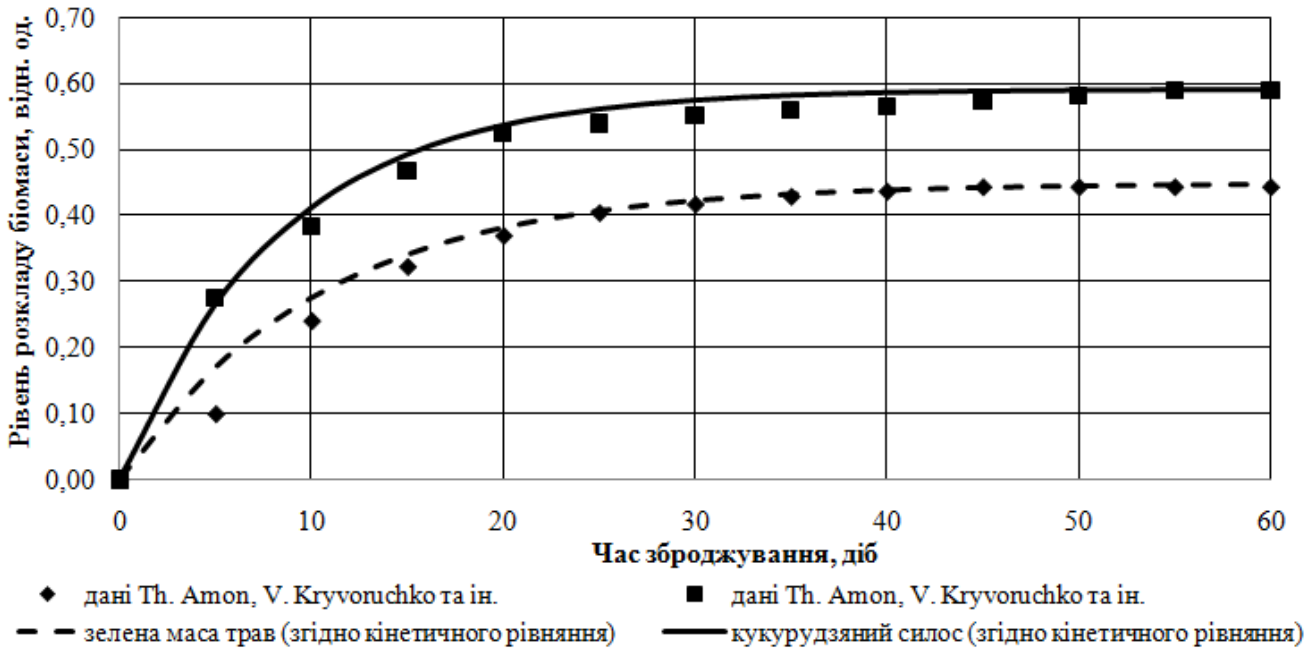


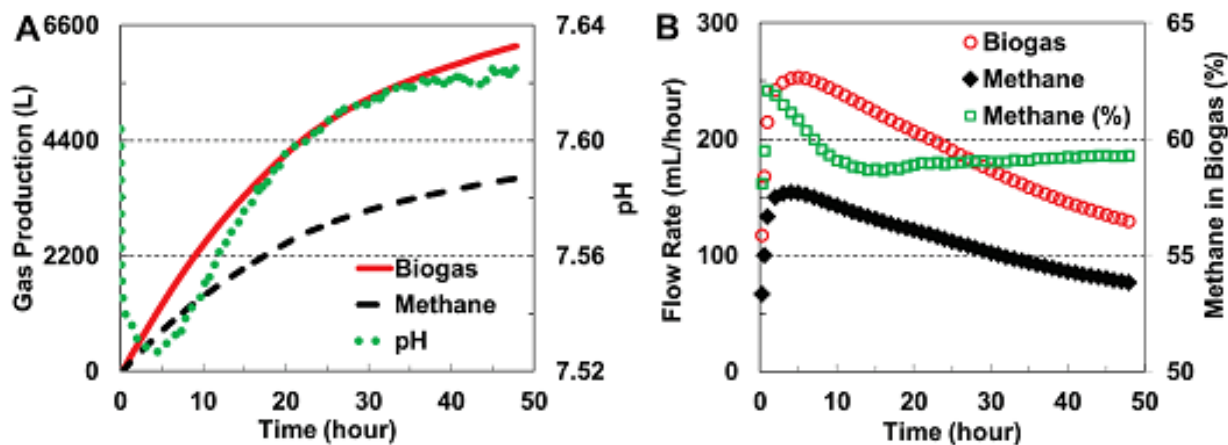
Рис. 1.24 – Кінетика процесу біогазової ферментації органічної сировини

$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g}{\sqrt{4w^2 + k_1^2}} \cos \left( B + \arctg \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} + wt \right), \quad (1.19)$$

де  $r$  – поточний радіус положення частинки на лопатці, м;  $v_R$  – відносна швидкість руху частинки по лопатці, м/с;  $C_1, C_2$  – постійні величини диференційного рівняння, м;  $\lambda_1, \lambda_2$  – корені характеристичного рівняння,  $\text{с}^{-1}$ ;  $w$  – кутова швидкість обертання барабана, рад/с;  $g$  – прискорення земного тяжіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $f$  – коефіцієнт тертя частинки по матеріалу лопатки, відносних од.;  $B$  – початковий кут повороту лопатки барабана, рад.;  $t$  – час повороту барабана, с;  $k_1$  – коефіцієнт пропорційності при ламінарному обтіканні частинки повітрям,  $\text{с}^{-1}$ .

Досліджено процес анаеробного зброджування солоного осаду, що утворюється в морських рециркуляційних системах аквакультури та з використанням інокулянту, виготовленого із анаеробного зброженого відвару морської риби [42]. Біогазовий реактор підживлювався солоним осадом в 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  $\text{CH}_4$  із одного грама органічної маси (рис. 1.25).



А – сукупний біогаз, виробництво метану та зміна рН осаду; В – швидкість потоку біогазу та вміст метану в біогазі

Рис. 1.25 – Показники процесу збродження солоного осаду аквакультури

Аналогічні дослідження анаеробного збродження осаду морських РСА із солоністю 14 г/л та вмісті органічних речовин від 45,2 до 70,9 % в реакторі із безперервним перемішуванням упродовж від 32 до 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 літер доданого осаду). Вихід метану становив від 0,797 до 1,772 л на одну літру 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 % [32].

Аналіз енергетичного балансу для концептуальної моделі аквапоніки, яка поєднує вирощування риби в РСА із вирощуванням томатів [41] показав, що різниця між потенційною енергією, яка може бути вироблена шляхом анаеробного збродження органічної маси в цій системі та потребою цієї системи в енергії буде мати позитивне значення при річному виробництві риби біля 3,4 т і біля 35 т помі-

дорів. Така система потребує близько  $15 \text{ м}^3$  танків для риби і  $0,5 \text{ га}$  землі для вирощування томатів. Проте площа, необхідна для такого виробництва, добре потрапляє в межі дрібної ферми з площею від  $1$  до  $2 \text{ га}$  [37].

Встановлено також, що найбільш перспективними очисними агентами, здатними трансформувати амонійний нітроген у доступну риbam білкову масу, є ряски – представники родини *Agaceae* Juss підродино *Lemnoideae*. Інтерес до ряскових як очисних агентів забрудненої води в РСА обумовлюється інтенсивністю видалення біогенних елементів і можливістю ефективної утилізації приросту біомаси рослин в якості корму для риb [22]. Ряскові можуть також використовуватися в якості сировини для виробництва біопалива [15]. Очисна потужність фітореактора з рясковими за нітрогеном при обробці циркуляційної води РСА становить від  $9,6$  до  $14,4 \text{ г N}/(\text{м}^2 \text{ добу})$  залежно від питомої маси рослин на одиниці площі. Дані показники забезпечуються при організації тривалості світлового періоду в межах від  $12$  до  $16$  годин на добу та при інтенсивності освітлення від  $6500$  до  $6650 \text{ Лк}$  [33].

Наразі виконаний значний обсяг досліджень щодо розробки біотехнологічних процесів та технічних засобів для реалізації процесу біогазового зброджування біомаси. Отримано кінетичні рівняння анаеробної ферментації органічної біомаси для умов порційного зброджування. Досліджено процес анаеробного зброджування осаду, що утворюється в морських рециркуляційних системах аквакультури та в установках аквапоніки. Однак, виробництво біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби потребує подальшого удосконалення в напрямку обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби з метою підвищення рівня їх енергетичної автономності.

## 1.5 Мета і задачі досліджень

На основі проведеного огляду наукових досліджень сформульовано мету, об'єкти та предмет досліджень.

**Мета досліджень** – підвищити вихід метану в біотехнологічному процесі

анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби шляхом обґрунтування показників ущільнення осаду та процесу анаеробного зброджування.

**Об'єкти дослідження** – біотехнологічний процес анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

**Предмет дослідження** – обґрунтування показників ущільнення та виходу метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

Задачі досліджень:

- провести аналіз технологічних операцій та технічних засобів очистки стічних вод систем штучного вирощування риби та виробництва біогазу із осаду стічних вод;
- обґрунтувати вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування біомаси в метантенках із періодичним завантаженням;
- розробити експериментальний зразок відстійника та обґрунтувати показники ущільнення осаду стічних вод систем штучного вирощування риби;
- обґрунтувати вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби;
- виконати техніко-економічну оцінку ущільнення та анаеробного зброджування осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БІОГАЗОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ОСАДУ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ АКВАКУЛЬТУРИ

### 2.1 Аналіз основних факторів, що впливають на анаеробну ферментацію

Основною характеристикою процесу виробництва біогазу є питомий вихід біогазу або метану у перерахунку на нормальні умови за добу та у розрахунку на один кубічний метр біомаси в біогазовому реакторі. Як видно із формули (1.10) ця величина залежить від щільності і вологості біомаси, вмісту органічної маси у біомасі, а також щільності біогазу за нормальних умов. Але визначальними показниками інтенсивності процесу анаеробної ферментації є інтенсивність розкладу органічної біомаси за добу та вихід біогазу або метану в розрахунку на одиницю розкладеної органічної маси [127].

Масовий вихід біогазу в розрахунку на одиницю розкладеної органічної маси становить близько 1, а метану – від 0,27 до 0,51 кг у залежності від виду біомаси. Слід зазначити, що легкорозчинні вуглеводневі сполуки під час розкладу продукують мінімальну кількість метану, а біомаса, яка містить жирові сполуки – максимальну.

Апроксимація фактичних даних досліджень, які стосувалися зброджування гною [58] показали, що інтенсивність розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації зі значним рівнем адекватності описується експоненціальними залежностями (рис. 2.1).

У даному випадку нами застосовані експоненційні залежності, які мають наступний вигляд:

$$\alpha = \frac{M_0 - M^*}{M_0} [1 - \exp(-k\tau)] = \alpha_0 [1 - \exp(-k\tau)] \quad (2.1)$$

де  $\alpha$  – рівень розкладу органічної речовини на поточний момент часу, відносних од.;  $M_0$  – загальний уміст органічної речовини біомаси на початок анаеробної ферментації, кг;  $M^*$  – уміст органічної речовини біомаси, яка не розкладається під час анаеробної ферментації, кг;  $k$  – коефіцієнт швидкості процесу біогазової ферментації, діб<sup>-1</sup>;  $\tau$  – час біогазової ферментації, діб;  $\alpha_0 = \frac{M_0 - M^*}{M_0}$  – максимальний рівень розкладу органічної речовини в процесі анаеробної ферментації, відносних од.

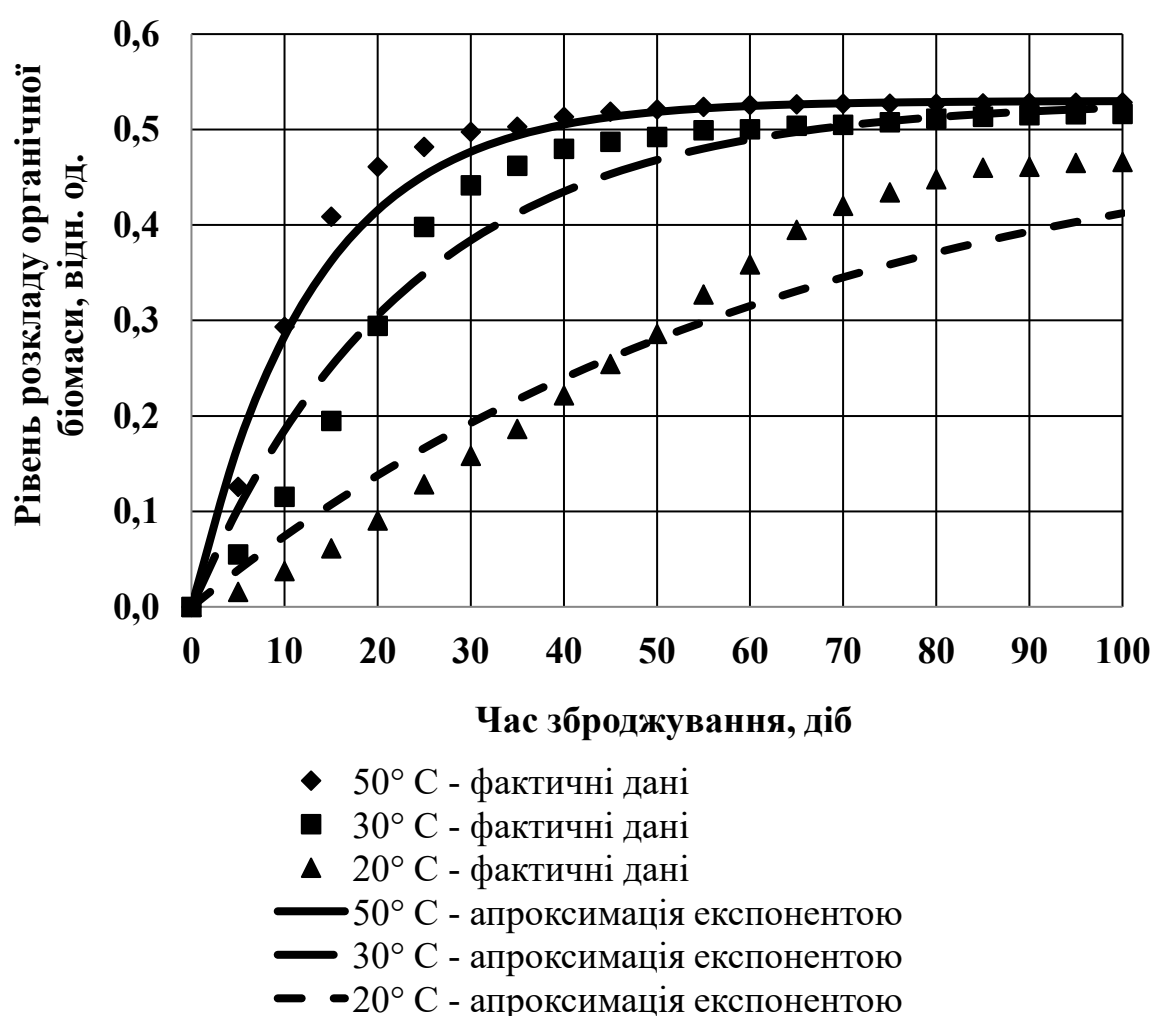


Рис. 2.1 – Порівняння фактичних даних досліджень, які стосувалися анаеробної ферментації гною та їх апроксимації експонентціальними залежностями

На основі експериментальних даних [58] нами отримано також залежність коефіцієнта швидкості процесу біогазової ферментації від температури анаеробного

зброджування (рис. 2.2) та встановлено значення максимального рівня розкладу органічної речовини, яке становить  $\alpha_0 = 0,53$  відн. од.

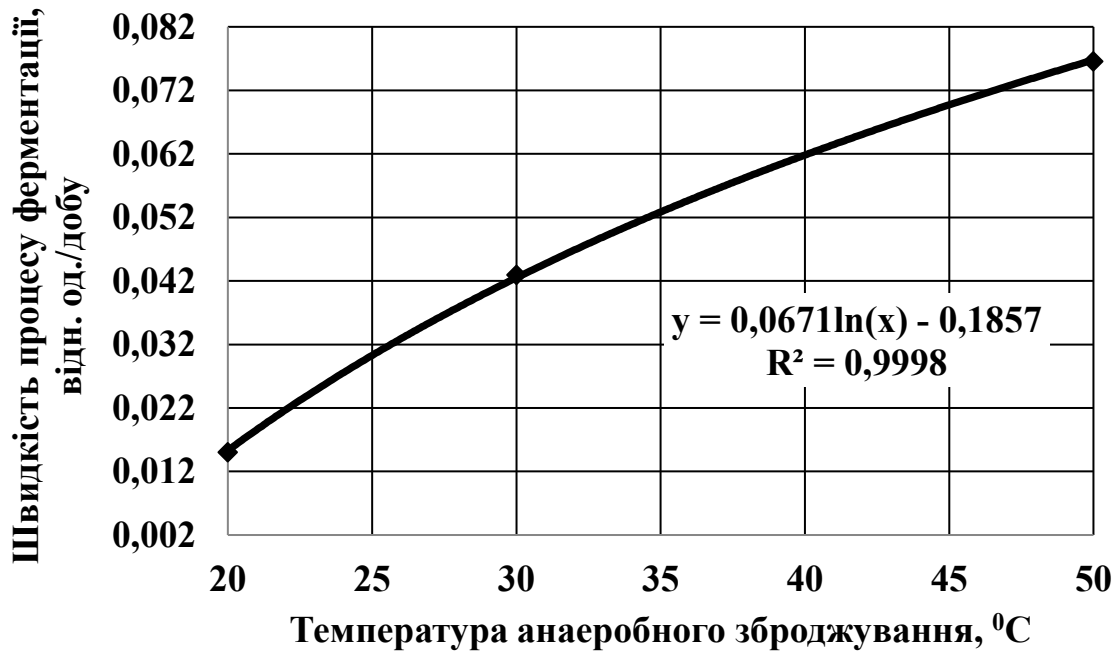


Рис. 2.2 – Взаємозв'язок швидкості процесу біогазової ферментації, який характеризує її швидкість від температури анаеробного зброджування

Аналогічними експоненціальними залежностями апроксимуються фактичні дані досліджень [3], які стосувалися зброджування зеленої маси трав та силосу (рис. 1.24). Встановлено значення швидкості процесу біогазової ферментації зеленої маси трав, який становив 0,095 відн. од. та 0,119 для процесу біогазової ферментації силосу. Значення максимального рівня розкладу органічної речовини для зеленої маси трав становило  $\alpha_0 = 0,45$  відн. од., а для силосу –  $\alpha_0 = 0,59$  відн. од.

Таким чином, у багатьох випадках анаеробного зброджування різної органічної біомаси рівень розкладу органічної біомаси в часі може бути апроксимований експоненціальними залежностями. Ці залежності включають значення коефіцієнта швидкості процесу біогазової ферментації та значення максимального рівня розкладу органічної речовини, які визначаються експериментально.

Експоненціальні залежності для визначення рівня розкладу органічної біомаси в часі можуть бути використані для подальшого визначення інтегрального значення рівня розкладу органічної біомаси та питомого виходу біогазу або метану у перерахунку на нормальні умови за добу та у розрахунку на один кубічний метр біомаси в біогазовому реакторі.

## **2.2 Дослідження інтегрального значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації та роботі біогазового реактора в режимі періодичного завантаження**

У сучасній практиці біогазових технологій найбільшого поширення набули реактори періодичного завантаження. Конструкція реакторів для виробництва біогазу безперервної дії характерна тим, що порції біомаси подаються в реактор і видаляються із нього щоденно.

Очевидно, що кількість завантажених порції біомаси у біогазовому реакторі становитиме:

$$n = \frac{\tau_{ЗБ}}{\tau_3}, \quad (2.2)$$

де  $n$  – кількість завантажених порції біомаси у біогазовому реакторі, од.;  $\tau_{ЗБ}$  – час зброджування (загальний час перебування біомаси в реакторі), діб;  $\tau_3$  – періодичність завантаження біогазового реактора, діб.

Очевидно, що час зброджування може бути визначений за наступним співвідношенням:

$$\tau_{ЗБ} = \frac{V_P}{V_{ДЗ}}, \quad (2.3)$$

де  $V_P$  – робочий об'єм біогазового реактора, м<sup>3</sup>;  $V_{ДЗ}$  – об'єм добового завантаження біогазового реактора, м<sup>3</sup>/діб.

У випадку ідеальної ситуації, коли кожна порція завантаженого субстрату не переміщується із попередніми порціями (реактор у вигляді поєднаних ємностей, що вміщують одну завантажену порцію субстрату), як показано на рис. 2.3, час перебування кожної завантаженої порції в реакторі у момент перед вивантаженням першої збродженої порції із заповненого реактора становитиме:

$$\tau_i = \tau_{зБ} - \tau_3 i, \quad (2.4)$$

де  $i = 0 \dots n = 0 \dots \frac{\tau_{зБ}}{\tau_3}$  – нумерація завантажених порції біомаси у біогазовий реактор.

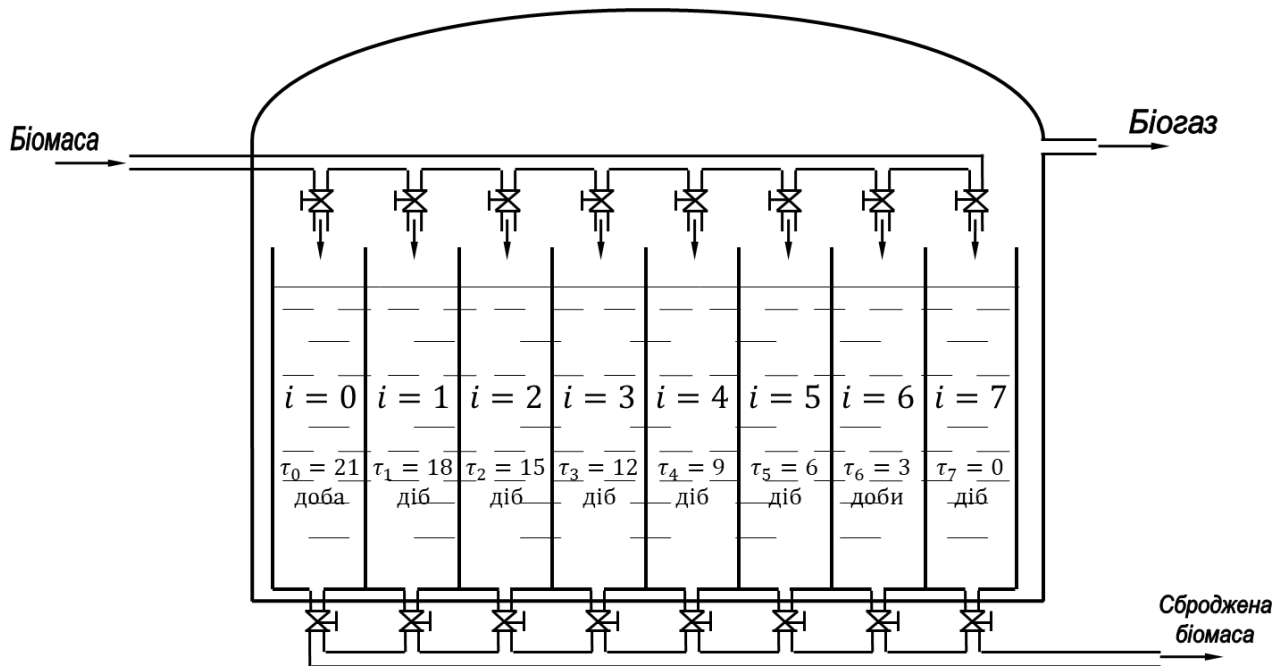


Рис. 2.3 – Ідеалізована схема біогазового реактора у вигляді поєднаних ємностей, що вміщують одну завантажену порцію субстрату

Знаючи час перебування кожної порції субстрату у біогазовому реакторі, можна визначити рівень розкладу кожної окремої порції органічної біомаси під час анаеробної ферментації, використавши експонентційні залежності виду (2.1):

$$\alpha_i = \alpha_0 [1 - \exp(-k(\tau_{3B} - \tau_3 i))]. \quad (2.5)$$

Інтегральний середній рівень розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації становитиме:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \alpha_i = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \alpha_0 [1 - \exp(-k(\tau_{3B} - \tau_3 i))] = \\ &= \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \alpha_0 [1 - \exp(-k\tau_{3B}) \exp(k\tau_3 i)] = \\ &= \alpha_0 \left[ 1 - \exp(-k\tau_{3B}) \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \exp(k\tau_3 i) \right] = \\ &= \alpha_0 \left[ 1 - \exp(-k\tau_{3B}) \frac{\tau_3}{\tau_{3B} + \tau_3} \sum_{i=0}^n \exp(k\tau_3 i) \right]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Виходячи із цього, інтегральна середня швидкість розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації, як диференціал виразу (2.6), становитиме:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{d\tau_{3B}} &= \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \alpha_0 k \exp(-k(\tau_{3B} - \tau_3 i)) = \\ &= \alpha_0 k \exp(-k\tau_{3B}) \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \exp(k\tau_3 i) = \\ &= \alpha_0 k \exp(-k\tau_{3B}) \frac{\tau_3}{\tau_{3B} + \tau_3} \sum_{i=0}^n \exp(k\tau_3 i). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Таким чином, отримано вирази для оцінки інтегральних значень рівня та швидкості розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації та роботі біогазового реактора в режимі періодичного завантаження.

Використання інтегральних значень рівня та швидкості розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації для даних, щодо анаеробного зброджування силосу [3] дозволило отримати інтегральні значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси силосу при анаеробному зброджування упродовж  $\tau_{зБ} = 60$  діб та із періодичністю завантаження  $\tau_3 = 5$  діб (рис. 2.4 та 2.5)

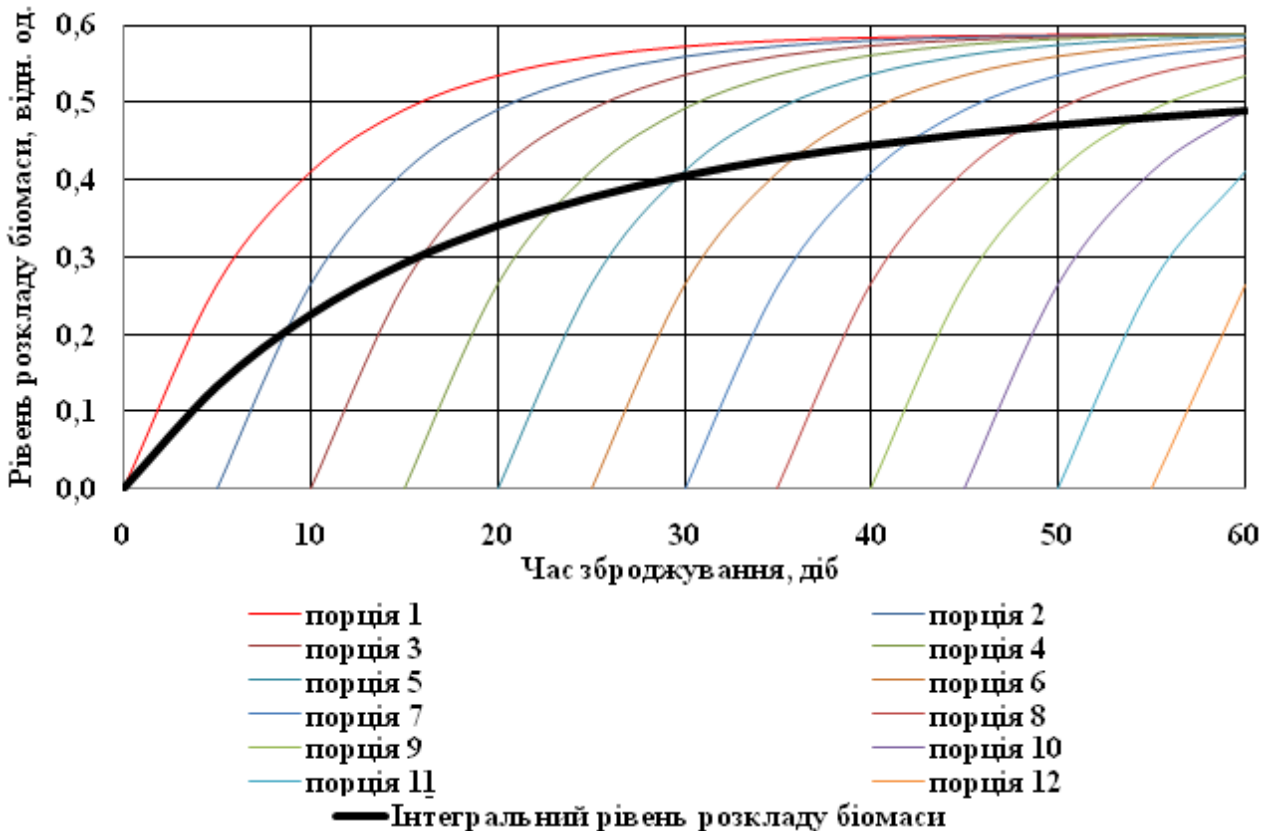


Рис. 2.4 – Інтегральний рівень розкладу органічної біомаси силосу під час анаеробної ферментації

Як показали розрахунки, незважаючи на те, що максимальний рівень розкладу органічної маси силосу під час анаеробного зброджування становить 0,59 відн. од., інтегральний рівень розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації при 12 завантажених порціях біомаси силосу в реактор буде становити 0,49 відн. од.

Максимальна інтегральна швидкість розкладу органічної біомаси під час ана-

еробної ферментації 12 завантажених порцій біомаси силосу в реактор буде становити 0,012 відн. од. або 1,2%.

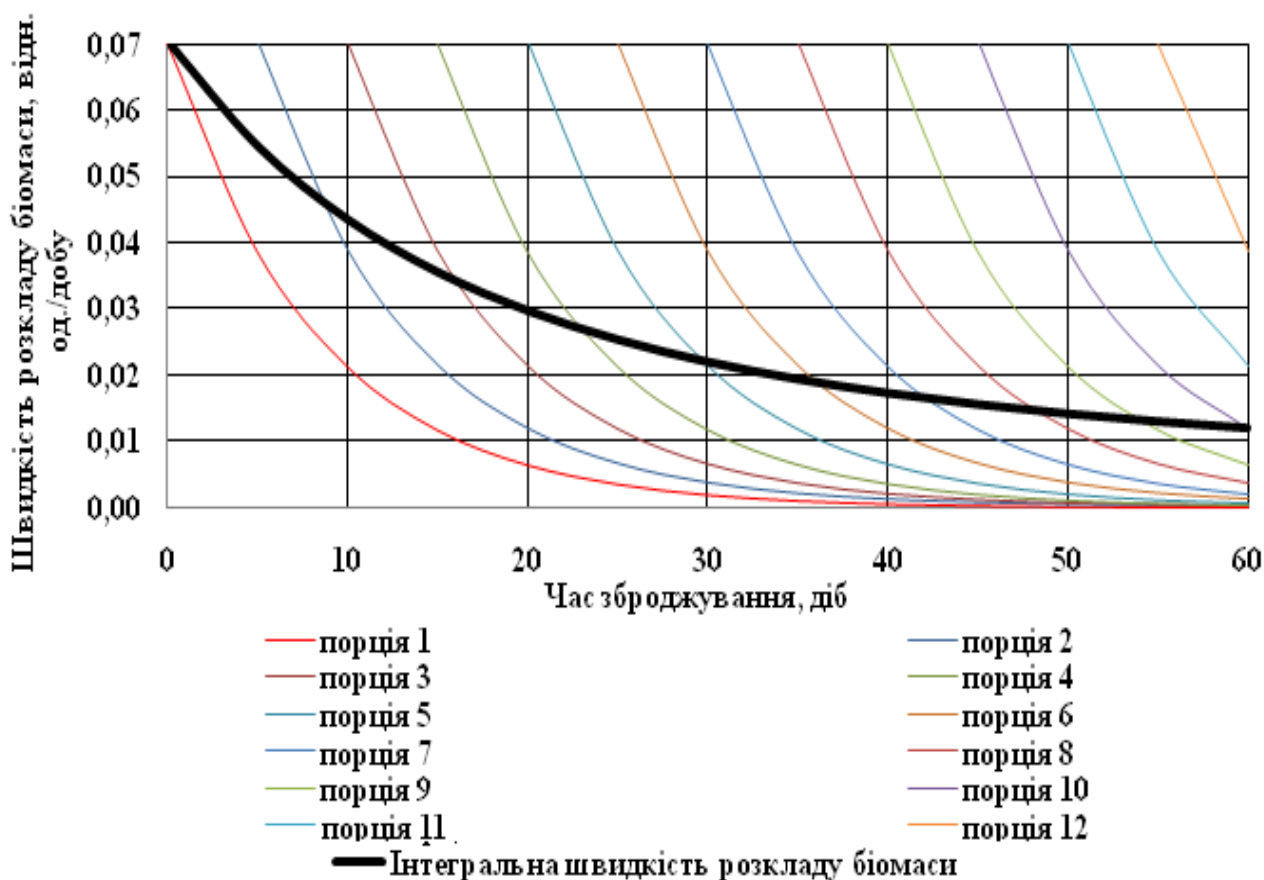


Рис. 2.5 – Інтегральна швидкість розкладу органічної біомаси силосу під час анаеробної ферментації

Використання інтегральних значень рівня та швидкості розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації для даних, щодо анаеробного збродження гною на основі експериментальних даних [58] дозволило отримати інтегральні значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси силосу при анаеробному збродженні упродовж  $\tau_{зБ} = 21$  діб та із періодичністю завантаження  $\tau_3 = 1$  доба (рис. 2.6 та 2.7).

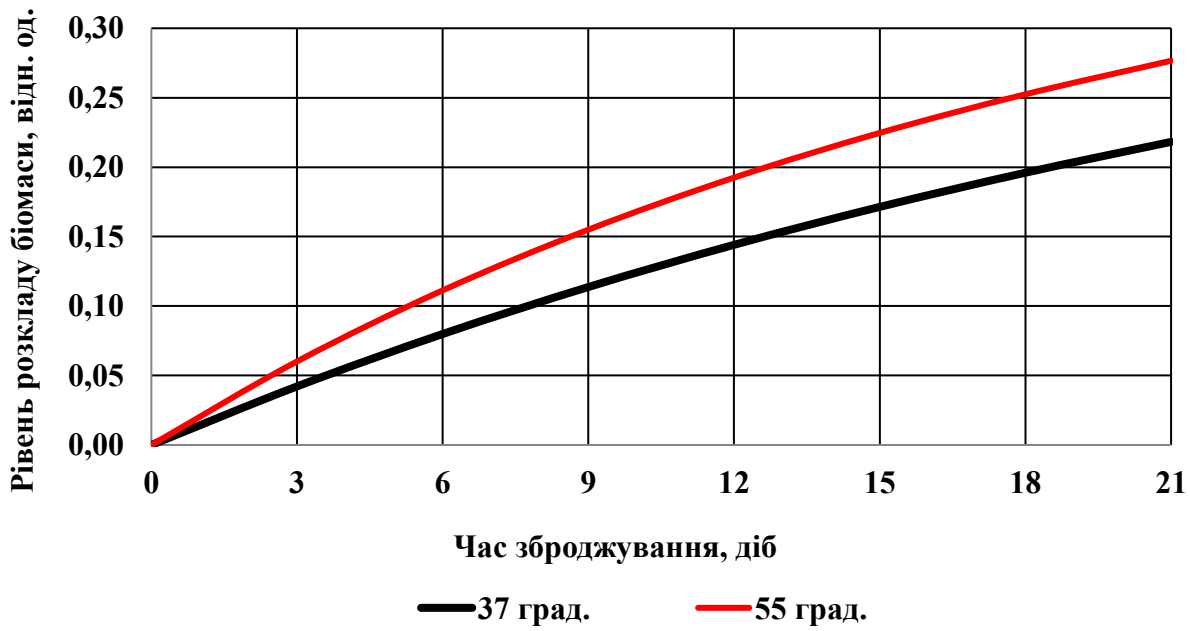


Рис. 2.6 – Інтегральний рівень розкладу органічної біомаси гною під час анаеробної ферментації

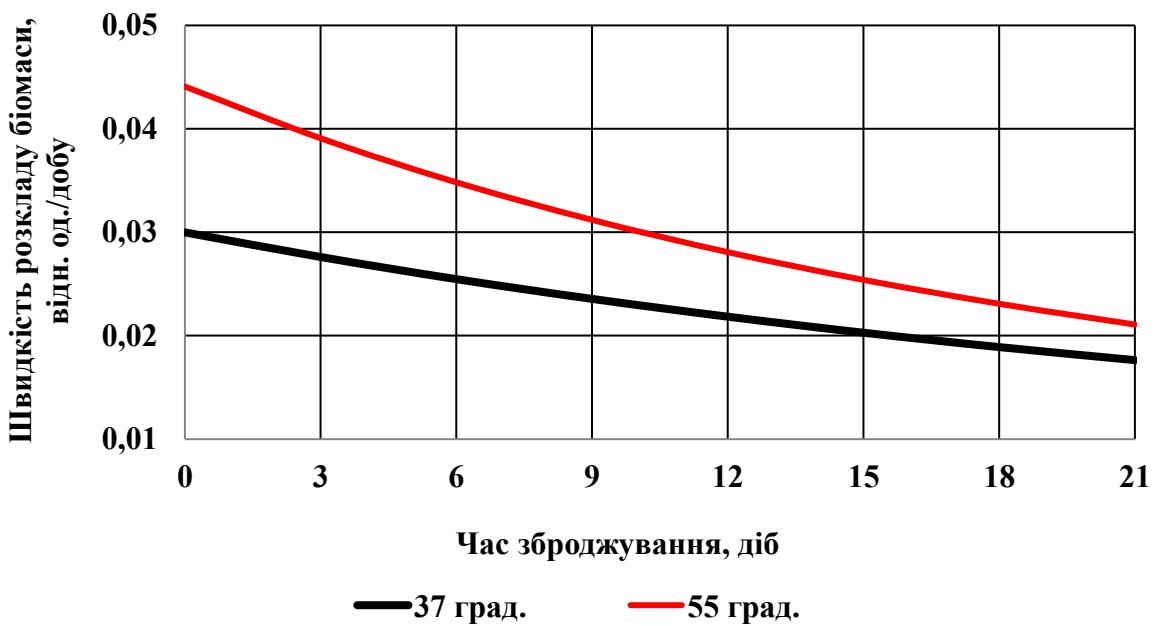


Рис. 2.7 – Інтегральний рівень швидкості розкладу органічної біомаси гною під час анаеробної ферментації

Було встановлено, що інтегральне значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації гною залежить від температури анаеробного зброджування. Так при температурі анаеробного зброджування 37 °С

інтегральне значення рівня розкладу органічної біомаси гною становило 0,22 відн. од., а інтегральне значення швидкості розкладу органічної біомаси – 0,017 відн. од. або 1,7%. У той же час, при температурі анаеробного зброджування 55 °С інтегральне значення рівня розкладу органічної біомаси гною становило 0,28 відн. од., а інтегральне значення швидкості розкладу органічної біомаси – 0,021 відн. од. або 2,1%, що на практично на чверть більше, ніж при температурі 37 °С.

Встановлено також, що інтегральне значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації гною практично не залежить від періодичності завантаження (рис. 2.8).

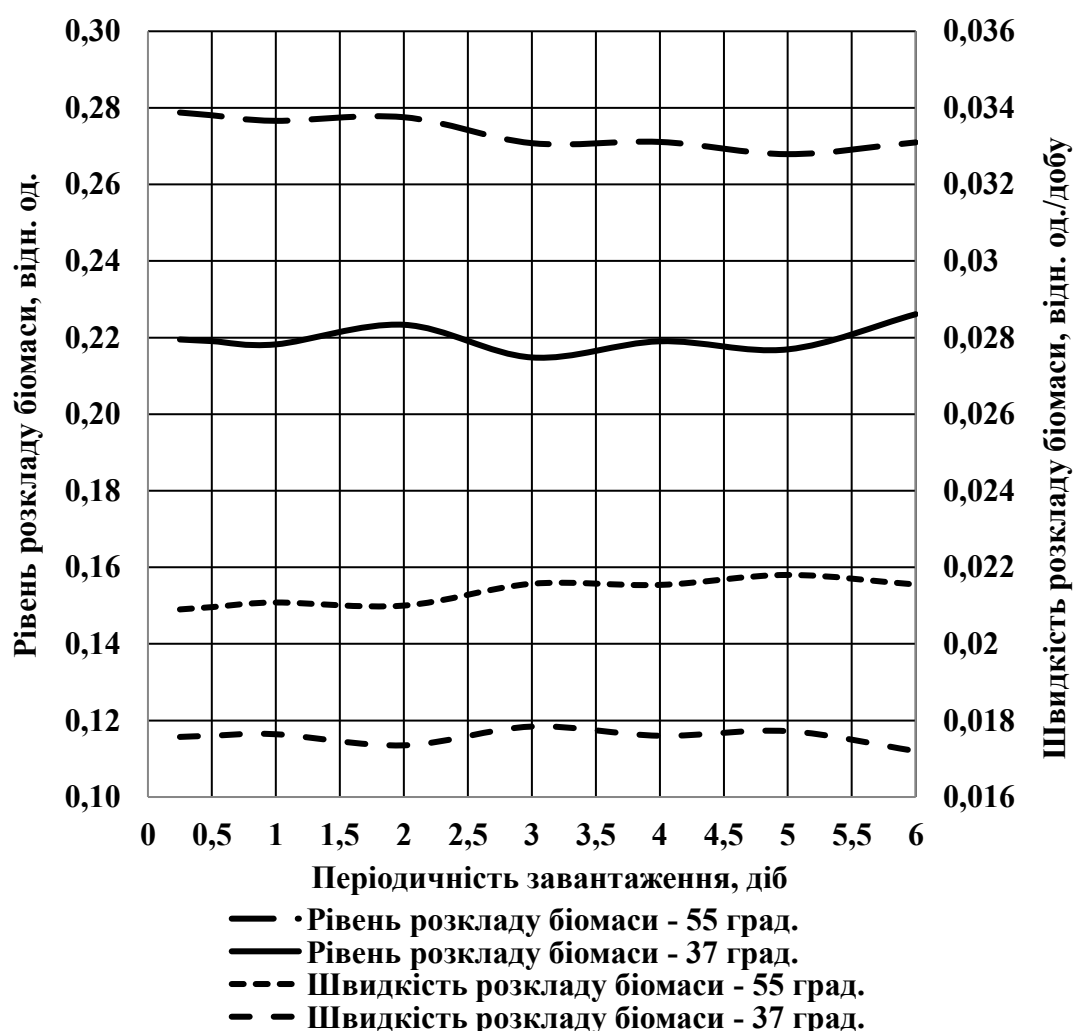


Рис. 2.8 – Вплив періодичності завантаження на інтегральний рівень розкладу та швидкість розкладу органічної біомаси гною під час анаеробної ферментації

Так, при температурі анаеробного зброджування 37 °С інтегральне значення рівня розкладу органічної біомаси гною становило від 0,21 до 0,23 відн. од., а інтегральне значення швидкості розкладу органічної біомаси – від 0,016 до 0,017 відн. од. При температурі анаеробного зброджування 55 °С інтегральне значення рівня розкладу органічної біомаси гною становило від 0,27 до 0,28 відн. од., а інтегральне значення швидкості розкладу органічної біомаси – 0,021 до 0,022 відн. од.

Таким чином, отримані залежності дають можливість аналітичного визначення інтегральної швидкості та рівня розкладу органічної біомаси у залежності від часу зброджування, періодичності завантаження реактора та температури зброджування під час анаеробної ферментації.

### **2.3 Алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу та метану під час анаеробної ферментації та роботі біогазового реактора в режимі періодичного завантаження**

Із урахуванням наведеного вище огляду досліджень процесу анаеробного зброджування та проведених теоретичних досліджень, розрахунок питомого виходу біогазу під час роботи біогазового реактора в режимі періодичного завантаження та у перерахунку на нормальні умови доцільно проводити у наступній послідовності.

1. Визначення властивостей біомаси, яка надходить на анаеробне зброджування: густини біомаси,  $\rho_{\text{БМ}}$ , вологості біомаси,  $W_{\text{БМ}}$  та вмісту органічної маси в сухій речовині біомаси,  $VS$ .

2. Визначення кінетики процесу анаеробного зброджування біомаси:

2.1 Визначення експериментальної залежності рівня розкладу органічної складової біомаси від часу анаеробного зброджування.

2.2 Визначення максимального рівня розкладу органічної складової біомаси під час анаеробного зброджування,  $\alpha_0$ .

2.3 Визначення швидкості розкладу органічної складової біомаси,  $k$ .

2.4 Визначення залежності для апроксимації експериментальних даних зміни рівня розкладу органічної складової біомаси від часу анаеробного зброджування у вигляді  $\alpha = \alpha_0[1 - \exp(-k\tau)]$ .

3. Визначення питомого виходу метану під час процесу анаеробного зброджування біомаси:

3.1 Визначення експериментальної залежності питомого виходу метану від часу анаеробного зброджування.

3.2 Визначення максимального рівня питомого виходу метану під час анаеробного зброджування,  $\gamma_0$ .

3.3 Визначення швидкості питомого виходу метану,  $k_{BM}$ .

3.4 Визначення залежності для апроксимації експериментальних даних зміни питомого виходу метану від часу анаеробного зброджування у вигляді  $\gamma = \gamma_0[1 - \exp(-k_{BM}\tau_{ЗБ})]$ .

4. Визначення інтегрального значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси й інтегрального значення питомого виходу метану під час анаеробної ферментації біомаси:

4.1 Визначення часу зброджування  $\tau_{ЗБ}$ , як відношення робочого об'єму біогазового реактора до об'єму добового завантаження біогазового реактора, періодичності завантаження біогазового реактора  $\tau_3$  та кількості завантажених порцій біомаси у біогазовий реактор  $n$ , як відношення часу зброджування (загального часу перебування біомаси в реакторі) до періодичності завантаження біогазового реактора.

4.2 Визначення інтегрального значення швидкості розкладу органічної біомаси та питомого виходу метану в залежності від часу зброджування та періодичності завантаження реактора.

5. Визначення питомого виходу метану  $\eta_{BM}$  та біогазу  $\eta_{BM}$  із реактора під час анаеробної ферментації за нормальних умов.

Представлений алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу під час роботи біогазового реактора в режимі періодичного завантаження та у перерахунку на нормальні умови у схематичному вигляді приведений на рис. 2.9. Приклад розрахунку

наведено у табл. 2.1 при щільності біогазу за нормальних умов  $\rho_{БГ}^H = 1,2 \text{ кг}_{БГ}/\text{м}^3_{БГ}$ .

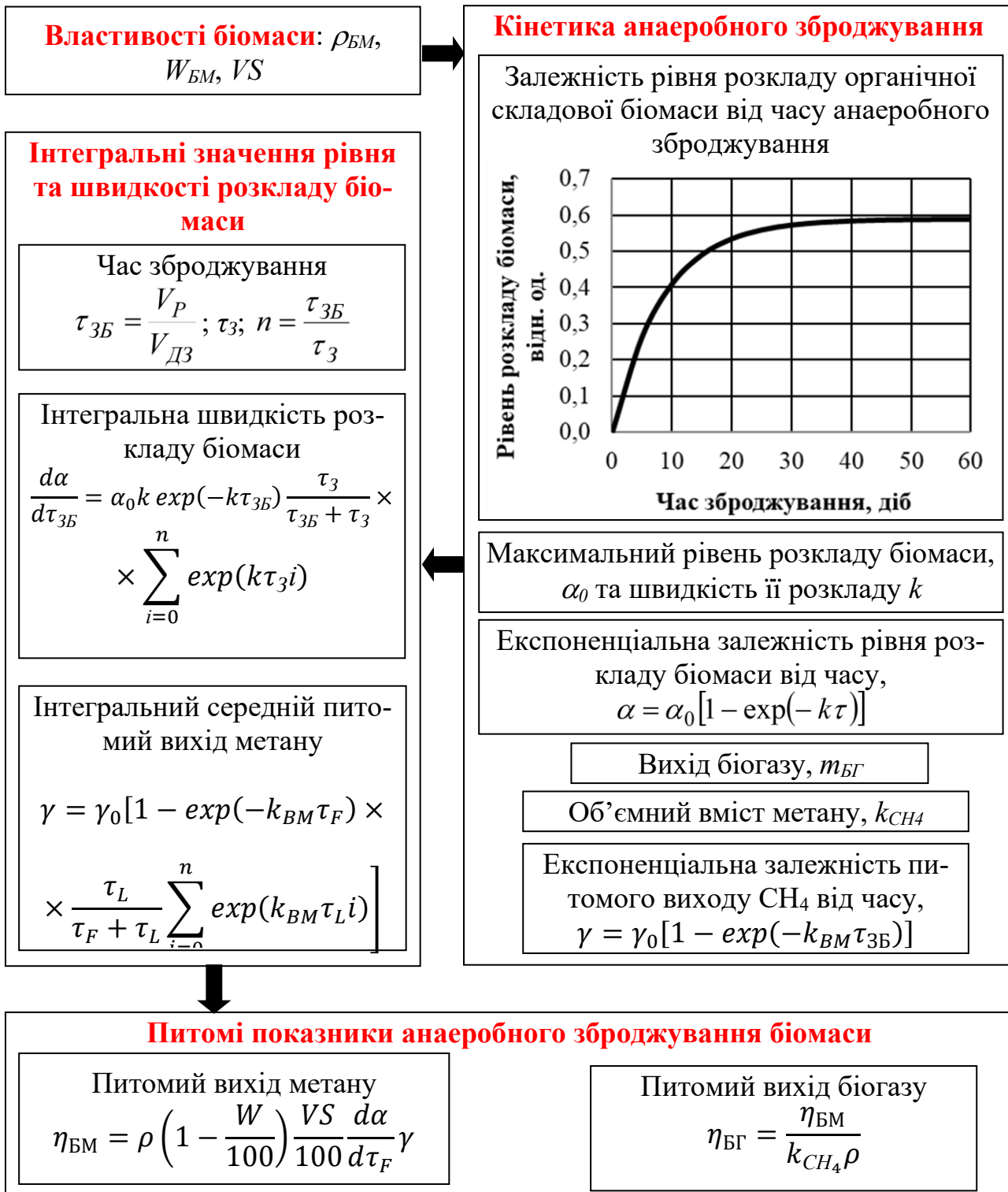


Рис. 2.9 – Алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу під час роботи біогазового реактора в режимі періодичного завантаження

Таблиця 2.1 – Розрахунок питомого виходу біогазу та метану

Властивості біомаси, яка надходить на анаеробне зброджування																																			
Густина гною	$\rho_{БМ}$	кг <sub>БМ</sub> /м <sup>3</sup> <sub>БМ</sub>	1050																																
Вологість	$W_{БМ}$	%	92																																
Вміст органічної маси	$VS$	%	80																																
Показники кінетики процесу анаеробного зброджування біомаси																																			
Експериментальна залежність рівня розкладу органічної складової біомаси від часу анаеробного зброджування гною згідно [58]	<table border="1"> <caption>Дані для графіка</caption> <thead> <tr> <th>Час зброджування (τ), діб</th> <th>Рівень розкладу (α), відн. од.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0,0</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,12</td></tr> <tr><td>10</td><td>0,28</td></tr> <tr><td>15</td><td>0,42</td></tr> <tr><td>20</td><td>0,48</td></tr> <tr><td>25</td><td>0,50</td></tr> <tr><td>30</td><td>0,51</td></tr> <tr><td>35</td><td>0,51</td></tr> <tr><td>40</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>45</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>50</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>55</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>60</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>65</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>70</td><td>0,52</td></tr> </tbody> </table>			Час зброджування (τ), діб	Рівень розкладу (α), відн. од.	0	0,0	5	0,12	10	0,28	15	0,42	20	0,48	25	0,50	30	0,51	35	0,51	40	0,52	45	0,52	50	0,52	55	0,52	60	0,52	65	0,52	70	0,52
Час зброджування (τ), діб	Рівень розкладу (α), відн. од.																																		
0	0,0																																		
5	0,12																																		
10	0,28																																		
15	0,42																																		
20	0,48																																		
25	0,50																																		
30	0,51																																		
35	0,51																																		
40	0,52																																		
45	0,52																																		
50	0,52																																		
55	0,52																																		
60	0,52																																		
65	0,52																																		
70	0,52																																		
Максимальний рівень та швидкість розкладу органічної біомаси	$\alpha_0$	відн. од.	0,53																																
	$k$	діб <sup>-1</sup>	0,08319																																
Залежність для апроксимації експериментальних даних зміни рівня розкладу органічної складової біомаси від часу анаеробного зброджування		$\alpha = \alpha_0 [1 - \exp(-k\tau)] = 0.53 [1 - \exp(-0.08319\tau)]$																																	
Вихід біогазу із розкладеної органічної маси за нормальних умов	$m_{БГ}$	кг <sub>БГ</sub> /кг <sub>РОМ</sub>	1,1																																
Об'ємний вмісту метану в біогазі	$k_{CH_4}$	%	70																																
Інтегральні значення рівня та швидкості розкладу біомаси при наступних умовах роботи біогазової установки: час зброджування $\tau_{ЗБ} = 21$ доба, періодичність завантаження біогазового реактора $\tau_3 = 1$ доба, кількість завантажених порцій біомаси у біогазовому реакторі $n=21$ од.																																			

<p>Інтегральне значення рівня розкладу органічної біомаси</p> <p>Інтегральне значення швидкості розкладу органічної біомаси</p>	$\alpha = \alpha_0 \left[ 1 - \exp(-k\tau_{3B}) \frac{\tau_3}{\tau_{3B} + \tau_3} \sum_{i=0}^n \exp(k\tau_3 i) \right] = 0,53 \times$ $\times \left[ 1 - \exp(-0,08319 \cdot 21) \frac{1}{21+1} \sum_{i=0}^7 \exp(0,08319 \cdot 1 \cdot i) \right] = 0,2766 \text{ відн. од.}$ $\frac{d\alpha}{d\tau_{3B}} = \alpha_0 k \exp(-k\tau_{3B}) \frac{\tau_3}{\tau_{3B} + \tau_3} \sum_{i=0}^n \exp(k\tau_3 i) = 0,53 \cdot 0,068 \times$ $\times \exp(-0,068 \cdot 21) \frac{1}{21+1} \sum_{i=0}^7 \exp(0,068 \cdot 1 \cdot i) =$ $= 0,0211 \text{ відн. од./добу}$		
<p>Вихід біогазу та метану із реактора за нормальних умов</p>	$\eta_{БМ}$	$\text{м}^3_{БГ}/\text{м}^3_{БМ}$ за добу	1,3
	$\eta_{БМ}$	$\text{м}^3\text{CH}_4/\text{м}^3_{БМ}$ за добу	0,91

Отримане нами розрахункове значення виходу біогазу із реактора за нормальних умов у перерахунку на масу гною становить 1,24 м<sup>3</sup><sub>БГ</sub>/т біомаси за добу. Фактичний вихід біогазу на основі аналізу даних проведених досліджень біогазових установок [132] становив: 2 м<sup>3</sup>/т біомаси за добу (температура зброджування 40 °С, вологість біомаси 96,2%, час зброджування 5 діб); 1,1 м<sup>3</sup>/т біомаси за добу (температура зброджування 40 °С, вологість біомаси 99,5%, час зброджування 10 діб); 1,2 м<sup>3</sup>/т біомаси за добу (температура зброджування 40 °С, вологість біомаси 93,7%, час зброджування 9 діб); 2,65 м<sup>3</sup>/т біомаси за добу (температура зброджування 54 °С, вологість біомаси 93,6%, час зброджування 5 діб); 1,04 м<sup>3</sup>/т біомаси за добу (температура зброджування 38 °С, вологість біомаси 94,1%, час зброджування 16 діб); 1,46 м<sup>3</sup>/т біомаси за добу (температура зброджування 35-40 °С, вологість біомаси 95,2%, час зброджування 14 діб). При цьому невідомими залишилися такі по-

казники як густина біомаси, вміст органічної маси, максимальний рівень та швидкість розкладу органічної біомаси, вихід біогазу із розкладеної органічної маси за нормальних умов та об'ємний вмісту метану в біогазі, а також інтегральні значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси, що не дозволяє більш точно оцінити адекватність запропонованого алгоритму розрахунку виходу біогазу та метану із реактора за нормальних умов. Якщо провести усереднення отриманих даних, отримаємо вихід біогазу на рівні  $1,575 \text{ м}^3/\text{т}$  біомаси за добу. Ця величина відрізняється від отриманої нами розрахункової величини виходу біогазу із реактора за нормальних умов на 27%, що свідчить про те, що при наявності більш точних даних про параметри біомаси, наявності залежності рівня розкладу органічної складової біомаси від часу анаеробного зброджування та відомих умовах зброджування біомаси, запропонований алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу під час роботи біогазового реактора в режимі періодичного завантаження може успішно застосовуватися у наукових дослідженнях та для оцінки процесу виробництва біогазу діючими установками.

## 2.4 Висновки до розділу 2

1. У більшості випадків анаеробного зброджування гною та рослинної біомаси рівень розкладу органічної біомаси в часі може бути апроксимований експоненціальною залежністю, яка включає значення коефіцієнта швидкості процесу біогазової ферментації та значення максимального рівня розкладу органічної речовини, які визначаються експериментально.

2. Експоненціальні залежності для визначення рівня розкладу органічної біомаси в часі можуть бути використані для подальшого визначення інтегрального значення рівня розкладу органічної біомаси та питомого виходу біогазу або метану у перерахунку на нормальні умови за добу та у розрахунку на один кубічний метр біомаси в біогазовому реакторі.

3. Отримані залежності для аналітичного визначення інтегральної швидко-

сті та рівня розкладу органічної біомаси у залежності від часу зброджування, періодичності завантаження реактора та температури зброджування під час анаеробної ферментації.

4. Встановлено, що інтегральне значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації гною практично не залежить від періодичності завантаження.

5. На основі отриманих виразів для визначення інтегральної швидкості та рівня розкладу органічної біомаси розроблено алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу та метану під час анаеробної ферментації та роботі біогазового реактора в режимі періодичного завантаження.

6. Застосування алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу та метану під час анаеробної ферментації гною показало, що при щільності біогазу за нормальних умов  $\rho_{БГ}^H = 1,2 \text{ кг}_{БГ}/\text{м}^3_{БГ}$  вихід біогазу та метану при роботі біогазової установки становитимуть відповідно  $1,3 \text{ м}^3_{БГ}/\text{м}^3_{БМ}$  за добу та  $0,91 \text{ м}^3\text{CH}_4/\text{м}^3_{БМ}$  за добу, що відповідає показникам роботи існуючих установок.

### **РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕЛОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ІЗ ОСАДУ СТІЧНИХ ВОД СИСТЕМ ШТУЧНОГО ВИРОЩУВАННЯ РИБИ**

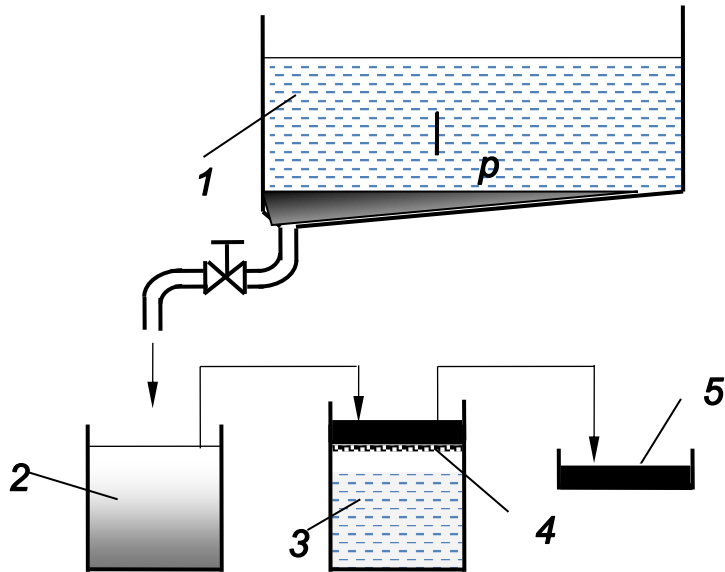
#### **3.1 Програма досліджень**

Програмою експериментальних досліджень передбачалося:

- визначення питомого виходу осаду в РСА;
- визначення кількості та рівня ущільнення осаду змивної води рециркуляційних систем аквакультури;
- визначення кінетичних параметрів анаеробного зброджування та питомого виходу біогазу із осаду рециркуляційних систем аквакультури.

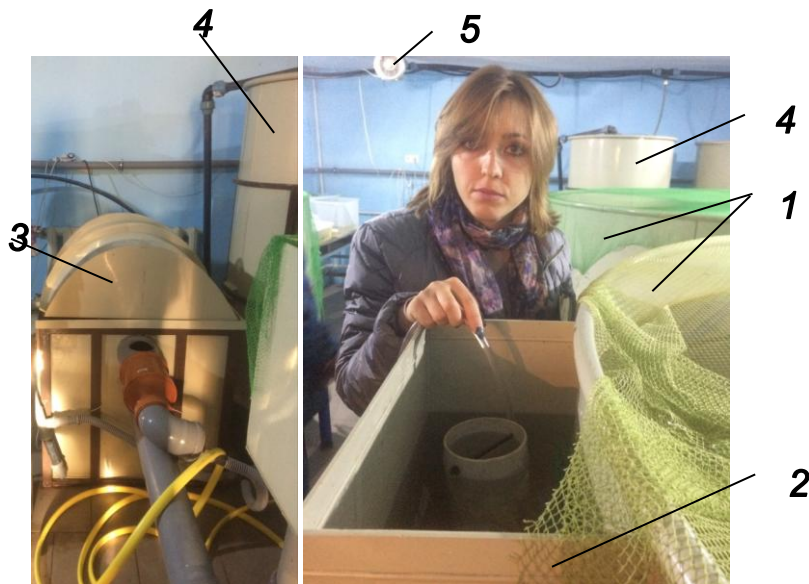
#### **3.2 Методика досліджень питомого виходу осаду в рециркуляційних системах аквакультури**

Оцінка питомого виходу осаду в установці для вирощування риби проводилася на базі підприємства по вирощуванню риби у Васильківському районі Київської області. Досліди проводилися з використанням басейнів для риби діаметром 2,35 м у кожному із яких знаходилося біля 6 м<sup>3</sup> води. За добу до проведення досліджень басейни для риби були ретельно очищені від бруду і осаду. Один із басейнів був зариблений російським осетром живою масою 31,5 кг (басейн №1), а інший бестером живою масою 52,5 кг (басейн №2). Годівля риби здійснювалася повнораціонним кормом для риби EFICO Sigma 811 R із розміром гранул 3 мм в кількості 800 г/добу. Для проведення досліджень використано установку, схема якої приведена на рис. 3.1. Загальний вигляд РСА, на основі якої проводилися дослідження, приведений на рис. 3.2. Осад, який накопичувався в басейні для риби 1 упродовж заданого часу (одна доба), змивався потоком води, а утворена суміш осаду і води надходила через запірний вентиль в ємність для збору суміші осаду і води 3.



1 – басейн для риби; 2 – ємність для збору суміші осаду і води; 3 – фільтрувальна ємність; 4 – фільтр; 5 – ємність для осаду

Рис. 3.1. Загальна схема проведення досліджень по визначенню питомого виходу осаду



1 – басейни для риби; 2 – ємність для збору суміші осаду і води; 3 – механічний фільтр; 4 – біофільтр-відстійник; 5 – повітродувка

Рис. 3.2 – Загальний вигляд обладнання для визначення питомого виходу осаду

Заданий обсяг суміші осаду і води, видалений із системи РСА фільтрувався в ємності 3 за допомогою фільтра 4, а відфільтрований осад видалявся в ємність 5.

Після завершення процесу виділення осаду визначалася його кількість та властивості.

Вологість осаду визначалася шляхом висушування проб у муфельній печі (SNOL 7,2/1100, Литва) при температурі 105 °С до постійної маси (ГОСТ 26713-85). Вміст органічної маси в осаді визначався шляхом прожарювання проб у муфельній печі (SNOL 7,2/1100, Литва) при температурі 550 °С (ГОСТ 27980-88). Загальний вигляд муфельної печі під час виконання досліджень приведено на рис. 3.3.

Концентрація сухої маси у пробі осаду визначався як співвідношення його сухої маси до загальної кількості суміші осаду і води, яка відбиралася для проведення дослідів:

$$O = \frac{m_0}{V_C} \quad (3.1)$$

де  $O$  – концентрація сухої маси осаду, г/л;  $m_0$  – суха маса осаду, г;  $V_C$  – об'єм суміші осаду і води, яка відбиралася для проведення дослідів, л.

$$B = OV_{CD} = \frac{m_0}{V_C} V_{CD} \quad (3.2)$$

де  $B$  – добовий вихід сухої маси осаду, г;  $V_{CD}$  – добовий вихід суміші осаду і води в системі, л.

Добовий питомий вихід сухої маси осаду із розрахунку на масу риби в басейні визначався за наступним виразом:

$$Q_{\Pi} = \frac{B}{m_P} = \frac{m_0 V_{CD}}{V_C m_P} \quad (3.3)$$

де  $Q_{\Pi}$  – питомий вихід сухої маси осаду, г осаду/кг риби;  $m_P$  – загальна маса риби в басейні, кг.

Розрахунок питомого виходу осаду із розрахунку на масу риби в басейні визначався за наступним виразом:



а

б



в

а) – загальний вигляд муфельної печі; б) – температура висушування при вимірюванні вологості осаду; в) – температура висушування при вимірюванні вмісту органічної маси в осаді

Рис. 3.3 – Загальний вигляд муфельної печі та її параметрів під час проведення висушування зразків осаду

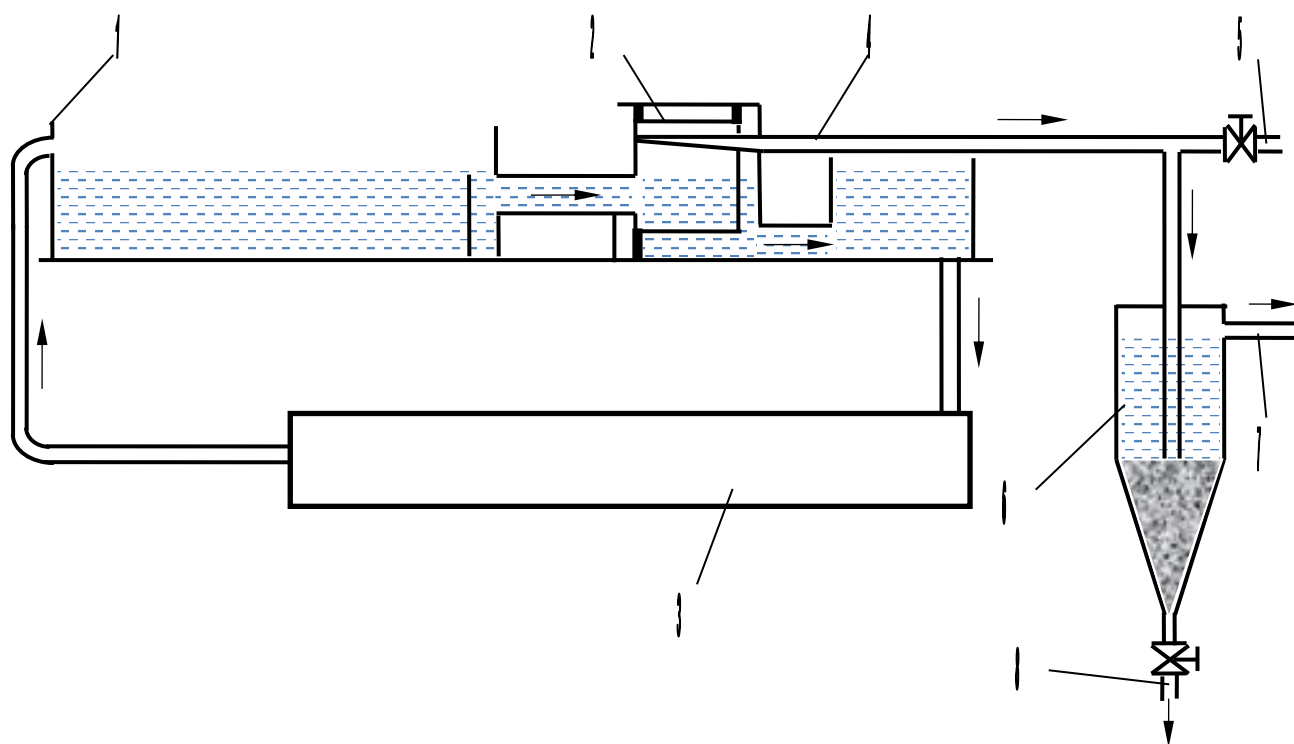
$$Q_{\Pi W} = Q_{\Pi} \left( 1 + \frac{W_0}{100 - W_0} \right) = \frac{m_0 V_{CD}}{V_C m_P} \left( 1 + \frac{W_0}{100 - W_0} \right) \quad (3.4)$$

де  $Q_{\Pi W}$  – питомий вихід осаду заданої вологості, г осаду/кг риби;  $W_0$  – задана

вологість осаду, %.

### 3.3 Методика досліджень кількості та рівня ущільнення осаду змивної води рециркуляційних систем аквакультури

Дослідження кількості та рівня ущільнення осаду змивної води рециркуляційних систем аквакультури проводилися із використанням стічної змивної води механічного фільтра для рециркуляційних систем аквакультури під час вирощування кларієвого сома (*Clarias gariepinus*). Загальна схема рециркуляційної системи аквакультури, яка дообладнана відстійником для розділення стічної змивної води механічного фільтра на осад і відстояну стічну воду приведена на рис. 3.4.



1 – басейн для риби; 2 – механічний фільтр; 3 – система біологічної очистки води;  
4 – трубопровід відводу стічної промивної води із механічного фільтра на утилізацію;  
5 – точка відбору проб стічної промивної води; 6 – відстійник; 7 – трубопровід відстояної стічної води;  
8 – трубопровід відводу осаду стічної води

Рис. 3.4. Загальна схема рециркуляційної системи очистки стічних вод аквакультури та седиментації осаду із стічної промивної води із механічного фільтра

На першому етапі досліджень стічна змивна вода механічного фільтра відбиралася у мірні циліндри для відстоювання (рис. 3.5). Відбір стічної змивної води проводився перед її надходженням у відстійник (позиція 5 на рис. 3.4).



Рис. 3.5. Загальний вигляд місця відбору проб стічної промивної води стічної (а) та промивної води із механічного фільтра (б) в мірних циліндрах

Досліди проводилися у три різні дні, щоб нівелювати вплив технологічних факторів та у 3-ти кратній повторності. На основі отриманих даних визначалися стандартне відхилення даних і довірчий інтервал при 5% рівні значимості для кількості осаду, вмісту сухої речовини в стічній змивній воді механічного фільтра, осаді та відстояній стічній воді. Кількість осаду визначалася зі зміною часу відстоювання, а вміст сухої речовини в стічній змивній воді механічного фільтра, осаді та відстояній стічній воді визначалися по закінченню процесу відстоювання.

На другому етапі досліджень стічна змивна вода механічного фільтра відстоювалася у відстійнику (позиція 6 на рис. 3.4). Відбір осаду та стічної води проводився після відстоювання у відстійнику упродовж доби (рис. 3.6). Для порівняння вмісту твердих речовин у стічній воді після відстоювання у відстійнику та рециркуляційної води після механічного фільтра відбиралися і аналізувалися проби рециркуляційної води після механічного фільтра.



а

б

Рис. 3.6. Загальний вигляд місця відбору проб стічної після відстійника (а) та рециркуляційної води після механічного фільтра, стічної води й осаду після відстоювання у відстійнику упродовж доби (б)

У подальшому осад після відстоювання у відстійнику упродовж доби піддавався подальшому відстоюванню у мірному циліндрі та безпосередньо у відстійнику упродовж декількох діб (рис. 3.7).

Вміст сухої речовини під час проведення досліджень визначався шляхом фільтрування стічних вод і осадів та послідуочим висушуванням залишків на фільтрах у сушильній шафі при температурі 105°C.

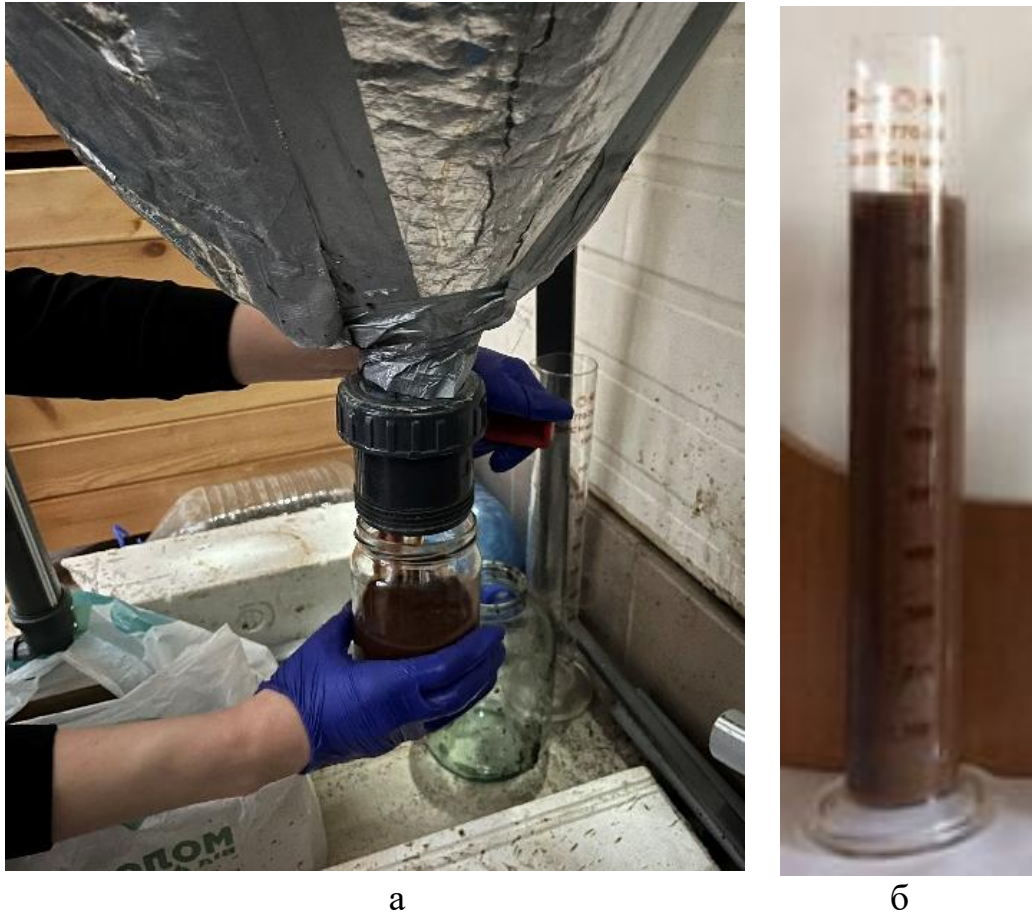


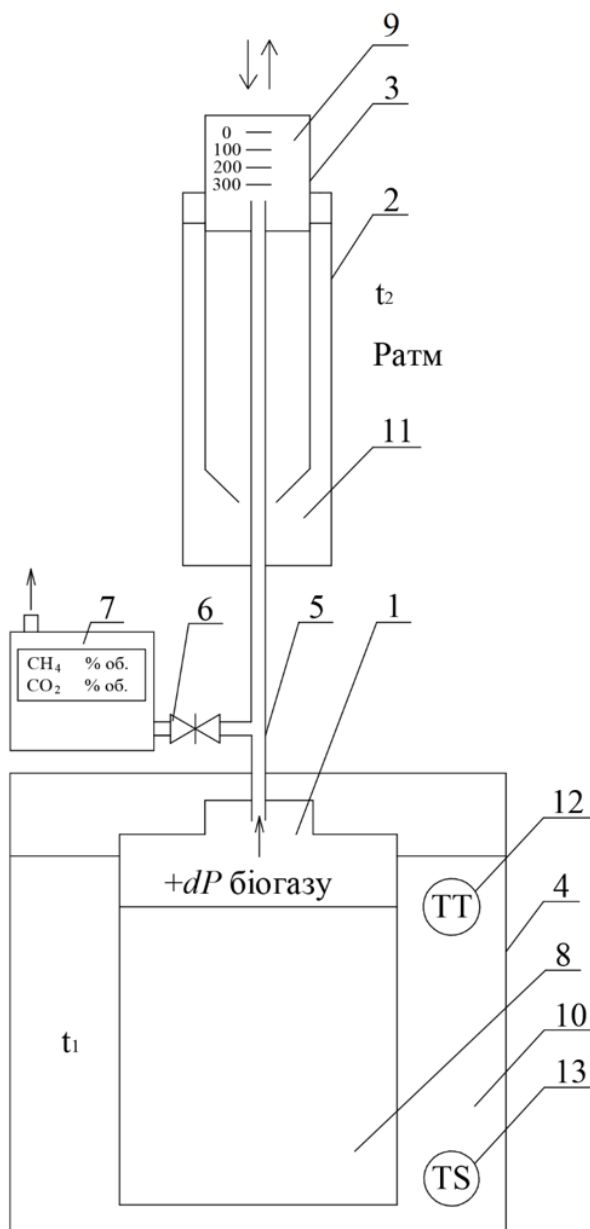
Рис. 3.7. Загальний вигляд місця відбору проб осаду після відстійника (а) та осаду після відстоювання у відстійнику упродовж доби (б)

Оцінка агрохімічних показників осаду та стічної води після відстоювання у відстійнику проводилося за стандартними методиками у спеціалізованій лабораторії Національного університету біоресурсів і природокористування України.

#### **3.4 Методика визначення кінетичних параметрів анаеробного збро- дження та питомого виходу біогазу із осаду рециркуляційних систем аква- культури**

Об'єктом дослідження процесу анаеробної ферментації був ущільнений осад стічних вод аквакультури, отриманого шляхом відстоювання стічної води у РСА під час вирощування нільського кларійового сома (*Clarias gariepinus*).

Дослідження проводилися на базі лабораторії виробництва біогазу Інституту технічної теплофізики НАН із використанням осаду стічної змивної води механічного фільтра РСА для вирощування нільського кларійового сома (*Clarias gariepinus*). Загальний вигляд експериментальної установки приведено на рис. 3.8.



1 – ємність біореактора; 2 – нерухома частина евдіометра; 3 – рухома частина евдіометра; 4 – ємність з теплоносієм; 5 – трубка з ПВХ для руху біогазу; 6 – газовий запірний кран; 7 – газоаналізатор; 8 – робоче середовище біореактора; 9 – внутрішній простір евдіометра з біогазом; 10 – теплоносій (вода); 11 – 5% водний розчин NaCl; 12 – ртутний термометр; 13 – терморегулятор

Рис. 3.8. Принципова схема одиначної системи дослідної установки

Експериментальне дослідження процесу анаеробного зброджування осаду стічної змивної води проводилися в урахуванням положень, викладених в німецькому стандарті VDI 4630:2016 [141].

Відібрані проби осаду стічної змивної води, а також інокулянт, було проаналізовано на предмет вмісту сухих речовин та зольності. Інокулянт, що містив активну популяцію метаногенних бактерій та архей, отримано в лабораторних умовах в процесі метанового бродіння органічних матеріалів змінного виду і складу. На основі даних про вміст сухої органічної речовини (COP) в осадах та в інокулянті було підготовлено тестові суміші.

Основні характеристики матеріалів, які були використані в процесі анаеробного зброджування приведені в табл. 3.1, а їх співвідношення по варіантах дослідів – в табл. 3.2. Умови проведення дослідів наведені в табл. 3.3.

Після внесення дослідних сумішей в реактори, в залишковий газовий простір реакторів було подано газоподібний азот з метою витіснення кисню повітря, після чого кожен реактор було герметично з'єднано з евдіометром за допомогою гнучкої силіконової трубки. Утворення біогазу в реакторі приводило до збільшення його парціального тиску в газовому просторі евдіометра, в результаті чого рухома частина евдіометра піднімалась на певну висоту. Рухома частина евдіометра є градульованою в мл. Зчитування об'єму виділеного біогазу проводилось візуально.

Абсолютна похибка візуального зчитування об'єму накопиченого в евдіометрі біогазу складала  $\pm 10$  мл. Відносна похибка візуальної фіксації об'єму виділеного біогазу не перевищувала 2% кумулятивного виходу біогазу, виділеного за увесь період експерименту.

Рівень розкладу COP ( $E_{VS}$ , відн. од.) визначався за наступним виразом:

$$E_{VS} = \frac{M_{CH_4} + M_{CO_2}}{0,93 M_{VS}} \quad (3.5)$$

де  $M_{CH_4}$  – обчислена маса виділеного з біогазом метану, гCH<sub>4</sub>;

$M_{CO_2}$  – обчислена маса виділеного з біогазом вуглекислого газу, гCO<sub>2</sub>;

$M_{VS}$  – початкова маса СОР осадів, внесеного в реактор, гСОР;

0,93 – коефіцієнт, що враховує приріст біомаси бактерій в реакторі при розпаді органічної речовини осадів.

Повторність кожної із 3-х дослідних сумішей дослідів була трьохкратною.

Таблиця 3.1. Основні показники інокуляту та осаду змивної води РСА

Матеріал	Сухі речовини (105 °С), %	Вологість, %	Суша органічна речовина (550 °С), % до СР
Інокулят	2,89	97,11	64,08
Осади змивної води РСА	7,26	92,74	95,86

Таблиця 3.2. Співвідношення між кількістю інокуляту та осаду змивної води РСА по варіантах дослідів

Тест	Дослідний матеріал	Об'єм, мл	Маса, г	Вміст СР, г	Вміст СОР, г	Співвідношення СОР осаду та інокуляту, Rvs/as	Співвідношення СОР дослідного матеріалу та маси, Cvs, гСОР/кг	Вміст СР в суміші, %
1	Інокулят	750,0	780,0	22,6	14,5	0,359	16,909	3,27
	Осад РСА	71,0	74,6	5,4	5,2		6,075	
	Суміш	821,0	854,6	28,0	19,6		22,984	
2	Інокулят	750,0	780,0	22,6	14,5	0,498	16,358	3,40
	Осад РСА	98,5	103,4	7,5	7,2		8,146	
	Суміш	848,5	883,4	30,1	21,6		24,504	
3	Інокулят	750,0	780,0	22,6	14,5	0,631	15,862	3,52
	Осад РСА	124,8	131,0	9,5	9,1		10,008	
	Суміш	874,8	911,0	32,1	23,6		25,870	

Таблиця 3.3. Умови проведення дослідів

Період часу від початку тесту до поточного заміру об'єму біогазу, діб	Температура оточуючого середовища, °C	Температура в реакторі, °C	Атмосферний тиск, мм рт. ст.
0,0	20	36	742
1,0	19		739
2,5	30,5		742
3,7	28		742
5,0	29		742
7,0	31		748
8,6	21		752
11,1	21		748
14,0	29		744
16,0	30		744
20,8	31,5		747
37,7	20		742

Температурний режим в реакторах ( $36 \pm 0.2$  °C) забезпечувався за допомогою нагрівального елемента для водних середовищ з терморегулятором. Вимірювання температури проводилось за допомогою температурного датчика, встановленого в ємності з теплоносієм (водою).

Вимірювання вмісту  $\text{CH}_4$  та  $\text{CO}_2$  в виділеному біогазі проводилось за допомогою портативного газоаналізатора Landtec GEM-500.

Експериментальні дані оброблялися шляхом визначення середнього значення результатів вимірювань та їх довірчого інтервалу.

Визначення параметрів анаеробного зброджування для умов, коли в біогазовому реакторі знаходиться декілька порцій осаду, які знаходяться на різних стадіях рівня розкладу СОР проводилося на основі [142].

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ БІОГАЗОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ОСАДУ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ АКВАКУЛЬТУРИ

### 4.1 Результати визначення питомого виходу осаду в рециркуляційних системах аквакультури

Видалення осаду із басейнів з рибою в РСА проводилося за рахунок гідростатичного тиску води (шляхом зливу води із басейнів). Враховуючи такий спосіб видалення осаду, були визначені основні показники умов проведення досліду та властивості осаду РСА. Під час проведення досліджень отримані дані, які наведені в табл. 4.1.

Табл. 4.1 – Основні показники умов досліду та властивості осаду в РСА

Назва риби	Кількість зливої води, л	Рівень зливу води, мм	Кількість води у пробі, л	Сира маса осаду, г	Вологість осаду, %	Суха маса осаду, г
Російський осетер (басейн №1)	26,02	6	10	6,005	94,55	0,33
Бестер (басейн №2)	30,36	7	15	29,2887	96,14	1,13

На основі отриманих значень розраховувалися показники виходу осаду та робився перерахунок виходу осаду на вологість оптимальну для біогазового збродження. Ці дані приведені в табл. 4.2.

Із використанням залежності (3.4), для ілюстрації зміни питомого виходу осаду побудовано графічні залежності зміну питомого виходу осаду в залежності від його вологості та виду риби (рис. 4.1).

Графік демонструє, що зміна питомого виходу осаду у значній мірі визначається його вологістю.

Табл. 4.2 – Основні показники виходу осаду в РСА

Назва риби	Суха речовина осаду			Перерахунок на W=90 %		
	концентрація, г/л	кількість, г/добу	на 1 кг риби, г/кг	концентрація, г/л	кількість, г/добу	на 1 кг риби, г/кг
Російський осетер (ба-сейн №1)	0,033	0,852	0,027	0,3272	8,52	0,27
Бестер (ба-сейн №2)	0,075	2,290	0,044	0,7544	22,90	0,44

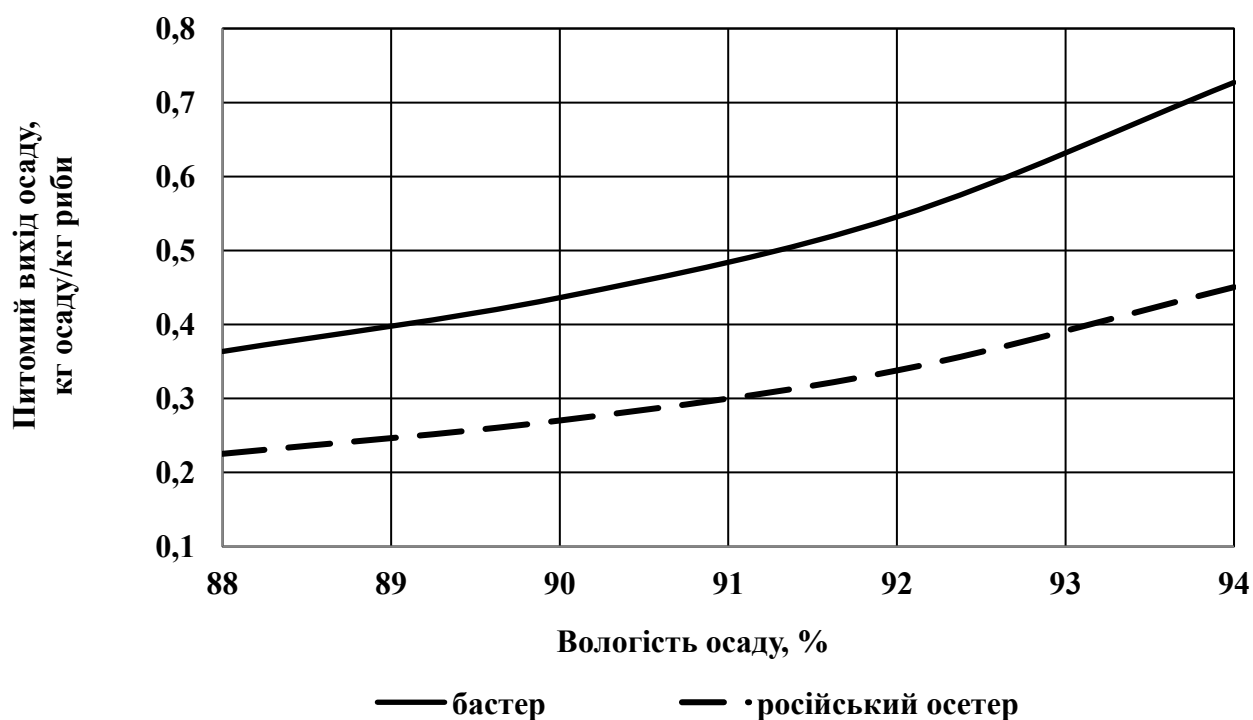


Рис. 4.1. Зміна питомого виходу осаду в залежності від його вологості та виду риби

Таким чином, питомий вихід сухої маси осаду в РСА становить від 0,027 при вирощуванні російського осетра до 0,044 г осаду/кг риби при вирощуванні бастера. Перерахунок питомого виходу осаду на вологість оптимальну для біогазового збро-джування показав, що в такому випадку питомий вихід осаду в РСА збільшується в 10 разів і становить від 0,27 при вирощуванні російського осетра до 0,44 г осаду/кг риби при вирощуванні бастера. Слід зазначити, що питомий вихід осаду в РСА залежить не тільки від виду вирощуваної риби, а й від інтенсивності годівлі риби.

Отримані дані будуть корисними для розрахунку об'ємів біогазового реактора для збродження осаду РСА з метою отримання тепла і електроенергії для внутрішніх потреб РСА.

#### 4.2 Результати досліджень ущільнення осаду рециркуляційної системи аквакультури

Дослідження відстоювання стічної змивної води механічного фільтра у літрових мірних циліндрах для рециркуляційної аквасистеми під час вирощування кларієвого сома показало, що максимальний об'єм осаду встановлюється на рівні 70 мл (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Результат відстоювання стічної змивної води механічного фільтра

Було встановлено, що випадіння осаду відбувається за 3-4 хвилини, а в подальшому, упродовж 15 хвилин, відбувається поєднання очищення (освітлення) стічної води та ущільнення осаду під дією ваги стічної води. Цей процес завершається упродовж 20 хвилин (рис. 4.3). Таким чином можна вважати, що рівень відстоювання осаду стічної змивної води механічного фільтра становить біля 7% від загальної кількості стічної змивної води механічного фільтра.

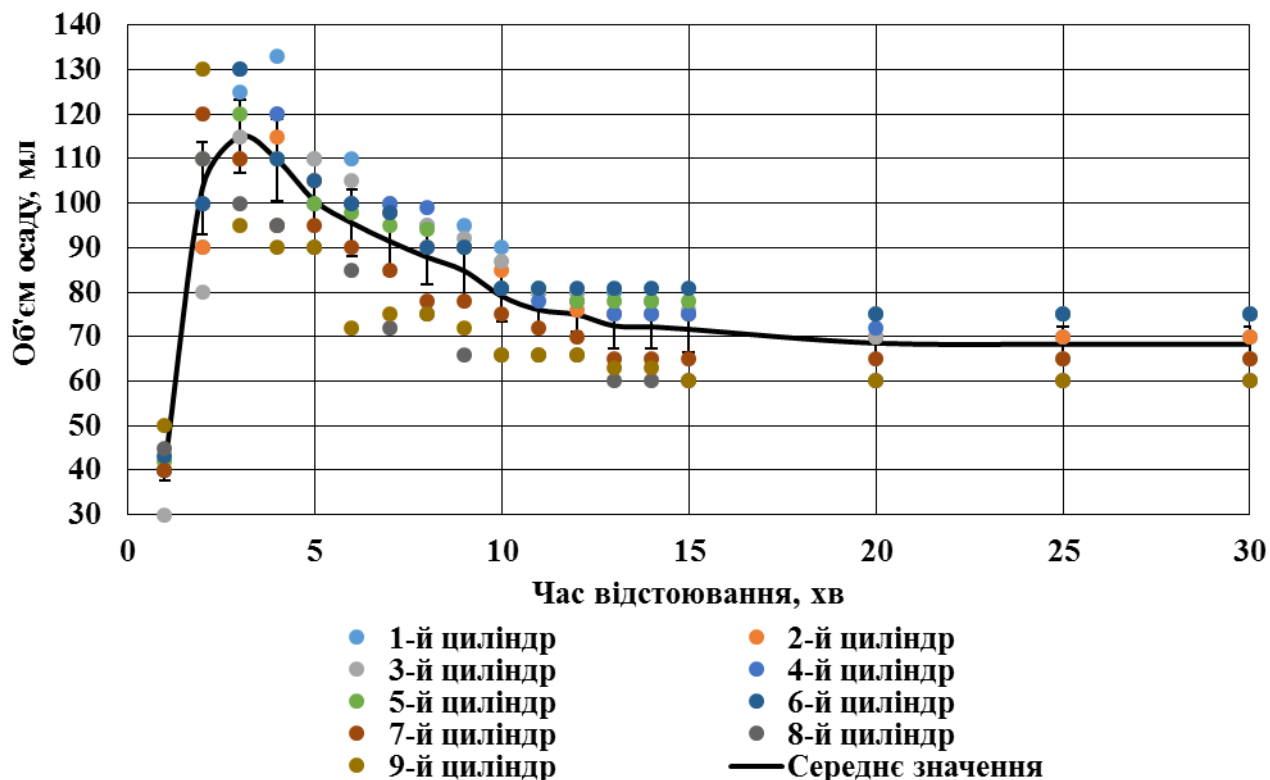


Рис. 4.3. Залежність об'єму осаду від часу відстоювання у мірних циліндрах

Було також встановлено, що вміст твердих речовин стічної змивної води механічного фільтра на рівні  $0,866 \pm 0,092$  г/л концентрується в осаді і становить  $0,859 \pm 0,091$  г/л (рис. 4.4). Відстій стічної води містив  $0,007 \pm 0,002$  г/л твердих речовин. Розподіл вмісту твердих речовин між відстієм та осадом становив 1:120-125. Середнє значення ефективності видалення твердих речовин у мірних циліндрах становила 99.2%.

Дослідження відстоювання стічної змивної води механічного фільтра у відстійнику упродовж доби показало вміст твердих речовин у відстояній стічній воді

після відстійника на рівні  $0,07 \pm 0,015$  г/л, що на порядок більше, ніж при відстоюванні в мірних циліндрах. Таке перевищення вмісту твердих речовин у відстоюній стічній воді після відстійника порівняно із відстоюванням стічної змивної води механічного фільтра в мірних циліндрах обумовлено динамічним режимом відстоювання у відстійнику, який працював у безперервному режимі.

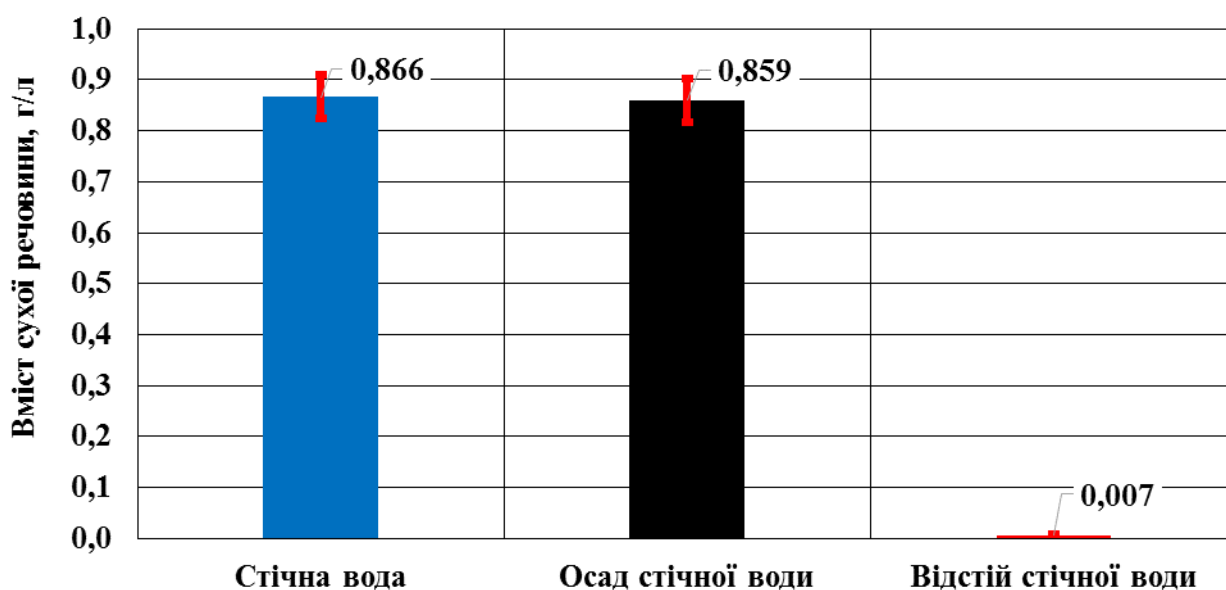


Рис. 4.4. Розподіл вмісту твердих речовин стічної змивної води механічного фільтра від часу відстоювання у мірних циліндрах

Оцінка вмісту твердих речовин у рециркуляційній воді після механічного фільтра показала значення на рівні  $0,057 \pm 0,023$  г/л. Вміст твердих речовин у осаді із відстійника становив  $32,453 \pm 0,663$  г/л, що приблизно в 30 разів більше, ніж при відстоюванні в мірних циліндрах, оскільки час відстоювання значно перевищував час відстоювання у мірних циліндрах (рис. 4.5).

Таке явище обумовлено ущільненням осаду під дією ваги самого осаду та стічної води у відстійнику. Середнє значення ефективності видалення твердих речовин у відстійнику становила 91,9%.

Осад після відстоювання у відстійнику упродовж доби піддавався подальшому відстоюванню у мірному циліндрі. Було встановлено, що об'єм осаду продовжує знижуватися упродовж 15 діб (рис. 4.6).



Рис. 4.5. Розподіл вмісту твердих речовин у рециркуляційній воді після механічного фільтра, відстоюній стічній воді після відстійника та осаді із відстійника при відстоюванні упродовж доби

За першу добу рівень осаду як відношення поточного значення об'єму осаду до вихідного значення у відсотках знизився на величину до 35-38%. Максимальне значення зменшення рівня осаду становило 45%. На основі даних рівня осаду було визначено залежність розрахункової вологості осаду від часу відстоювання. Було встановлено, що при відстоюванні осаду упродовж 15 діб, його розрахункова вологість становила близько 92,8%.

Відстоювання осаду безпосередньо у відстійнику упродовж 15 діб дозволило отримати диференційний та інтегральний розподіл результатів визначення вологості осаду (рис. 4.7). Було встановлено, що вологість осаду на рівні 92% може бути отримана після відстоювання осаду упродовж 15 діб із ймовірністю 69,23%. Що стосується вологості осаду на рівні 93%, то її можна отримана після відстоювання осаду упродовж 15 діб із ймовірністю 92,31%. Під час проведення досліджень зразків осаду із вологістю більше 94% не отримано. Ці дані свідчать про можливість подальшого анаеробного зброджування отриманого осаду з метою отримання біогазу та його використання для підвищення енергетичної автономності акваферми.

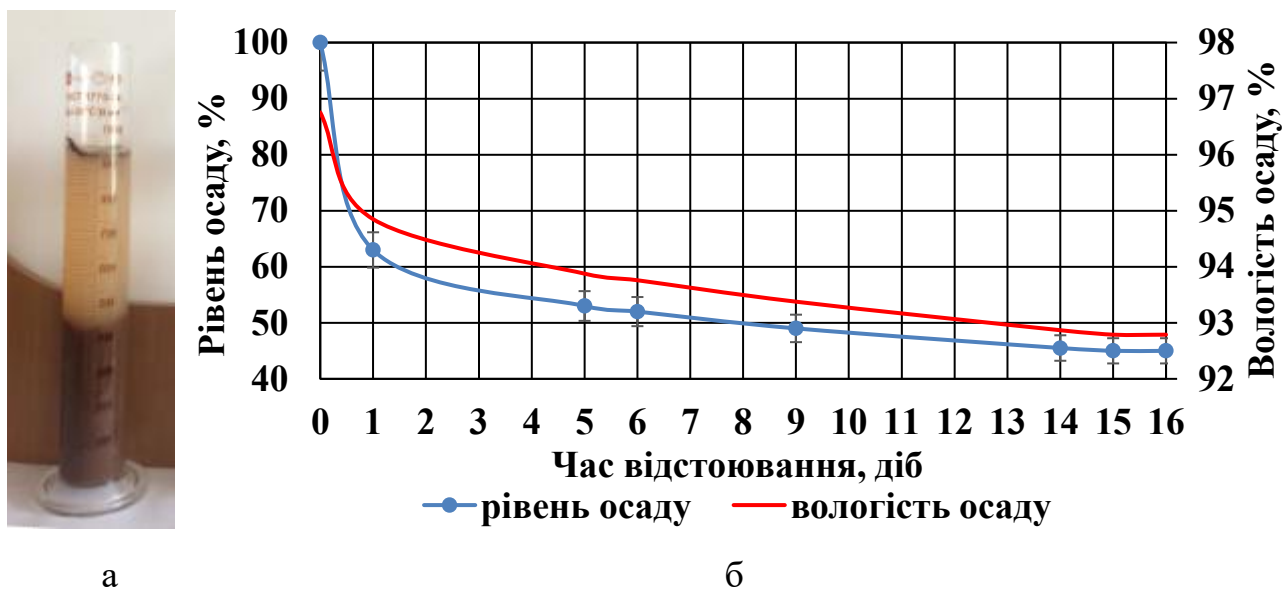


Рис. 4.6. Загальний вигляд осаду після відстоювання (а) та залежність об'єму осаду та його розрахункової вологості від часу відстоювання (б)

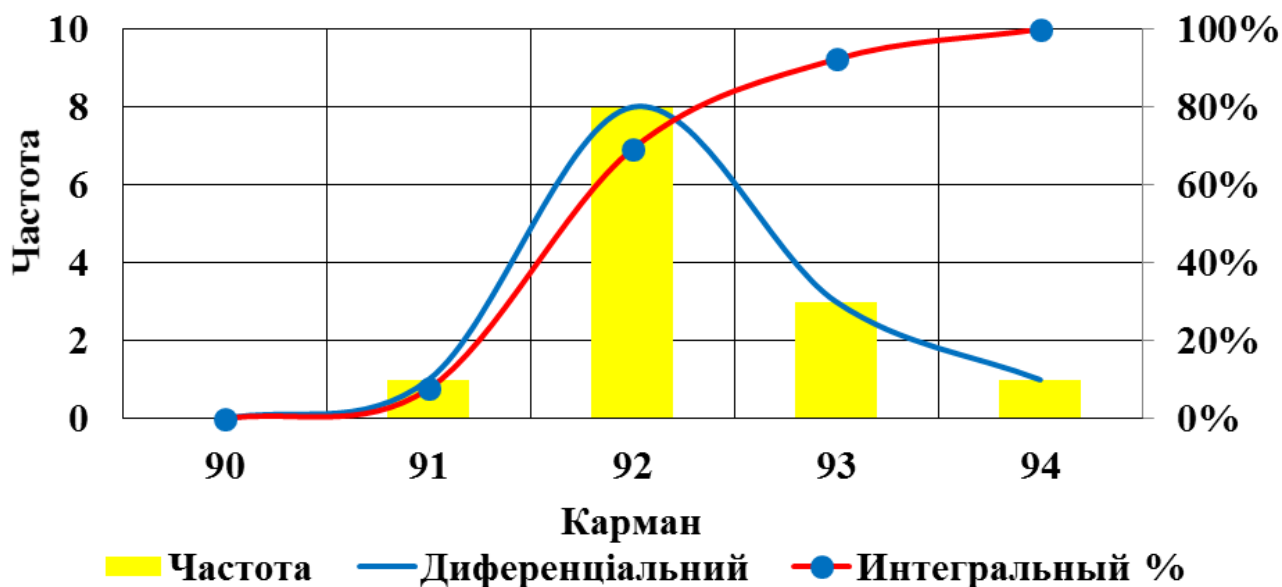


Рис. 4.7. Розподіл значень вологості осаду після відстоювання у відстійнику упродовж 15 діб

Результати досліджень відстоювання стічної змивної води механічних фільтрів із використанням рециркуляційної аквасистеми під час вирощування кларієвого сома підтвердили можливість здійснювати цей процес із високою ефективні-

стю та використанням нескладного обладнання. Слід також відмітити, що ефективність відстоювання стічної води може бути забезпечена при умові подальшої утилізації осаду та відстію.

Використання для відстоювання стічної змивної води механічних фільтрів та отриманого осаду за допомогою мірних циліндрів та експериментальних відстійників показало суттєву відмінність отриманих результатів. Це обумовлено динамічним режимом відстоювання у відстійнику, який працював у безперервному режимі, а також ущільненням осаду під дією ваги самого осаду та стічної води у відстійнику. На це слід звертати увагу при використанні різних типів вимірювального обладнання для дослідження відстоювання, оскільки отримані результати будуть мати лише попередній характер порівняно із використанням відстійників.

Було встановлено, що вміст твердих речовин у відстояній стічній воді після відстійника становив  $0,07 \pm 0,015$  г/л, у той же час вміст твердих речовин у рециркуляційній воді після механічного фільтра мав значення на рівні  $0,057 \pm 0,023$  г/л. Таким чином, відстій стічної води після відстійника відповідає із незначним перевищенням рециркуляційній воді після механічного фільтра. Така ситуація дозволяє використовувати відстійник на заміну механічного фільтра в рециркуляційній аквасистемі. Заміна механічного фільтра відстійником дасть можливість видаляти із рециркуляційної аквасистеми лише осад із відстійника, кількість якого становитиме, на основі аналізу відстоювання у мірних циліндрах, не більше 7% від кількості стічної змивної води механічних фільтрів. Зважаючи на те, що вміст твердих речовин у осаді, отриманому у відстійнику становив  $32,453 \pm 0,663$  г/л, що приблизно в 30 разів більше, ніж при відстоюванні в мірних циліндрах, кількість осаду, який потребуватиме утилізації різко скоротиться. Це суттєво зменшить навантаження на навколишнє середовище. Однак із іншого боку, заміна механічного фільтра відстійником можливе лише для рециркуляційних аквасистем із незначними обсягами рециркуляційної води.

Дослідження показали доцільність створення системи відстоювання на основі двох відстійників: перший – для відстоювання стічної змивної води механіч-

них фільтрів; другий: – для відстоювання осаду, отриманого на першій стадії відстоювання. Відстій, отриманий на першій стадії відстоювання, може бути повернутий у рециркуляційну систему аквакультури у випадку ефективної роботи системи біологічної очистки рециркуляційної води.

### 4.3 Результати досліджень питомого виходу біогазу із ущільненого осаду рециркуляційної системи аквакультури

Після проведення експерименту та обробки експериментальних даних було встановлено (табл. 4.3), що поточне розрахункове значення рівня анаеробного зброджування СОР ущільненого осаду РСА можна представити наступним експоненціальним виразом:

$$\alpha = \alpha_0 [1 - \exp(-k_F \tau_F)] = 0,74 [1 - \exp(-0,108 \tau_F)] \quad (4.1)$$

де  $\alpha$  – поточне розрахункове значення рівня анаеробного зброджування СОР, відн. од.;  $\alpha_0=0.74$  відн. од. – максимальне значення рівня анаеробного зброджування СОР (згідно розрахунків наведених в табл. 4.5);  $k_F=0.108$  відн. од./добу – швидкість анаеробної ферментації СОР (згідно розрахунків наведених в табл. 4.3);  $\tau_F$  – час анаеробної ферментації, діб.

Встановлено, що значення рівня анаеробного зброджування СОР можна представити експоненціальною залежністю. Отримана залежність (4.1) знаходиться в межах довірчого інтервалу результатів експериментальних досліджень, а тому адекватно їх описує. Аналіз залежності, яка визначає середнє значення рівня розкладу СОР (рис. 4.8) показав, що максимальний рівень розкладу СОР під час анаеробного зброджування досягнутий за 38 діб становив 0,74 відн. од. При цьому параметр, який характеризує швидкість процесу розкладу СОР під час анаеробного зброджування осаду стічних вод аквакультури становив 0,108 відн. од. за добу.

Таблиця 4.3. Вихідні дані для розрахунку максимального рівня анаеробного збродження СОР та швидкості анаеробної ферментації

Час ( $\tau$ ) анаероб- ної ферме- нтації, діб	Середній рівень розкладу органіч- ної речо- вини, відн. од.	Віднос- ний рі- вень роз- кладу органіч- ної реч- овини, відн. од.	Розрахункові вели- чини			$\ln \tau$	Розрахун- ковий рі- вень роз- кладу орга- нічної речо- вини, відн. од.
			-	-	-		
0,0	0,000	0	-	-	-	-	0,000
1,0	0,073	0,098	1,109	0,103	-2,271	-0,017	0,075
2,5	0,163	0,220	1,282	0,249	-1,391	0,912	0,175
3,7	0,242	0,327	1,487	0,397	-0,925	1,307	0,244
5,0	0,316	0,427	1,745	0,557	-0,586	1,616	0,311
7,0	0,393	0,532	2,135	0,759	-0,276	1,944	0,393
8,6	0,458	0,619	2,627	0,966	-0,035	2,154	0,449
11,1	0,509	0,688	3,210	1,166	0,154	2,406	0,517
14,0	0,581	0,786	4,670	1,541	0,433	2,642	0,578
16,0	0,627	0,848	6,583	1,884	0,634	2,772	0,609
20,8	0,661	0,893	9,360	2,236	0,805	3,035	0,662
37,7	<b>0,740</b>		<b>-2,223</b>	<b>0,108</b>	-3,459	18,769	0,727

Графік значень рівня анаеробного збродження СОР за кожною повторні-

стю, середнє значення рівня анаеробного зброджування COP та розрахункове значення рівня анаеробного зброджування COP приведено на рис. 4.8.

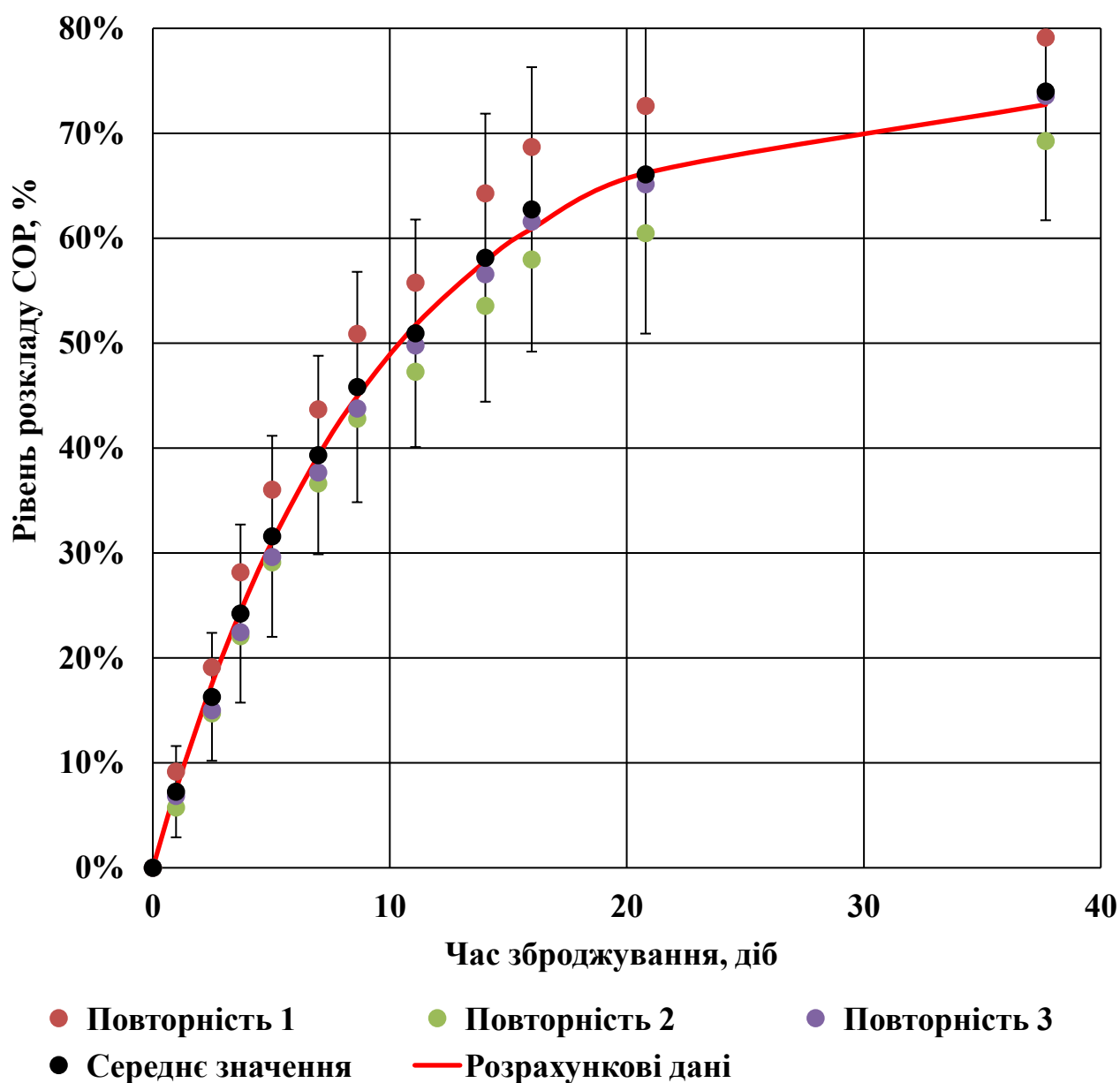


Рис. 4.8. Експериментальна залежність рівня розкладу COP від часу зброджування

Отримана залежність (4.1) була використана для опису реальних умов анаеробного зброджування, коли в біогазовому реакторі знаходиться декілька порцій осаду, які знаходяться на різних стадіях рівня розкладу COP. У повному обсязі ця

методика приведена в [142]. У такому випадку визначення параметрів анаеробного зброджування можна провести на основі розрахункового значення інтегрального середнього рівня анаеробного зброджування COP на основі (4.1):

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 \left[ 1 - \exp(-k_F \tau_F) \frac{\tau_L}{\tau_F + \tau_L} \sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_F}{\tau_L}} \exp(k_F \tau_L i) \right] = \\ &= 0,74 \left[ 1 - \exp(-0,108 \tau_F) \frac{\tau_L}{\tau_F + \tau_L} \sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_F}{\tau_L}} \exp(0,108 \tau_L i) \right] \end{aligned} \quad (4.2)$$

де  $n=\tau_F/\tau_L$  – кількість завантажених порцій біомаси у біогазовому реакторі, од.;  $\tau_F$  – час зброджування (загальний час перебування біомаси в реакторі), діб;  $\tau_L$  – періодичність завантаження біогазового реактора, діб;  $i=0 \dots n=0 \dots \tau_F/\tau_L$  – нумерація завантажених порції біомаси у біогазовий реактор.

Інтегральна середня швидкість розкладу органічної біомаси під час анаеробної ферментації, як диференціал виразу (4.2), становитиме:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{d\tau_F} &= \alpha_0 k_F \exp(-k_F \tau_F) \frac{\tau_L}{\tau_F + \tau_L} \sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_F}{\tau_L}} \exp(k_F \tau_L i) = \\ &0,74 \times 0,108 \exp(-0,108 \tau_F) \frac{\tau_L}{\tau_F + \tau_L} \sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_F}{\tau_L}} \exp(0,108 \tau_L i) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Результати визначення інтегральних рівня та швидкості анаеробного зброджування COP в умовах анаеробного зброджування, коли в біогазовому реакторі знаходиться декілька порцій осаду, згідно виразів (4.2) та (4.3) приведено на рис. 4.9 та 4.10.

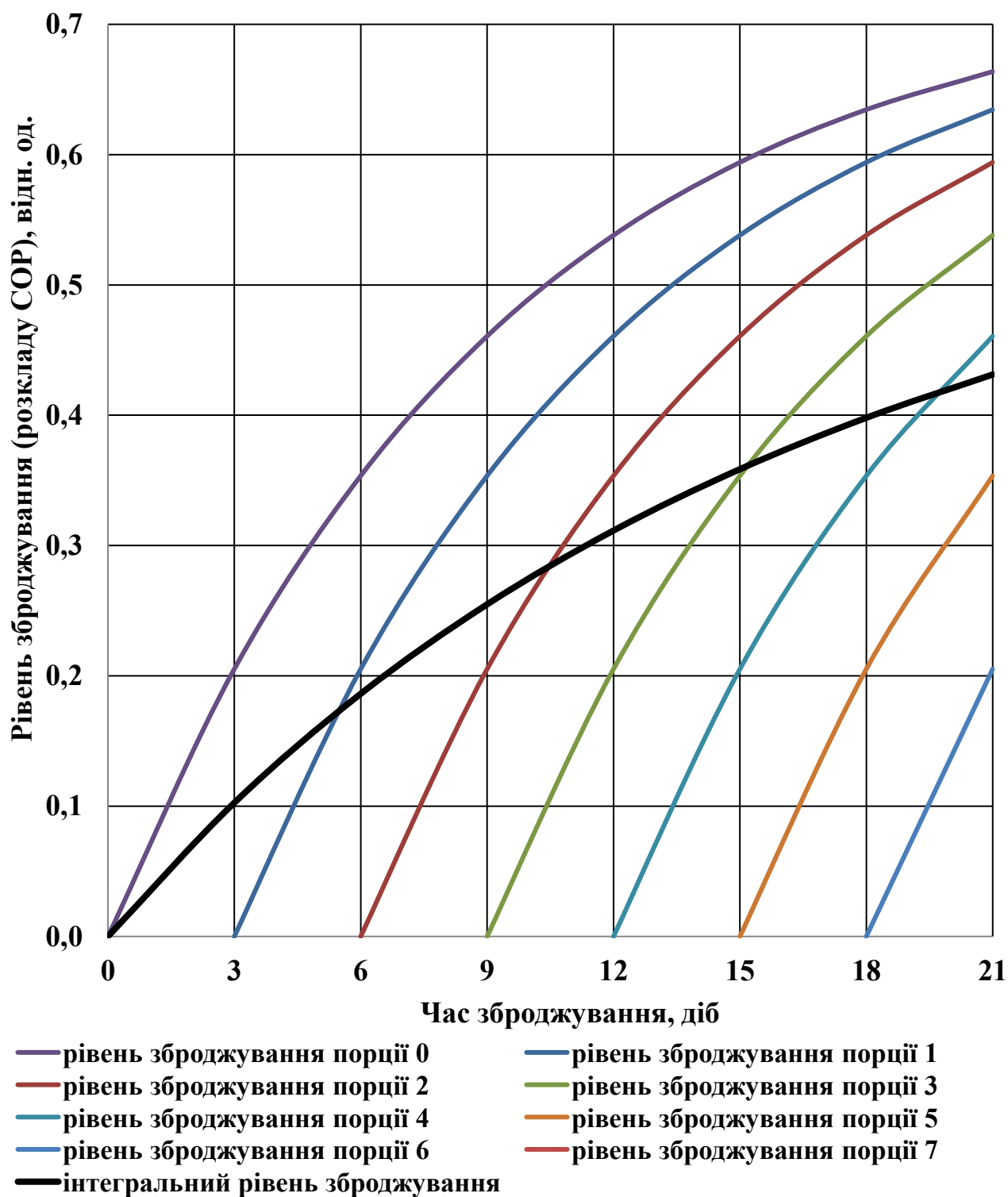


Рис. 4.9. Рівень розкладу органічної біомаси осаду під час анаеробної ферментації при часі збродження  $\tau_F=21$  діб, періодичності завантаження біогазового реактора  $\tau_L=3$  доби та кількості завантажених порцій в реакторі  $n=7$  шт.

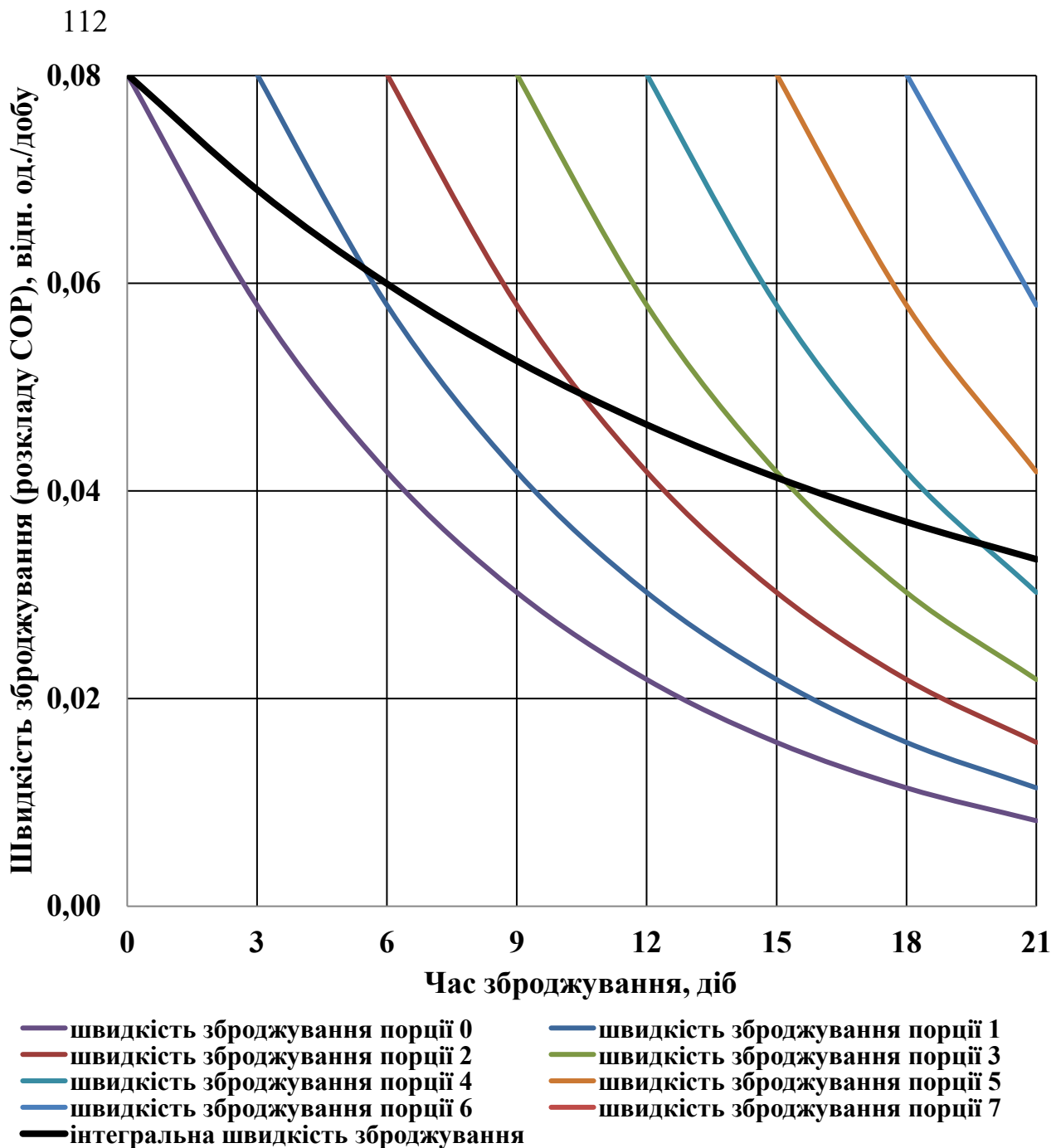


Рис. 4.10. Швидкість розкладу органічної біомаси осаду під час анаеробної ферментації при часі збродження  $\tau_F=21$  діб, періодичності завантаження біогазового реактора  $\tau_L=3$  доби та кількості завантажених порцій в реакторі  $n=7$  шт.

Розрахунки показують, що інтегральний рівень розкладу COP упродовж 21 доби анаеробного збродження може досягати лише 0,43 відн. од. Очевидно, що це обумовлено тим, що кожна порція біомаси в реакторі, крім першої, має рівень

розкладу СОР менший, ніж перша порція. Було встановлено, що інтегральна швидкість розкладу СОР максимальна у початковий момент зброджування і на 21 добу встановлюється на рівні 0,033 відн. од. за добу. Отримані рівняння (4.2) та (4.3) можуть бути використані для оцінки інтенсивності зброджування при заданому часі зброджування, періодичності завантаження біогазового реактора та кількості завантажених порцій в реакторі.

Результати досліджень виходу біогазу та метану під час анаеробної ферментації наведені у графічному вигляді на рис. 4.11.

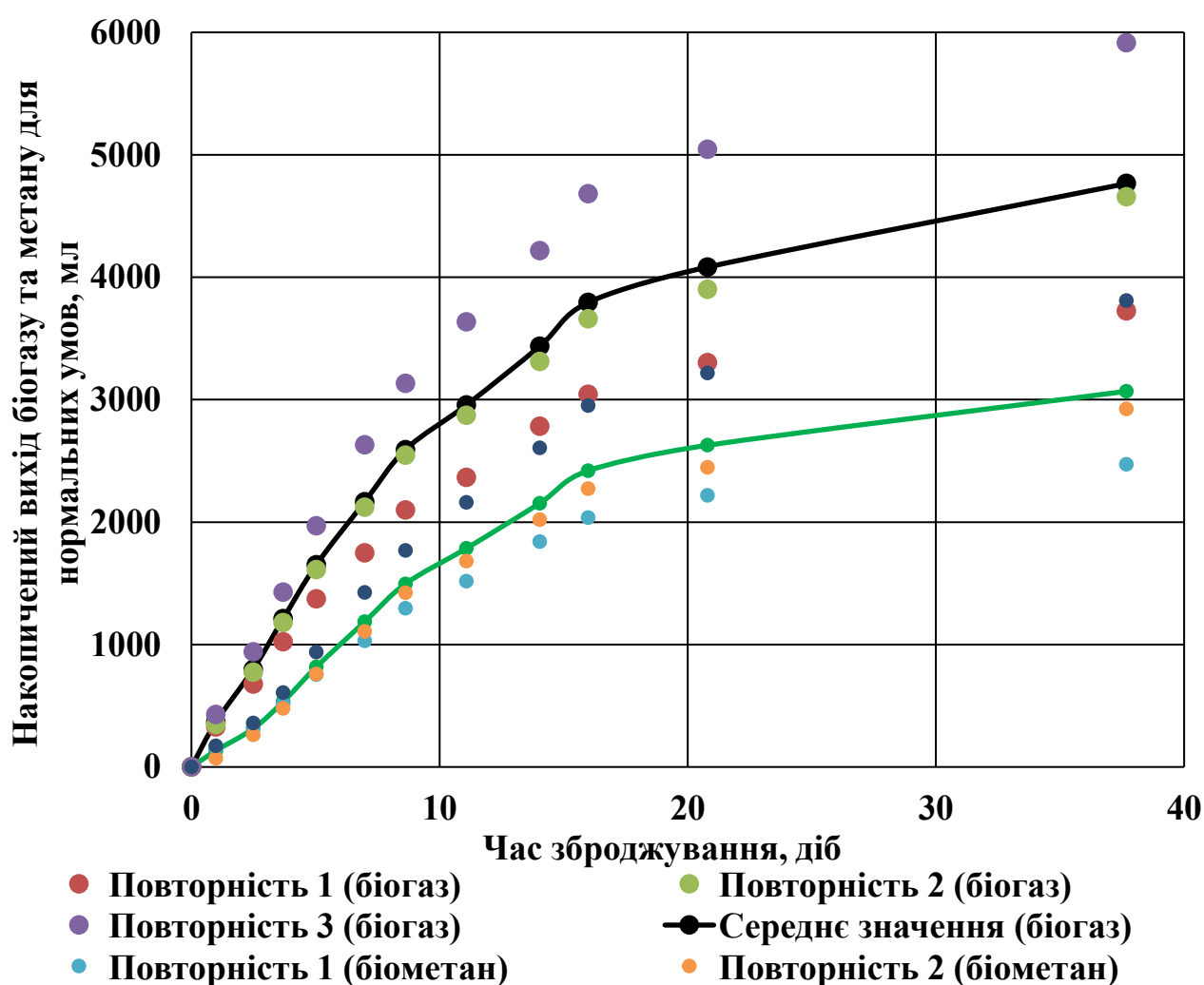


Рис. 4.11. Експериментальна залежність накопиченого виходу біогазу та метану для нормальних умов від часу зброджування

Експериментальна залежність концентрації метану в біогазі від часу зброджування наведено на рис. 4.12.

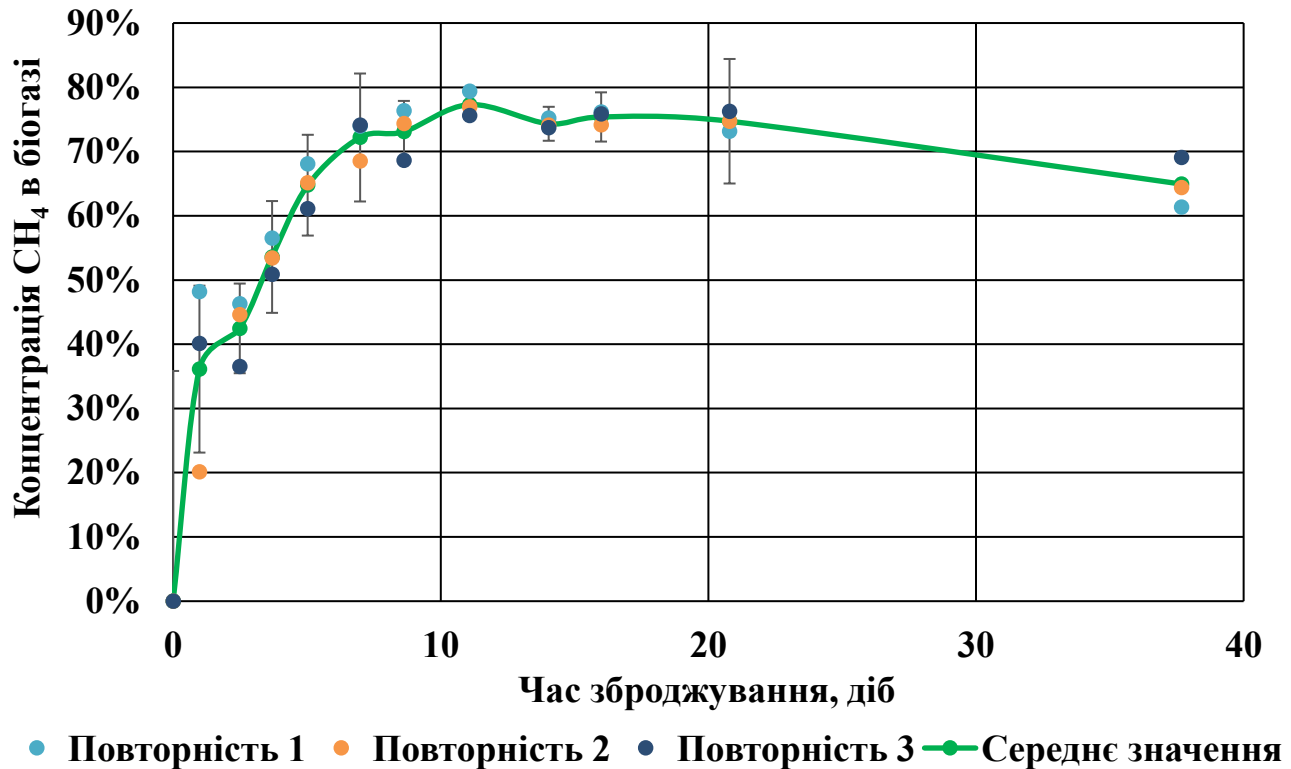


Рис. 4.12. Експериментальна залежність концентрації метану в біогазі від часу збродження

Аналіз результатів досліджень виходу відповідно біогазу та метану під час анаеробної ферментації (рис. 4.11) показав, що ці значення на 21 добу анаеробного збродження становлять 4,083 та 2,627 л. При цьому концентрація метану в біогазі на 7 добу збродження досягала 74–75% і трималася на цьому рівні до 21 доби (рис. 4.12). У подальшому, до 38 доби концентрація метану в біогазі рівномірно знижувалася до 64–65%. Отримані результати необхідні для оцінки енергетичної ефективності анаеробного збродження осаду стічних вод аквакультури.

Після обробки експериментальних даних також було встановлено (табл. 4.4), що поточне розрахункове значення питомого виходу метану можна представити наступним експоненціальним виразом:

$$\gamma = \gamma_0 [1 - \exp(-k_{BM}\tau_F)] = 585,393 [1 - \exp(-0,21\tau_F)] \quad (4.4)$$

де  $\gamma$  – поточне розрахункове значення питомого виходу метану, мл (н.у.)/г СОРр;  $\gamma_0=585.393$  мл (н.у.)/г СОРр – максимальне значення виходу метану (згідно розрахунків наведених в табл. 4.4);  $k_{BM}=0.21$  мл (н.у.)/г СОРр/добу – швидкість зміни питомого виходу метану (згідно розрахунків наведених в табл. 4.4);  $\tau_F$  – час анаеробної ферментації, діб.

Таблиця 4.4. Вихідні дані для розрахунку максимального рівня питомого виходу метану та швидкості його зміни

Час анаеробної ферментації, діб	Середній рівень питомого виходу CH <sub>4</sub> , мл (н.у.)/г СОРр	Відносний рівень питомого виходу CH <sub>4</sub> , відн. од.	Розрахункові величини			LN( $\tau$ )	Розрахунковий рівень питомого виходу CH <sub>4</sub> , мл (н.у.)/г СОРр
			-	-	-		
0,0	0,000	0	-	-	-	-	0
1,0	257,458	0,440	1,785	0,579	-0,546	-0,017	109,282
2,5	276,284	0,472	1,894	0,639	-0,448	0,912	238,409
3,7	316,284	0,540	2,175	0,777	-0,252	1,307	316,099
5,0	370,651	0,633	2,726	1,003	0,003	1,616	382,050
7,0	429,228	0,733	3,749	1,321	0,279	1,944	450,452
8,6	465,126	0,795	4,867	1,583	0,459	2,154	489,767
11,1	497,973	0,851	6,696	1,902	0,643	2,406	528,389
14,0	526,600	0,900	9,957	2,298	0,832	2,642	554,734
16,0	547,111	0,935	15,292	2,727	1,003	2,772	565,053
20,8	564,005	0,963	27,370	3,309	1,197	3,035	577,982
37,7	<b>585,393</b>		<b>-1,560</b>	<b>0,210</b>	3,169	18,769	585,180

Отримана залежність (4.4) знаходиться в межах довірчого інтервалу результатів експериментальних досліджень, що дозволяє зробити висновок про її адекватність. Аналіз залежності, яка визначає середнє значення питомого виходу метану (рис. 4.13) показав, що максимальний рівень питомого виходу метану під час анаеробного зброджування досягнутий на 38 добу становив 585,393 мл (н.у.)/г СОРр. При цьому параметр, який характеризує швидкість зміни величини питомого виходу метану під час анаеробного зброджування осаду стічних вод аквакультури становив 0.210 мл (н.у.)/г СОРр/добу.

Графік значень питомого виходу метану на одиницю маси розкладеної СОР за кожною повторністю, середнє значення питомого виходу метану та розрахункове значення питомого виходу метану приведено на рис. 4.13.

В умовах анаеробного зброджування в біогазовому реакторі знаходиться декілька порцій осаду, які знаходяться на різних стадіях рівня розкладу СОР, а відповідно і питомого виходу метану. У такому випадку визначення питомого виходу метану на одиницю маси розкладеної СОР можна провести на основі розрахункового значення інтегрального середнього питомого виходу метану на основі (4.4):

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_0 \left[ 1 - \exp(-k_{BM}\tau_F) \frac{\tau_L}{\tau_F + \tau_L} \sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_F}{\tau_L}} \exp(k_{BM}\tau_L i) \right] = \\ &= 585,393 \left[ 1 - \exp(-0,21\tau_F) \frac{\tau_L}{\tau_F + \tau_L} \sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_F}{\tau_L}} \exp(0,21\tau_L i) \right] \end{aligned} \quad (4.5)$$

Результати визначення інтегральних рівня питомого виходу метану в умовах анаеробного зброджування, коли в біогазовому реакторі знаходиться декілька порцій осаду, згідно виразу (4.5) приведено на рис. 4.14.

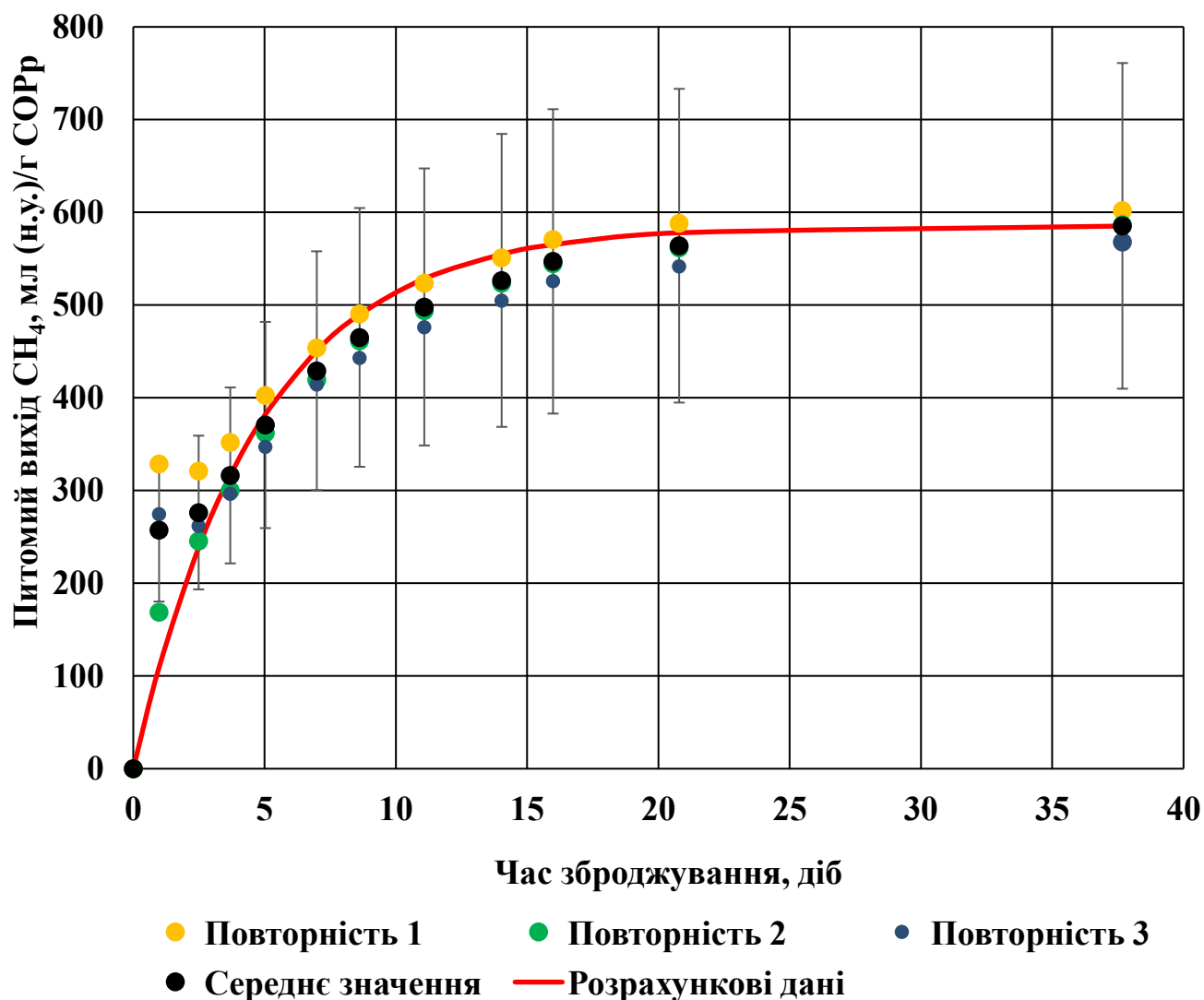


Рис. 4.13. Експериментальна залежність питомого виходу метану на одиницю маси розкладеної СОР від часу збродження

Отримана залежність (4.5) визначає інтегральний питомий вихід метану. Розрахунки показують, що інтегральний питомий вихід метану упродовж 21 доби анаеробного збродження може досягати лише 430 мл (н.у.)/г СОРр. Очевидно, що це обумовлено тим, що кожна порція біомаси в реакторі, крім першої, має питомий вихід метану менший, ніж перша порція. Рівняння (4.5) може бути використано для оцінки інтегрального питомого виходу метану при заданому часі збродження, періодичності завантаження біогазового реактора та кількості завантажених порцій в реакторі.

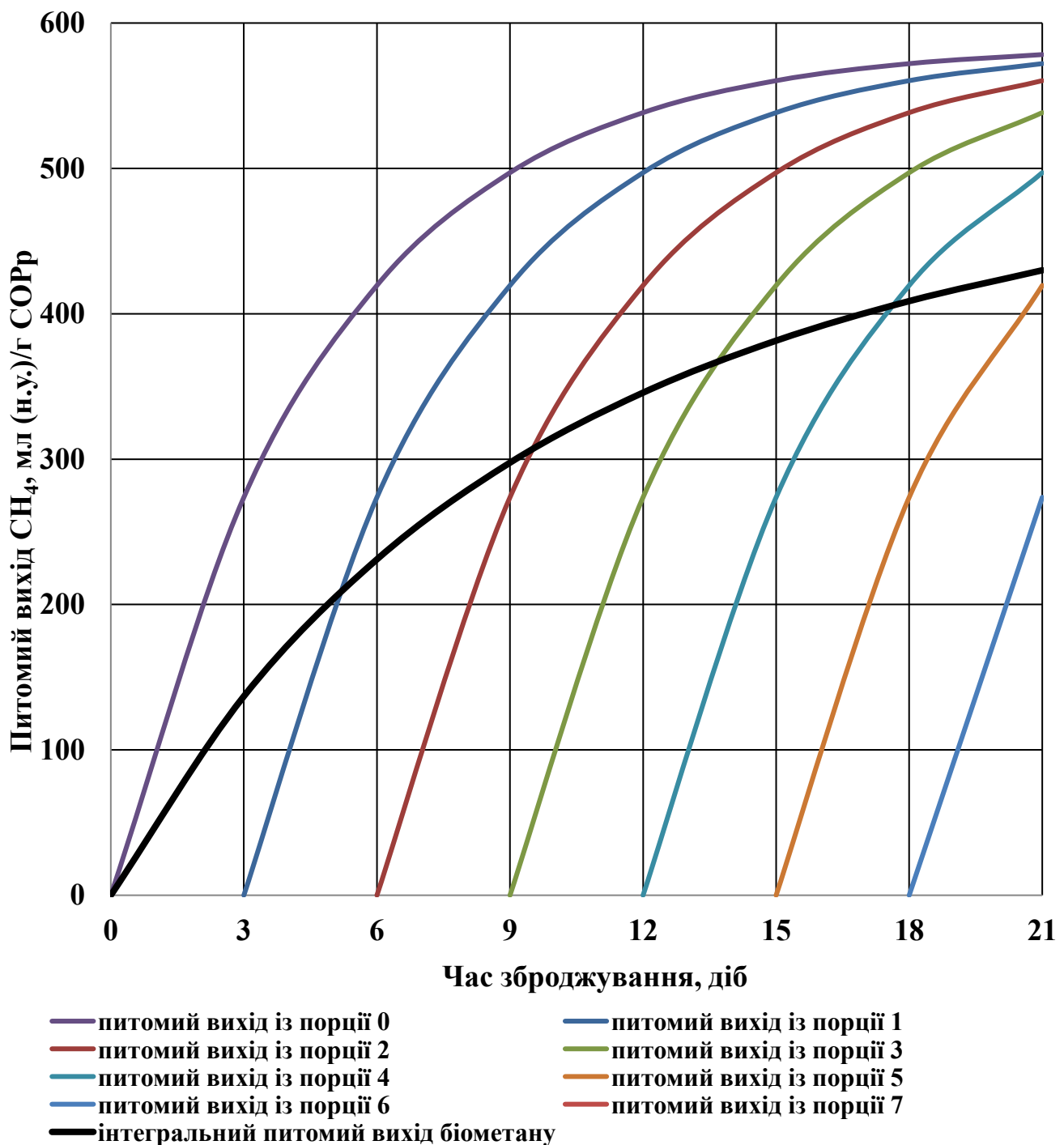


Рис. 4.14. Питомий вихід метану під час анаеробної ферментації при часі збродження  $\tau_F=21$  діб, періодичності завантаження біогазового реактора  $\tau_L=3$  доби та кількості завантажених порцій в реакторі  $n=7$  шт.

Питомий вихід метану на одиницю об'єму біомаси в реакторі залежить від вмісту органічної маси в реакторі і визначається швидкістю розкладу органічної

біомаси осаду та питомим виходом метану із одиниці об'єму розкладеної органічної біомаси. Це може бути формалізовано наступним чином:

$$\eta = \rho \left(1 - \frac{W}{100}\right) \frac{VS}{100} \frac{d\alpha}{d\tau_F} \gamma \quad (4.6)$$

де  $\eta$  – питомий вихід метану на одиницю об'єму біомаси в біогазовому реакторі, м<sup>3</sup>/т доби<sup>-1</sup>;  $\rho$  – густина біомаси, т/м<sup>3</sup>;  $W$  – вологість біомаси, %;  $VS$  – вміст сухої органічної речовини в біомасі;  $\gamma$  – питомий вихід метану на одиницю маси розкладеної СОР, м<sup>3</sup> (н.у.)/т СОР<sub>р</sub>.

Розрахунок питомого виходу метану на одиницю біомаси в біогазовому реакторі згідно виразу (4.6) приведено на рис. 4.15.

Залежність (4.6) визначає питомий вихід метану на одиницю біомаси в реакторі в залежності від вмісту органічної маси в реакторі, швидкості її розкладання та питомого виходу метану із одиниці розкладеної органічної біомаси.

Дані дослідження узагальнюють визначення питомого виходу метану на одиницю розкладеної СОР в залежності від часу анаеробного зброджування. Було визначено рівень розкладу СОР, питомий вихід метану на одиницю розкладеної СОР для умов анаеробного зброджування осаду стічних вод аквакультури. Дослідження дозволили запропонувати удосконалений вираз для визначення питомого виходу метану на одиницю об'єму біомаси під час анаеробної ферментації та визначити його оптимальне значення в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора. Це стало можливим завдяки визначенню експериментальних залежностей рівня анаеробного зброджування СОР та питомого виходу метану у перерахунку на нормальні умови та із розрахунку на 1 г розкладеної СОР. Добуток цих величин являє собою питомий вихід метану на одиницю маси розкладеної СОР за добу. Пов'язавши цей показник із густиною біомаси, з'являється можливість отримати значення питомого виходу метану на одиницю об'єму біомаси під час анаеробної ферментації.

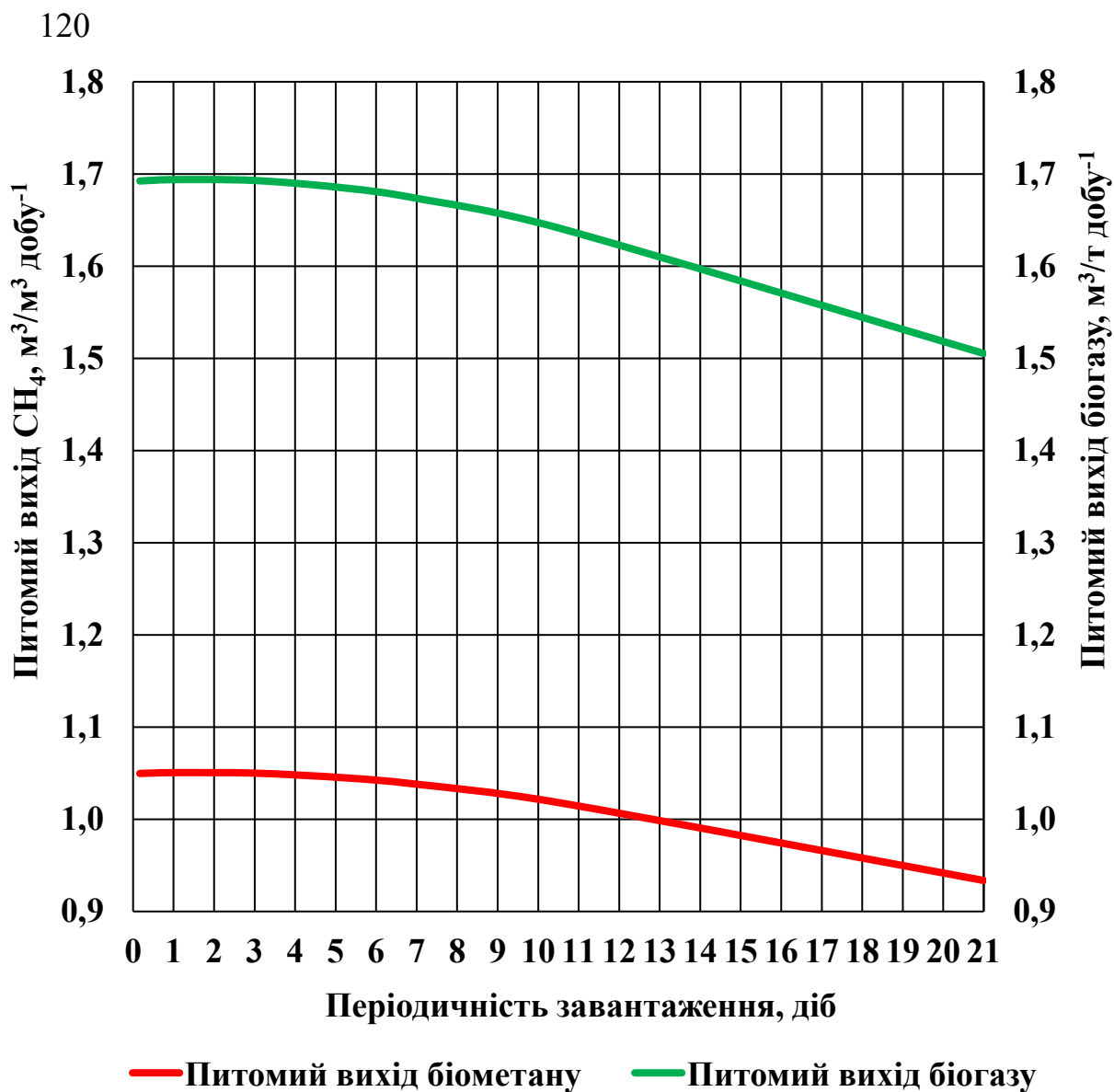


Рис. 4.15. Питомий вихід метану на одиницю об'єму біомаси та питомий вихід метану на одиницю біомаси під час анаеробної ферментації в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора при часі зброджування  $\tau_F=21$  доба

Встановлено, що при часі зброджування 21 доба, питомий вихід метану під час анаеробної ферментації має максимальне значення в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора. Це значення становить  $1,05 \text{ м}^3$  метану на один кубічний метр біомаси в реакторі за одну добу та  $1,69 \text{ м}^3$  біогазу на один тону біомаси в реакторі за одну добу при періодичності завантаження біогазового реактора від 1 до 3 діб.

#### 4.4 Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень

Отримані дані дозволяють розрахувати питомий вихід метану та біогазу на одиницю біомаси в біогазовому реакторі (рис. 4.15). Із урахуванням щільності біомаси на рівні  $1,05 \text{ т/м}^3$ , розрахункове значення виходу метану із реактора за нормальних умов становило  $1,42\text{--}1,43 \text{ м}^3$  метану на одну тону біомаси в реакторі за одну добу. Із урахуванням концентрації метану в біогазі на рівні  $74\text{--}75\%$ , значення виходу біогазу із реактора за нормальних умов становитиме  $1,9\text{--}1,92 \text{ м}^3$  на одну тону біомаси в реакторі за одну добу. Фактичний вихід біогазу на основі аналізу даних проведених досліджень біогазових установок [143, 144, 145, 146, 147, 148] становив:  $2 \text{ м}^3/\text{т}$  біомаси за добу (температура зброджування  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , вологість біомаси  $96,2\%$ , час зброджування 5 діб);  $1,1 \text{ м}^3/\text{т}$  біомаси за добу (температура зброджування  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , вологість біомаси  $99,5\%$ , час зброджування 10 діб);  $1,2 \text{ м}^3/\text{т}$  біомаси за добу (температура зброджування  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , вологість біомаси  $93,7\%$ , час зброджування 9 діб);  $2,65 \text{ м}^3/\text{т}$  біомаси за добу (температура зброджування  $54 \text{ }^\circ\text{C}$ , вологість біомаси  $93,6\%$ , час зброджування 5 діб);  $1,04 \text{ м}^3/\text{т}$  біомаси за добу (температура зброджування  $38 \text{ }^\circ\text{C}$ , вологість біомаси  $94,1\%$ , час зброджування 16 діб);  $1,46 \text{ м}^3/\text{т}$  біомаси за добу (температура зброджування  $35\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ , вологість біомаси  $95,2\%$ , час зброджування 14 діб). При цьому невідомими залишилися такі показники як густина біомаси, вміст органічної маси, максимальний рівень та швидкість розкладу органічної біомаси, вихід біогазу із розкладеної органічної маси за нормальних умов та об'ємний вмісту метану в біогазі, а також інтегральні значення рівня та швидкості розкладу органічної біомаси, що не дозволяє більш точно оцінити адекватність запропонованого алгоритму розрахунку виходу біогазу та метану із реактора за нормальних умов. Якщо провести усереднення отриманих даних, отримаємо вихід біогазу на рівні  $1,58 \text{ м}^3/\text{т}$  біомаси за добу. Ця величина відрізняється від отриманої нами розрахункової величини виходу біогазу із реактора за нормальних умов на  $6,5\%$ , що свідчить про те, що при наявності більш точних даних про параметри біомаси, наявності залежності рівня розкладу органічної складової біомаси

від часу анаеробного зброджування та відомих умовах зброджування біомаси, запропонований алгоритм розрахунку питомого виходу біогазу під час роботи біогазового реактора в режимі періодичного завантаження може успішно застосовуватися у наукових дослідженнях та для оцінки процесу виробництва біогазу діючими установками.

#### 4.5 Висновки по розділу 4

1. Результати досліджень по відстоюванню стічної змивної води механічних фільтрів із використанням рециркуляційної аквасиситеми під час вирощування кларієвого сома підтвердили можливість здійснювати цей процес із високою ефективністю та використанням нескладного обладнання у випадку забезпечення подальшої утилізації осаду та відстію.

2. Вміст твердих речовин у відстоюній стічній воді після відстійника становив  $0,07 \pm 0,015$  г/л, у той же час вміст твердих речовин у рециркуляційній воді після механічного фільтра мав значення на рівні  $0,057 \pm 0,023$  г/л, що дозволяє використовувати відстійник на заміну механічного фільтра в рециркуляційній системі аквакультури під час вирощування кларієвого сома. Така заміна дасть можливість видаляти із рециркуляційної аквасиситеми лише осад із відстійника, кількість якого становитиме, на основі аналізу відстоювання у мірних циліндрах, не більше 7% від кількості стічної змивної води механічних фільтрів.

3. Встановлено, що середнє значення ефективності видалення твердих речовин у мірних циліндрах становила 99,2%, а у відстійнику – 91,9%. Це свідчить про доцільність створення системи відстоювання на основі двох відстійників: перший – для відстоювання стічної змивної води механічних фільтрів; другий: – для відстоювання осаду, отриманого на першій стадії відстоювання, що дасть змогу суттєво зменшити кількість осаду для подальшої утилізації шляхом анаеробного зброджування з метою отримання біогазу.

4. Відстоювання осаду безпосередньо у відстійнику упродовж 15 діб дозволило отримати диференційний та інтегральний розподіл результатів визначення во-

логості осаду. Було встановлено, що вологість осаду на рівні 92% може бути отримана після відстоювання осаду упродовж 15 діб із ймовірністю 69,23%. Що стосується вологості осаду на рівні 93%, то її можна отримати після відстоювання осаду упродовж 15 діб із ймовірністю 92,31%.

5. Встановлено, що експоненціальна залежність адекватно описує експериментальні дані зміни рівня розкладу СОР ущільненого осаду стічних вод аквакультури в залежності від часу анаеробного зброджування. Максимальний рівень розкладу СОР під час анаеробного зброджування досягнутий за 38 діб становив 0,74 відн. од. При цьому параметр, який характеризує швидкість процесу розкладу СОР під час анаеробного зброджування осаду стічних вод аквакультури становив 0,108 відн. од. за добу. У той же час інтегральний середній рівень розкладу СОР упродовж 21 доби анаеробного зброджування може досягати лише 0,43 відн. од., а інтегральна середня швидкість розкладу СОР встановлюється на рівні 0,033 відн. од. за добу.

6. Встановлено, що вихід біогазу та метану під час анаеробної ферментації на 21 добу анаеробного зброджування становлять 4,083 та 2,627 л відповідно. При цьому концентрація метану в біогазі на 7 добу зброджування досягала 74–75% і трималася на цьому рівні до 21 доби, у подальшому, до 38 доби концентрація метану в біогазі рівномірно знижувалася до 64–65%.

7. Встановлено, що експоненціальна залежність адекватно описує експериментальні дані зміни питомого виходу метану на одиницю розкладеної СОР в залежності від часу анаеробного зброджування. Максимальний рівень питомого виходу метану під час анаеробного зброджування досягнутий на 38 добу становив 585,393 мл (н.у.)/г СОРр. При цьому параметр, який характеризує швидкість зміни величини питомого виходу метану під час анаеробного зброджування осаду стічних вод аквакультури становив 0,21 мл (н.у.)/г СОРр за добу. У той же час інтегральний питомий вихід метану упродовж 21 доби анаеробного зброджування може досягати лише 430 мл (н.у.)/г СОРр.

8. Встановлено, що при часі зброджування 21 доба, питомий вихід метану під

час анаеробної ферментації має максимальне значення в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора. Це значення становить  $1,05 \text{ м}^3$  метану на один кубічний метр біомаси в реакторі за одну добу при періодичності завантаження біогазового реактора один раз за час від 1 до 3 діб. Із урахуванням щільності біомаси на рівні  $1,05 \text{ т/м}^3$  та концентрації метану в біогазі на рівні 59%, значення виходу біогазу із реактора за нормальних умов становитиме  $1,69 \text{ м}^3$  на одну тону біомаси в реакторі за одну добу, що не більше, ніж на 6,5% перевищує середні значення, що приводяться в літературних джерелах, де досліджувався вихід біогазу.

**РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ВИРОБНИЧОЇ ПЕРЕВІРКИ ТА ОЦІНКИ  
ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ  
БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БІОГАЗОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ  
ОСАДУ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СМСТЕМ АКВАКУЛЬТУРИ**

**5.1 Інженерна методика розрахунку параметрів процесу та результати впровадження результатів досліджень**

Дослідження показали доцільність створення системи відстоювання стічної промивної води механічних фільтрів на основі двох відстійників: перший – для відстоювання стічної змивної води механічних фільтрів; другий: – для відстоювання осаду, отриманого на першій стадії відстоювання. Відстій, отриманий на першій стадії відстоювання, може бути повернутий у систему РСА у випадку ефективної роботи системи біологічної очистки рециркуляційної води.

Очевидно, що робочий об'єм першого відстійника можна визначити за виразом:

$$V_1 = t_1 q, \quad (5.1)$$

де  $V_1$  – робочий об'єм першого відстійника, л;  $t_1$  – час утримання стічної змивної води механічних фільтрів у першому відстійнику, хв;  $q$  – обсяг стічної змивної води механічних фільтрів, л/хв.

Річний вихід відстію при відстоюванні стічної змивної води механічних фільтрів у першому відстійнику становитиме:

$$Q_1 = \frac{1440 \cdot 365}{1000} (1 - k_1) q, \quad (5.2)$$

де  $Q_1$  – обсяг відстію із першого відстійника, л/хв; 1440 хв/добу – кількість хвилин у одній добі; 365 діб/рік – кількість діб у одному році; 1000 л/м<sup>3</sup> – кількість хвилин у одній добі;  $k_1$  – коефіцієнт виходу осаду із першого відстійника, відн. од.

Річний вихід осаду при відстоюванні стічної змивної води механічних фільтрів у першому відстійнику становитиме:

$$Q_2 = \frac{1440 \cdot 365}{1000} k_1 q, \quad (5.3)$$

де  $Q_2$  – обсяг осаду із першого відстійника, л/хв.

Робочий об'єм другого відстійника (для відстоювання осаду, отриманого на першій стадії відстоювання) можна визначити за виразом:

$$V_2 = \frac{1440}{1000} t_2 k_1 q, \quad (5.4)$$

де  $V_2$  – робочий об'єм другого відстійника, л;  $t_2$  – час утримання у другому відстійнику осаду із першого відстійника, діб.

Дослідженнями встановлено, що час утримання стічної змивної води механічних фільтрів у першому відстійнику для досягнення максимального рівня відстоювання повинен становити не менше  $t_1=15$  хвилин, коефіцієнт виходу осаду із першого відстійника  $k_1=0.07$  відн. од., час утримання осаду із першого відстійника у другому відстійнику для досягнення максимального рівня відстоювання повинен становити не менше  $t_2=15$  діб, коефіцієнт виходу осаду із другого відстійника  $k_2=0.45$  відн. од.

Річний вихід відстію при відстоюванні осаду, отриманого на першій стадії відстоювання у другому відстійнику становитиме:

$$Q_3 = \frac{1440 \cdot 365}{1000} (1 - k_2) k_1 q, \quad (5.5)$$

де  $Q_3$  – обсяг відстію із другого відстійника, л/хв;  $k_2$  – коефіцієнт виходу осаду із другого відстійника, відн. од.

Річний вихід осаду при відстоюванні осаду, отриманого на першій стадії відстоювання у другому відстійнику становитиме:

$$Q_4 = \frac{1440 \cdot 365}{1000} k_1 k_2 q, \quad (5.6)$$

де  $Q_4$  – обсяг осаду із другого відстійника, л/хв.

Робочий об'єм біогазового реактора (для зброджування осаду, отриманого на другій стадії відстоювання) можна визначити за виразом:

$$V_3 = \frac{1440}{1000} k_1 k_2 q t_3, \quad (5.7)$$

де  $V_3$  – робочий об'єм другого відстійника, л;  $t_3$  – час утримання осаду у біогазовому реакторі, діб.

Річний вихід метану можна визначити за виразом:

$$V_{CH_4} = 365 \eta V_3, \quad (5.8)$$

де  $V_{CH_4}$  – річний вихід метану, м<sup>3</sup>/рік;  $\eta$  – питомий вихід метану у біогазовому реакторі, м<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>/м<sup>3</sup><sub>БМ</sub> добу.

Річне виробництво електроенергії на основі отриманого метану можна визначити за виразом:

$$W_{ЕЛ} = 0,278 V_{CH_4} Q_{CH_4} \frac{k_E}{100} \left( 1 - \frac{k_{ЕБГ}}{100} \right), \quad (5.9)$$

де  $W_{ЕЛ}$  – річне виробництво електроенергії, кВт год/рік; 0,278 кВт год/МДж – коефіцієнт перерахунку МДж у кВт год;  $Q_{CH_4}$  – теплотворна здатність метану, МДж/м<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>;  $k_E$  – ефективність виробництва електроенергії когенераційною (газовий

двигун внутрішнього згорання із електрогенератором) установкою, %;  $k_{ЕБГ}$  – коефіцієнт витрат електроенергії для внутрішніх потреб біогазової установки, %.

Приклад розрахунку об'єму відстійників, виходу осадів та показників біотехнологічного процесу приведена на рис. 5.1.

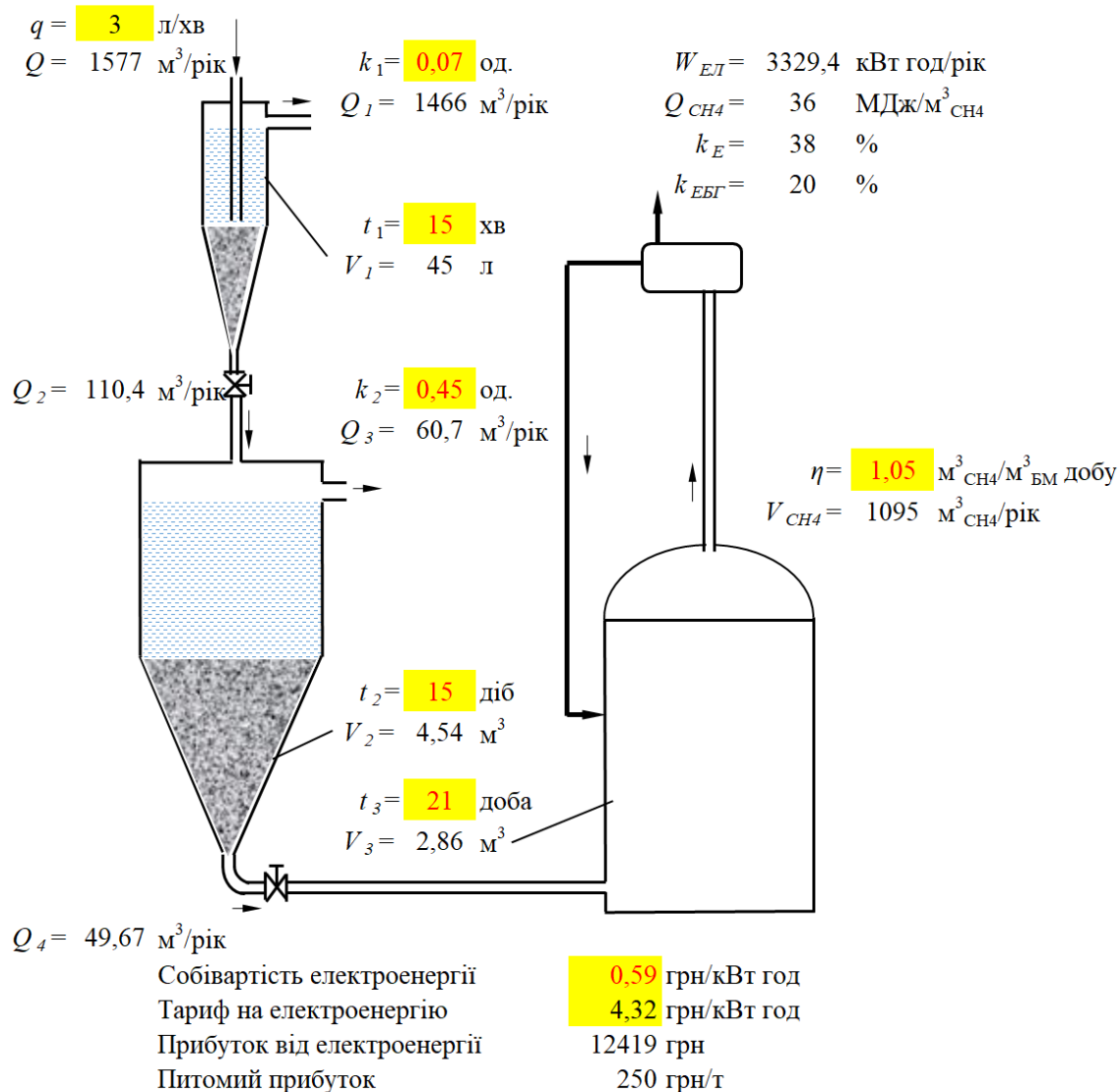


Рис. 5.1. Схема та показники біотехнологічного процесу переробки стічної змивної води механічних фільтрів

Приведений на даному рисунку розрахунок показує, що при обсязі стічної змивної води механічних фільтрів  $Q_1 = 3$  л/хв та у випадку повернення відстійю із обох відстійників у систему РСА, у випадку ефективної роботи системи біологічної очистки рециркуляційної води, кількість осаду, який потребує подальшої утилізації

становить 49,7 м<sup>3</sup>/рік. Це становить біля 3% від загального обсягу стічної змивної води механічних фільтрів.

Використання відстій із відстійників може бути в системах гідропоніки для вирощування овочевих культур або для поливу при вирощуванні польових культур, а осаду після двохстадійного відстоювання для виробництва метану та електроенергії на його основі.

Таким чином встановлено доцільність створення системи відстоювання на основі двох відстійників: перший – для відстоювання стічної змивної води механічних фільтрів; другий: – для відстоювання осаду, отриманого на першій стадії відстоювання, що дасть змогу зменшити кількість осаду для подальшої утилізації до 3% від кількості стічної змивної води механічних фільтрів.

Окремі показники оцінки агрохімічних показників осаду та відстою після відстоювання у відстійнику упродовж доби наведені у табл. 5.1 та у повному обсязі у додатку Е.

Табл. 5.1. Агрохімічні показники осаду та відстою після відстоювання у відстійнику упродовж доби (на вихідну вологу)

Найменування показників	Одиниці вимірювань	Осад	Відстій
Органічна речовина (С)	%	0,04±0,004	–
Масова частка загального азоту (N)	%	0,25±0,003	0,17±0,02
Масова частка аміачного азоту (NH <sub>4</sub> )	%	0,11±0,0001	0,06±0,01
Масова частка загального фосфору (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	%	0,06±0,0005	0,001±0,0001
Масова частка загального калію (K <sub>2</sub> O)	%	0,02±0,002	0,007±0,001
Масова частка загального кальцію (CaO)	%	0,1±0,001	0,005±0,0008
Сольова витяжка	pH	5,93±0,05	6,22±0,02

Результати агрохімічних показників осаду свідчать про можливість використання осаду після відстоювання у відстійнику в якості органічного добрива для овочевих культур при розбавленні з водою у співвідношенні 1:4. Загальний вигляд отриманого осаду під запропонованою торговою маркою «Освак» приведено на рис. 5.2.



Рис. 5.2. Загальний вигляд отриманого осаду під запропонованою торговою маркою «Освак»

Окремі показники оцінки агрохімічних показників осаду та стічної води після відстоювання у відстійнику упродовж 15 діб наведені у табл. 5.2 та у повному обсязі у додатку Є.

Результати агрохімічних показників осаду свідчать про можливість використання осаду після відстоювання у відстійнику упродовж 15 діб в якості органічного добрива для овочевих культур при розбавленні з водою у співвідношенні 1:4,6. Загальний вигляд отриманого осаду під запропонованою торговою маркою «Освак

ущільнений» приведено на рис. 5.3.



Рис. 5.3. Загальний вигляд отриманого осаду під запропонованою торговою маркою «Освак ущільнений»

Табл. 5.2. Агрохімічні показники осаду та відстою після відстоювання у відстійнику упродовж 15 діб (на вихідну вологу)

Найменування показників	Одиниці вимірювань	Осад	Відстій
Органічна речовина (С)	%	1,95±0,05	—
Масова частка загального азоту (N)	%	0,28±0,01	0,05±0,01
Масова частка загального фосфору (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	%	0,28±0,03	0,02±0,003
Масова частка загального калію (K <sub>2</sub> O)	%	0,01±0,002	0,009±0,001
Масова частка загального кальцію (CaO)	%	0,26±0,03	0,008±0,001
Сольова витяжка	pH	5,55±0,01	6,59±0,05

Отримані зразки органічного добрива мають цінність у зв'язку із відсутністю насіння бур'янів та, що стосується «Освака ущільненого», наявністю загального фосфору в тій же кількості (0,28%), що і азоту.

## 5.2 Економічна ефективність процесу біогазового збродження осаду рециркуляційних систем аквакультури

Загальновідомо, що витрати на виробництво метану із осаду рециркуляційних систем аквакультури включають виробничі витрати на одержання метану за вирахуванням перевищення вартості збродженого осаду порівняно із вартістю осаду до збродження:

$$B_{BM} = V_{BM}C_{BM} = m_{LM}C_{LM} - m_{OF}C_{OF} + E_{PBM}, \quad (5.10)$$

звідки виробнича собівартість виробництва метану, з урахуванням того, що  $m_{LM} \approx m_{OF} = m_{PB}$ , становить:

$$\begin{aligned} C_{BM} &= \frac{m_{PB}}{V_{BM}}(C_{LM} - C_{OF}) + E_{BM} = \frac{V_{PB}\rho_{PB}}{V_{BM}}(C_{LM} - C_{OF}) + E_{BM} = \\ &= 365 \frac{V_P\rho_{PB}}{V_{BM}\tau_{FT}}(C_{LM} - C_{OF}) + E_{BM} = \\ &= \frac{\rho_{PB}}{k_{BM}\tau_{FT}}(C_{LM} - C_{OF}) + E_{BM}, \end{aligned} \quad (5.11)$$

а перевищення ціни збродженого осаду порівняно із вартістю осаду до збродження для забезпечення нульової собівартості метану становитиме:

$$C_{OF} - C_{LM} = \frac{E_{BM}k_{BM}\tau_{FT}}{\rho_{PB}} \quad (5.12)$$

або з урахуванням амортизаційних витрат:

$$C_{OF} - C_{LM} = \frac{(E_{BM} + A_{BM})k_{BM}\tau_{FT}}{\rho_{PB}}, \quad (5.13)$$

де  $V_{BM}$  – витрати на виробництво метану, грн;  $V_{BM}$  – об’єм одержаного метану, м<sup>3</sup>;  $C_{BM}$  – виробнича собівартість метану, грн/м<sup>3</sup>;  $m_{LM}$  – маса осаду, що надходить на зброджування, т;  $m_{OF}$  – маса збродженого осаду, т;  $m_{PB}$  – маса переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т;  $C_{LM}$  – ціна осаду, що надходить на зброджування, грн/т;  $C_{OF}$  – ціна збродженого осаду, грн/т;  $E_{PBM}$  – виробничі витрати на виробництво метану без урахування вартості осаду, що надходить на зброджування та збродженого осаду, грн;  $E_{BM}$  – питомі виробничі витрати на виробництво метану, грн/м<sup>3</sup>;  $V_{PB}$  – об’єм переробленої в біогазовому реакторі біомаси, м<sup>3</sup>;  $\rho_{PB}$  – густина переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т/м<sup>3</sup>;  $V_P$  – об’єм біомаси в біогазовому реакторі, м<sup>3</sup>;  $\tau_{FT}$  – час утримання біомаси в реакторі під час зброджування, діб;  $k_{BM}$  – вихід метану за добу із розрахунку на одиницю об’єму біогазового реактора, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> добу;  $A_{BM}$  – амортизаційні витрати на виробництво метану, грн/м<sup>3</sup>.

Подальша деталізація виразу (5.11), шляхом розкриття структури питомих виробничих витрат на виробництво метану, дозволяє записати:

$$C_{BM} = \frac{\rho_{PB}}{k_{BM}\tau_{FT}} (C_{LM} - C_{OF}) + (1 + k_{TE} + k_{GEE})(MAR_{BM} + EL_{BM} + S_{BM}), \quad (5.14)$$

де  $k_{TE}$  – коефіцієнт, що враховує загальнопромислові витрати, відносних од.;  $k_{GEE}$  – коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати, відн. од.;  $MAR_{BM}$  – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництва метану, грн/м<sup>3</sup>;  $EL_{BM}$  – вартість витраченої електричної енергії при виробництві метану, грн/м<sup>3</sup>;  $S_{BM}$  – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві метану, грн/м<sup>3</sup>.

Витрати на виробництво електроенергії на основі метану включають виробничі витрати на одержання метану та електроенергії за вирахуванням перевищення вартості збродженого осаду порівняно із вартістю осаду до зброджування:

$$B_{EL} = W_{EL} C_{EL} = m_{LM} C_{LM} - m_{OF} C_{OF} + E_{PBL}, \quad (5.15)$$

звідки виробнича собівартість виробництва електроенергії на основі метану, з урахуванням того, що  $m_{LM} \approx m_{OF} = m_{PB}$ , становить:

$$\begin{aligned} C_{EL} &= \frac{m_{PB}}{W_{EL}} (C_{LM} - C_{OF}) + E_{EL} = \frac{V_{PB} \rho_{PB}}{W_{EL}} (C_{LM} - C_{OF}) + E_{EL} = \\ &= 365 \frac{V_P \rho_{PB}}{W_{EL} \tau_{FT}} (C_{LM} - C_{OF}) + E_{EL}, \end{aligned} \quad (5.16)$$

а врахувавши, що

$$W_{EL} = \frac{V_{BM} q_{BM} \eta_G}{3,6}, \quad (5.17)$$

отримаємо:

$$\begin{aligned} C_{EL} &= 365 \frac{3,6 V_P \rho_{PB}}{V_{BM} q_{BM} \eta_G \tau_{FT}} (C_{LM} - C_{OF}) + E_{EL} = \\ &= \frac{3,6 \rho_{PB}}{k_{BM} q_{BM} \eta_G \tau_{FT}} (C_{LM} - C_{OF}) + E_{EL}, \end{aligned} \quad (5.18)$$

а перевищення ціни збродженого осаду порівняно із вартістю осаду до збродження для забезпечення нульової собівартості електроенергії на основі метану становитиме:

$$C_{OF} - C_{LM} = \frac{E_{EL} k_{BM} q_{BM} \eta_G \tau_{FT}}{3,6 \rho_{PB}}, \quad (5.19)$$

або з урахуванням амортизаційних витрат:

$$C_{OF} - C_{LM} = \frac{(E_{EL} + A_{EL})k_{BM}q_{BM}\eta_G\tau_{FT}}{3,6\rho_{PB}}, \quad (5.20)$$

де  $B_{EL}$  – витрати на виробництво електроенергії на основі метану, грн;  $W_{EL}$  – кількість виробленої електроенергії, кВт год.;  $C_{EL}$  – виробнича собівартість електроенергії, грн/кВт год.;  $E_{PEL}$  – виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі метану без урахування вартості збродженого осаду та осаду до збродження, грн;  $E_{EL}$  – питомі виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі метану, грн/кВт год.;  $q_{BM}$  – теплотворна здатність метану, МДж/м<sup>3</sup>;  $\eta_G$  – коефіцієнт корисної дії дизель-генератора при отриманні електроенергії, відн. од.; 3,6 – коефіцієнт перерахунку, МДж/кВт год.;  $A_{EL}$  – амортизаційні витрати на виробництво електроенергії на основі метану, грн/кВт год.

Подальша деталізація виразу (5.18), шляхом розкриття структури питомих виробничих витрат на виробництво електроенергії на основі метану, дозволяє записати:

$$C_{EL} = \frac{3,6\rho_{PB}}{k_{BM}q_{BM}\eta_G\tau_{FT}}(C_{LM} - C_{OF}) + E_{EL} + (1 + k_{TE} + k_{GEE})(MAR_{EL} + EL_{EL} + S_{EL}) \quad (5.21)$$

де  $MAR_{EL}$  – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництвом електроенергії, грн/кВт год.;  $EL_{EL}$  – вартість витраченої електричної енергії при виробництві електроенергії на основі метану, грн/кВт год.;  $S_{EL}$  – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві електроенергії на основі метану, грн/кВт год.

Значення коефіцієнтів, що обумовлюють ефективність виробництва метану та електроенергії на його основі, приведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Значення коефіцієнтів для розрахунку собівартості виробництва метану та електроенергії на його основі

Показник	Позначення	Значення
Потреба в біомасі для отримання 1 м <sup>3</sup> метану за час зброджування	$\frac{\rho_{PB}}{k_{BM}\tau_{FT}}$	0,0476 т/м <sup>3</sup> або 47,6 кг/м <sup>3</sup>
Потреба в біомасі для отримання 1 кВт год. електроенергії із метану за час зброджування	$\frac{3,6\rho_{PB}}{k_{BM}q_{BM}\eta_G\tau_{FT}}$	0,0122 т/кВт·год або 12,2 кг/кВт·год
Коефіцієнт, що враховує загальновиробничі та загальногосподарські витрати, відн. од.	$1 + k_{TE} + k_{GEE}$	1,15

Визначимо собівартість виробництва метану при анаеробному зброджуванні осаду рециркуляційних систем аквакультури на основі вихідних даних для розрахунку економічних показників виробництва метану, кількості біомаси, необхідної для отримання 1 м<sup>3</sup> метану за увесь час зброджування та вихідних даних для розрахунку собівартості виробництва метану наведених в таблиці 5.4. Результати розрахунків наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.4. Вихідні дані для розрахунку собівартості виробництва метану

Показник	Позна-	Зна-
для розрахунку економічних показників виробництва метану		
Коефіцієнт, що враховує загальновиробничі витрати, відн. од.	$k_{TE}$	0,05
Коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати, відн. од.	$k_{GEE}$	0,1
Відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки, грн/м <sup>3</sup>	$MAR_{BM}$	1,32
Вартість витраченої електричної енергії на виробництво, грн/м <sup>3</sup>	$EL_{BM}$	0,4
Фонд заробітної плати персоналу з нарахуваннями, грн/м <sup>3</sup>	$S_{BM}$	0,3
для розрахунку кількості біомаси, необхідної для отримання 1 м <sup>3</sup> метану за увесь час зброджування		
Густина біомаси вологістю 92,74 % для переробки в біогазовому реакторі, т/м <sup>3</sup>	$\rho_{PB}$	1,05

Показник	Позна-	Зна-
Вихід метану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> добу	$k_{BM}$	1,05
Час утримання біомаси в реакторі під час зброджування, діб	$\tau_{FT}$	21
для розрахунку собівартості виробництва метану		
Ціна біомаси осаду для зброджування в біогазовому реакторі, грн/т	$C_{LM}$	40
Ціна зброженого в біогазовому реакторі осаду, грн/т	$C_{OF}$	40
Різниця цін біомаси осаду до зброджування в біогазовому реакторі та зброженого осаду, грн/т	$\Delta C$	0

Питомі виробничі витрати на виробництво метану становлять:

$$\begin{aligned}
 E_{BM} &= (1 + k_{TE} + k_{GEE})(MAR_{BM} + EL_{BM} + S_{BM}) = \\
 &= (1 + 0,05 + 0,1)(1,32 + 0,4 + 0,3) = 2,32 \frac{\text{грн}}{\text{м}^3}.
 \end{aligned}
 \tag{5.22}$$

Вихід метану із 1 м<sup>3</sup> біомаси за увесь час зброджування:

$$V_{BM} = k_{BM}\tau_{FT} = 1,05 \cdot 21 = 22,05 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}.
 \tag{5.23}$$

Собівартість виробництва метану становить:

$$\begin{aligned}
 C_{BM} &= \frac{\rho_{PB}}{k_{BM}\tau_{FT}}(C_{LM} - C_{OF}) + E_{BM} = \\
 &= \frac{1,05}{1,05 \cdot 21}(40 - 40) + 2,32 = 2,32 \frac{\text{грн}}{\text{м}^3}.
 \end{aligned}
 \tag{5.24}$$

Прибуток від виробництва метану становить:

$$P_{BM} = P_{NG} - C_{BM} = 7,95689 - 2,32 = 5,63 \frac{\text{грн}}{\text{м}^3}. \quad (5.25)$$

де  $P_{NG}$  – ціна природного газу, грн/м<sup>3</sup>.

Таблиця 5.5. Результати розрахунку економічних показників виробництва метану

Показник	Позначення	Значення
Питомі виробничі витрати на виробництво метану, грн/м <sup>3</sup>	$E_{BM}$	2,32
Вихід метану із 1 м <sup>3</sup> біомаси за увесь час зброджування, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$V_{BM}$	22,05
Кількість біомаси, необхідної для отримання 1 м <sup>3</sup> метану за увесь час зброджування, т/м <sup>3</sup>	$m_{BM}$	0,0476
Собівартість виробництва метану, грн/м <sup>3</sup>	$C_{BM}$	2,32
Ціна природного газу, грн/м <sup>3</sup>	$P_{NG}$	7,95689
Прибуток від виробництва метану, грн/м <sup>3</sup>	$P_{BM}$	5,63

Вихідні дані для розрахунку собівартості виробництва метану в залежності від ціни осаду до зброджування та після зброджування наведені в таблиці 5.6, а результати на рисунку 5.4.

Різниця цін біомаси осаду до зброджування в біогазовому реакторі та після зброджування для забезпечення нульової собівартості метану становитиме:

$$C_{OF} - C_{LM} = \frac{E_{BM} k_{BM} \tau_{FT}}{\rho_{PB}} = \frac{2,32 \cdot 1,05 \cdot 21}{1,05} = 48,78 \text{ грн/т} \quad (5.26)$$

Таблиця 5.6. Вихідні дані для розрахунку собівартості виробництва метану в залежності від ціни осаду до зброджування та після зброджування

Ціна біомаси осаду до збродження в біогазовому реакторі $C_{LM}$ , грн/т								
40	35	30	25	20	15	10	5	0
Ціна осаду після збродження в біогазовому реакторі $C_{OF}$ , грн/т								
40								
Різниця цін біомаси осаду до збродження в біогазовому реакторі та після збродження ( $\Delta C$ ), грн/т								
0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40
Собівартість виробництва метану ( $C_{BM}$ ), грн/м <sup>3</sup>								
2,32	2,08	1,85	1,61	1,37	1,13	0,89	0,66	0,42

Визначимо собівартість виробництва електроенергії на основі метану при анаеробному збродженні осаду рециркуляційних систем аквакультури на основі вихідних даних для розрахунку економічних показників виробництва електроенергії на основі метану, кількості біомаси, необхідної для отримання 1 кВт год. електроенергії на основі метану за увесь час збродження та вихідних даних для розрахунку собівартості виробництва електроенергії на основі метану наведених в таблиці 5.7. Результати розрахунків наведені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.7. Вихідні дані для розрахунку собівартості виробництва електроенергії на основі метану

Показник	Позначення	Значення
Розрахунок економічних показників виробництва електроенергії на основі метану		
Коефіцієнт, що враховує загальновиробничі витрати, відн. од.	$k_{TE}$	0,05

Продовження табл. 5.7

Коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати, відн. од.	$k_{GEE}$	0,1
Відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки, грн/кВт год.	$MAR_{EL}$	0,34
Вартість витраченої електричної енергії на виробництво, грн/кВт год.	$EL_{EL}$	0,1
Фонд заробітної плати персоналу з нарахуваннями, грн/кВт год.	$S_{EL}$	0,07
Розрахунок кількості біомаси, необхідної для отримання 1 кВт год. електроенергії на основі метану за увесь час зброджування		
Густина біомаси вологістю 92 % для переробки в біогазовому реакторі, т/м <sup>3</sup>	$\rho_{PB}$	1,05
Вихід метану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> добу	$k_{BM}$	1,05
Час утримання біомаси в реакторі під час зброджування, діб	$\tau_{FT}$	21
Теплотворна здатність метану, МДж/м <sup>3</sup>	$q_{BM}$	37
Коефіцієнт корисної дії дизель-генератора при отриманні електроенергії, відн. од.	$\eta_G$	0,38
Розрахунок собівартості виробництва електроенергії на основі метану		
Ціна осаду до зброджування в біогазовому реакторі, грн/т	$C_{LM}$	40
Ціна осаду після зброджування в біогазовому реакторі, грн/т	$C_{OF}$	40
Різниця цін біомаси осаду до зброджування в біогазовому реакторі та осаду після зброджування, грн/т	$\Delta C$	0

Питомі виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі метану становлять:

$$\begin{aligned}
 E_{EL} &= (1 + k_{TE} + k_{GEE})(MAR_{EL} + EL_{EL} + S_{EL}) = \\
 &= (1 + 0,05 + 0,1)(0,34 + 0,1 + 0,97) = 0,59 \frac{\text{грн}}{\text{кВт год.}}
 \end{aligned}
 \tag{5.27}$$

Собівартість виробництва електроенергії на основі метану становить:

$$\begin{aligned}
 C_{EL} &= \frac{3,6\rho_{PB}}{k_{BM}q_{BM}\eta_G\tau_{FT}}(C_{LM} - C_{OF}) + E_{EL} = \\
 &= \frac{3,6 \cdot 1,05}{1,05 \cdot 37 \cdot 0,38 \cdot 21}(40 - 40) + 0,59 = 0,59 \frac{\text{грн}}{\text{кВт год.}}
 \end{aligned}
 \tag{5.28}$$

Прибуток від виробництва електроенергії із метану становить:

$$P_{EL} = T_{EL} - C_{EL} = 4,32 - 0,59 = 3,73 \frac{\text{грн}}{\text{кВт год.}}
 \tag{5.29}$$

Таблиця 5.8. Результати розрахунку економічних показників виробництва електроенергії на основі метану

Показник	Позначення	Значення
Питомі виробничі витрати на виробництво метану, грн/кВт год.	$E_{EL}$	0,59
Вихід метану із 1 м <sup>3</sup> біомаси за увесь час зброджування, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$V_{EL}$	22,05
Кількість біомаси, необхідної для отримання 1 кВт год. електроенергії на основі метану за увесь час зброджування, т/кВт год.	$m_{EL}$	0,0122
Собівартість виробництва електроенергії на основі метану, грн/кВт год.	$C_{EL}$	0,59
Ціна електроенергії, грн/кВт год.	$T_{EL}$	4,32

Показник	Позначення	Значення
Прибуток від виробництва електроенергії на основі метану, грн/кВт год.	$P_{EL}$	3,73

Вихідні дані для розрахунку собівартості виробництва електроенергії на основі метану наведені в таблиці 5.9, а результати на рисунку 5.5.

Таблиця 5.9. Вихідні дані для розрахунку собівартості виробництва електроенергії на основі метану в залежності від ціни осаду до зброджування та після зброджування

Ціна біомаси осаду до зброджування в біогазовому реакторі $C_{LM}$ , грн/т								
40	35	30	25	20	15	10	5	0
Ціна осаду після зброджування в біогазовому реакторі $C_{OF}$ , грн/т								
40								
Різниця цін біомаси осаду до зброджування в біогазовому реакторі та осаду після зброджування ( $\Delta C$ ), грн/т								
0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40
Собівартість виробництва електроенергії на основі метану ( $C_{EL}$ ), грн/кВт год.								
0,59	0,53	0,46	0,40	0,34	0,28	0,22	0,16	0,10

Різниця цін біомаси осаду до зброджування в біогазовому реакторі та осаду після зброджування для забезпечення нульової собівартості електроенергії на основі метану становитиме:

$$C_{OF} - C_{LM} = \frac{E_{EL} k_{BM} q_{BM} \eta_G \tau_{FT}}{3,6 \rho_{PB}} =$$

$$= \frac{0,59 \cdot 1,05 \cdot 37 \cdot 0,38 \cdot 21}{3,6 \cdot 1,05} = 48,10 \text{ грн/т} \quad (5.30)$$

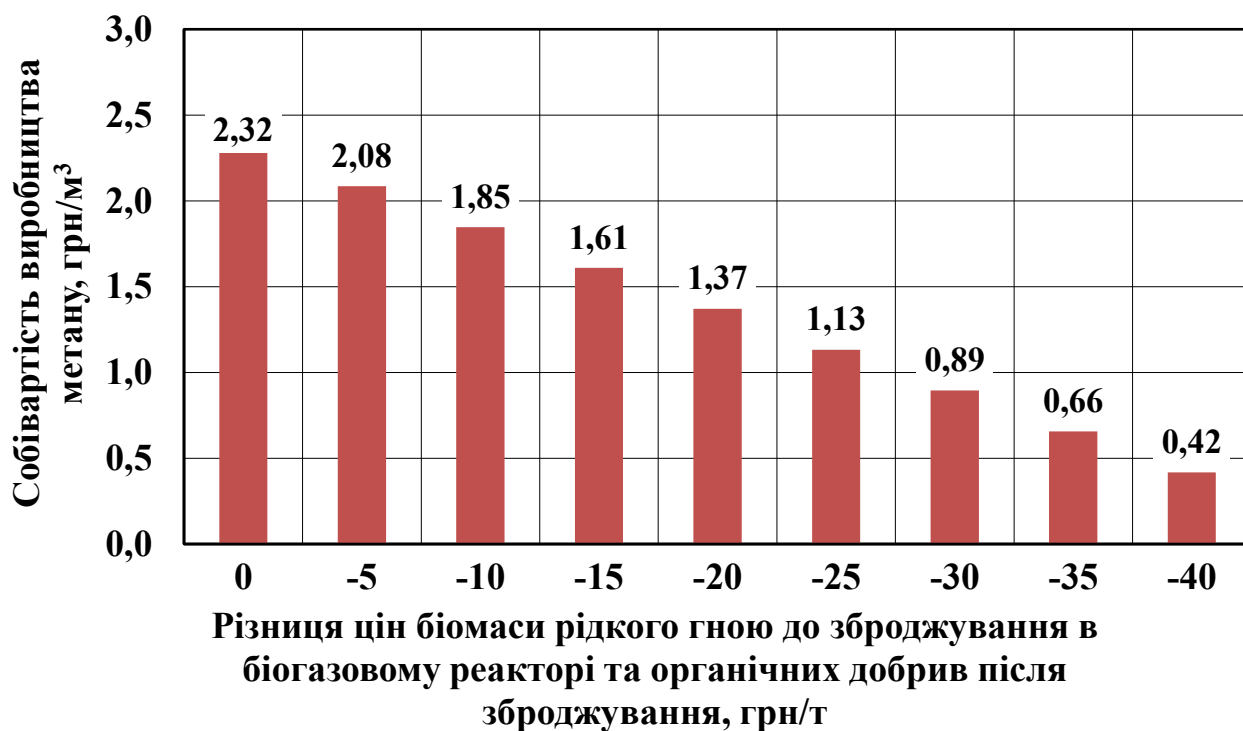


Рис. 5.4. Розрахунок собівартості виробництва метану

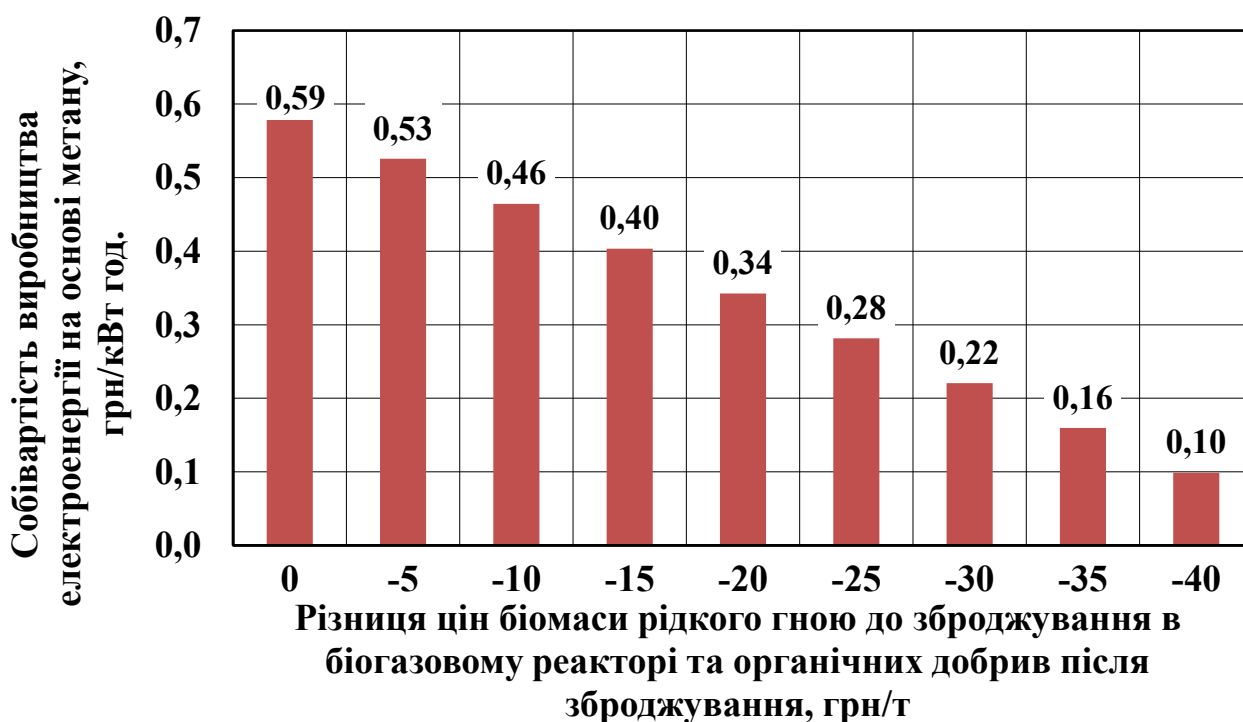


Рис. 5.5. Розрахунок собівартості виробництва електроенергії на основі метану

Таким чином, забезпечення нульової собівартості виробництва метану та виробництва електроенергії на основі метану буде при різниці цін біомаси осаду до зброджування в біогазовому реакторі та зброженого осаду в межах від 48 до 50 грн/т.

У результаті розрахунку економічних показників виробництва метану було встановлено, що при часі зброджування 21 доба, максимальному значенні питомого виходу метану  $1,05 \text{ м}^3$  на один кубічний метр біомаси в реакторі за одну добу, вихід метану із  $1 \text{ м}^3$  біомаси за увесь час зброджування становив  $20,05 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Розрахунковий прибуток від виробництва метану становив  $5,63 \text{ грн}/\text{м}^3$ , прибуток від виробництва електроенергії на основі метану  $3,73 \text{ грн}/\text{кВт год}$ .

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено обґрунтування показників ущільнення осаду та біотехнологічного процесу анаеробного зброджування в метантенках із періодичним завантаженням ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

1. Основним недоліком рециркуляційних системах аквакультури є відсутність можливості утилізації промивної води механічних фільтрів, а тому виробництво метану із ущільненого осаду стічних вод систем штучного вирощування риби сприятиме виробництву додаткової енергії та біологічній деградації органічних речовин, що потребує відповідного наукового обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби.

2. Вихід метану в біотехнологічному процесі анаеробного зброджування біомаси в метантенках із періодичним завантаженням визначається інтегральними середніми швидкостями розкладу органічної біомаси та виходу метану в залежності від часу зброджування та періодичності завантаження біогазового реактора, що дає змогу розробити удосконалений алгоритм розрахунку питомого виходу метану.

3. Встановлено, що перша стадія ущільнення змивної води механічних фільтрів систем штучного вирощування риби дозволяє видаляти осад в кількості 7% від загальної кількості стічної води із вологістю після відстійника на рівні 96-97%. Встановлено також, що друга стадія відстоювання осаду у відстійнику упродовж 15 діб дозволило отримати диференційний та інтегральний розподіл результатів визначення вологості осаду, які показали, що вологість осаду на рівні 92% може бути отримана із ймовірністю 69,23%, а вологість на рівні 93% – із ймовірністю 92,31%.

4. Встановлено, що інтегральний середній рівень розкладу органічної речовини упродовж 21 доби анаеробного зброджування в метантенку із періодичним завантаженням може досягати 0,43 відн. од., а інтегральна середня швидкість розкладу встановлюється на рівні 0,033 відн. од. за добу. Встановлено, що питомий

вихід метану під час анаеробної ферментації має максимальне значення в залежності від періодичності завантаження біогазового реактора. Це значення становить  $1,05 \text{ м}^3$  метану на один кубічний метр біомаси в реакторі за одну добу при періодичності завантаження біогазового реактора від 1 до 3 діб. Із урахуванням щільності біомаси та концентрації метану в біогазі, значення виходу біогазу із реактора за нормальних умов становитиме  $1,69 \text{ м}^3$  на одну тону біомаси в реакторі за одну добу, що не більше, ніж на 6,5% перевищує середні значення, що приводяться в літературних джерелах, де досліджувався вихід біогазу.

5. Розрахунок економічних показників виробництва метану із осаду, отриманого після двохстадійного гравітаційного ущільнення стічних вод систем штучного вирощування риби показав, що при оптимальному значенні питомого виходу метану, розрахунковий прибуток від виробництва метану становив  $5,63 \text{ грн/м}^3$ , а прибуток від виробництва електроенергії на основі метану  $3,73 \text{ грн/кВт год}$ . Впровадження обладнання для підготовки змивної води механічних фільтрів до анаеробного зброджування з метою отримання біогазу із продуктивністю за кількістю змивної води механічних фільтрів  $1577 \text{ м}^3/\text{рік}$  в ТОВ «Аква Систем Органік» дозволить отримати додаткову виручку від реалізації  $10 \text{ тис. грн/м}^3$  ущільненого осаду та додатковий розрахунковий прибуток від виробництва електроенергії на основі метану –  $250 \text{ грн/м}^3$  збродженого осаду.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abreu, M. H., Pereira, R., Yarish, C., Buschmann, A. H., Sousa-Pinto, I. (2011). IMTA with *gracilaria vermiculophylla*: Productivity and nutrient removal performance of the seaweed in a land-based pilot scale system. *Aquaculture*, 312(1-4), 77-87. doi:10.1016/j.aquaculture.2010.12.036.
2. Amon, T., Kryvoruchko, V., Amon, B., Buga, S., Mayer, K., Zollitsch, W., Pötsch, E., (2003): Biogas aus Klee gras, Feldfutter- und Dauerwiesenmischungen. *Der fortschrittliche Landwirt*, 22, 52-53.
3. Amon, T., Kryvoruchko, V., Amon, B., Zollitsch, W., Mayer, K., Buga, S., Amid, A. (2004): Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- bis spätreifen Maissorten. In: Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs: 54. Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft, Höhere Bundeslehranstalt für alpenländische Landwirtschaft: "Züchertagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs", 25. bis 27. November 2003, Raumberg/Trautenfels.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. 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.

9. Fish market [Электронный ресурс] / Компактные установки РСА. – Электрон. дані. – 2018. – Режим доступу: <http://bester.at.ua/news/2010-02-26-7>. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 03.03.2018.

10. Fish-agro [Электронный ресурс] / Барабанные фильтры для РСА. – Электрон. дані. – 2018. – Режим доступу: [http://www.fish-agro.ru/filtre\\_mbf](http://www.fish-agro.ru/filtre_mbf). – Назва з екрану. – Дата перегляду: 01.03.2018.

11. Fish-agro [Электронный ресурс] / П. Шувалов, О. Йоханссон. Биотехнология рыборазведения в установках замкнутого водоснабжения: «шаг за шагом». – Электрон. дані. – Москва-Стокгольм, 2018. – Режим доступу: [http://fish-agro.ru/fish-agro/what\\_about/98-biotehnologiya-ryborazvedeniya-v-ustanovkah-zamknutogo-vodosnabzheniya.html](http://fish-agro.ru/fish-agro/what_about/98-biotehnologiya-ryborazvedeniya-v-ustanovkah-zamknutogo-vodosnabzheniya.html). – Назва з екрану. – Дата перегляду: 01.03.2018.

12. G. Golub, O. Dubrovina. Biomethane formation in biogas installations. – The 8th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes Proceedings: – Poznan, Puszczykowo, Poland. – Industrial Institute of Agricultural Engineering, 25-28th June, 2013. – 72 p. – P. 55-58.

13. 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>.

<http://conf.rd.asu.lt/index.php/rd/article/view/286/337>

14. 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.

<http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N073.pdf>

15. 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.
16. Gebauer, R., and B. Eikebrokk. 2006. Mesophilic anaerobic treatment of sludge from salmon smolt hatching. *Bioresource Technology* 97: 2389–2401.
17. Gebauer, R., J.F. Cabell, and O. Ween. 2016. Biogassproduksjon fra settefiskslam i sentraliserte og desentraliserte biogassanlegg. NIBIO Report 2 (121), Ås, Norway (in Norwegian, English summary).
18. Golub G., Linnik M., Dubrovina O. Technical means for production of biogas. – Науковий вісник Національного аграрного університету. – К., 2007. – Вип. 107. Частина I. – 356 с. – С. 231-237.
19. Golub G.A., Kukharets S.M., Yarosh Y.D., Kukharets V.V. Integrated use of bioenergy conversion technologies in agroecosystems. – *INMATEH-Agricultural Engineering*, vol. 51, no. 1 / 2017, 93-100.
20. 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.
21. 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.* – 58, 1996. – P. 11-22.
22. 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>.
23. 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.

24. 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.

25. Naegel, L.C.A., 1977. Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture*, 10: pp. 17-24.

26. 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.

27. O. Hacke. Biogas von A bis Z./ O. Hacke, M. Helm // Borsig Energy GmbH, 2001. – 47 p.

28. O. Marus, G. Golub, V. Goh. Biogas production basic principles. – *Агротехника и энергообеспечение / Научно-практический журнал посвященный III-й Международной научно-практической конференции «Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства»*. – Орел, Орловский государственный аграрный университет, 2014. – № 1 (1). – 620 с. – С. 117-121.

29. 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.

30. 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. Sot.*, 20: 64A.

31. Rennert, B., Drews, M., 1989. A possibility of combined fish and vegetable production in greenhouses. *Adv. Fish. Sci.*, 8: pp. 19-27.

32. 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.

33. S. Konontcev, L. Sabliy, M. Kozar, N. Korenchuk. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Tinsley, R.L. *Developing Smallholder Agriculture: A Global Perspective*; AgBe Publications: Brussels, Belgium, 2004; p. 585.
38. Watten B.J. Modeling the effects of sequential rearing on the potential production of controlled environment fish-culture systems. – *Aquac. Eng.* – 11, 1992. – P. 33-46.
39. 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 emergent indicators. *Ecological Indicators*, 47, 189-197. doi:10.1016/j.ecolind.2014.04.033.
40. 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.
41. Yogev, 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.

42. 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.

43. Zweig, R.D., 1986. An integrated fish culture hydroponic vegetable production system. *Aquacult. Mag.*, 12: pp. 34-40.

44. А.с. 1161488 СССР. МКИ<sup>4</sup> С 02 F 11/04. Метантенк / У.С. Виестур, В.В. Крикис, В.Д. Прокопенко, А.А. Аделе, В.С. Дубровський (СССР) – №3662403/23-26; Заявлено 14.11.83; Оpubл. 15.06.85, Бюл. №22 // Открытия. Изобретения. – 1985. – №22.

45. А.с. 1198026 СССР. МКИ<sup>4</sup> С 02 F 11/04, 3/28. Установка для производства биогаза / В. Яр, Э-К. Пинтернагел, Х. Кёбке, Х. Мюллер (ГДР) – №7772246/23-26; Заявлено 27.02.81; Оpubл. 15.12.85, Бюл. №46 // Открытия. Изобретения. – 1985. – №46.

46. А.с. 1212981 СССР. МКИ<sup>4</sup> С 02 F 11/04. Устройство для анаэробного сбраживания органической массы / О.Б. Бердыев, Н.Г. Ковалев, Ч.Д. Бекдурдыев, С.Д. Дурдыбаев, Б.Д. Таиров, В.М. Шрамков (СССР) – №3775690/23-26; Заявлено 25.07.84; Оpubл. 23.02.86, Бюл. №7 // Открытия. Изобретения. – 1986. – №7.

47. А.с. 1212982 СССР. МКИ<sup>4</sup> С 02 F 11/04. Устройство для анаэробной обработки сточных вод и осадка / В.А. Яблонский, Е.П. Колесник, А.Г. Кириченко (СССР) – №3775690/23-26; Заявлено 25.07.84; Оpubл. 23.02.86, Бюл. №7 // Открытия. Изобретения. – 1986. – №7.

48. А.с. 1255589 СССР. МКИ<sup>4</sup> С 02 F 11/04. Устройство для анаэробного сбраживания сточных вод и осадка / В.А. Яблонский, Е.П. Колесник, А.Г. Кириченко (СССР) – №3863426/23-26; Заявлено 04.03.85; Оpubл. 07.09.86, Бюл. №33 // Открытия. Изобретения. – 1986. – №33.

49. А.с. 1308568 СССР. МКИ<sup>4</sup> С 02 F 11/04. Метантенк / А.В. Куралесин, В.Е. Троянин, В.И. Уметский, Ю.А. Павлов (СССР) – №3994025/31-26; Заявлено 23.12.85; Оpubл. 07.05.87, Бюл. №17 // Открытия. Изобретения. – 1987. – №17.

50. А.с. 1451103 СССР. МКИ<sup>4</sup> С 02 F 11/04. Реактор для анаэробного сбраживания отходов / Л.М. Ягудин, А.М. Леховицер, Ю.Н. Аллянов, А.В. Ларкин

(СССР) – №4132599/30-13; Заявлено 30.06.86; Оpubл. 15.01.89, Бюл. №2 // Открытия. Изобретения. – 1989. – №2.

51. А.с. 1600630 СССР. МКИ<sup>4</sup> С 02 F 11/04. Ферментатор-газгольдер для производства биогаза из навозной жижи / Б. Балкули, Р. Байрамов, К. Колов, И.Р. Юферов, К.Х. Гуламов, Я. Ахмедов, М. Чопанов, А. Кашанов (СССР) – №4338397/31-26; Заявлено 30.10.87; Оpubл. 15.08.89, Бюл. №30 // Открытия. Изобретения. – 1989. – №30.

52. А.с. 1606468 СССР. МКИ<sup>5</sup> С 02 F 11/04. Установка для получения биогаза / Ш.Ж. Имомов, С.П. Рудобашта, А.Г. Пузанков, Б.Ф. Рахманов, В.И. Бородин (СССР) – №4605072/23-26; Заявлено 14.11.88; Оpubл. 15.11.90, Бюл. №42 // Открытия. Изобретения. – 1990. – №42.

53. А.с. 1623984 СССР. МКИ<sup>5</sup> С 02 F 11/04. Метантенк / А.А. Ковалев, В.П. Лосяков (СССР) – №4646106/26; Заявлено 02.02.89; Оpubл. 30.01.91, Бюл. №4 // Открытия. Изобретения. – 1991. – №4.

54. А.с. 785231 СССР. МКИ<sup>3</sup> С 02 F 11/04. Устройство для анаэробного сбраживания органической массы / В.А. Зуев, А.А. Ковалев, В.М. Шрамков, В.П. Лосяков, П.И. Гиднев (СССР) – №2571722/29-26; Заявлено 20.01.78; Оpubл. 07.12.80, Бюл. №45 // Открытия. Изобретения. – 1980. – №45.

55. А.с. 791652 СССР. МКИ<sup>3</sup> С 02 F 11/04. Метантенк / С.Г. Кучеренко, А.И. Салюк (СССР) – №2701391/29-26; Заявлено 25.12.78; Оpubл. 30.12.80, Бюл. №48 // Открытия. Изобретения. – 1980. – №48.

56. А.с. 947089 СССР. МКИ<sup>3</sup> С 02 F 11/04. Метантенк / Г.А. Никитин, А.И. Салюк (СССР) – №2969651/23-26; Заявлено 08.08.80; Оpubл. 30.07.82, Бюл. №28 // Открытия. Изобретения. – 1982. – №28.

57. А.с. 971828 СССР. МКИ<sup>3</sup> С 02 F 11/04. Метантенк / В.В. Найденко, Ю.Ф. Колесов (СССР) – №3274245/23-26; Заявлено 08.04.81; Оpubл. 07.11.82, Бюл. №41 // Открытия. Изобретения. – 1982. – №41.

58. Баадер В. Биогаз: теория и практика (Пер. с нем. и предисловие М. И. Серебряного.) / Баадер В., Доне Е., Бренндерфер С. // – М.: Колос, 1982 – 148 с.

59. Бизнес идеи [Електронний ресурс] / Разведение осетра. – Електрон. дані. – 2018. – Режим доступу: <http://biznes-proizvodstvo.ru/razvedenie-osetra.html>. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 05.03.2018.

60. Биомасса как источник энергии: Пер. с англ. / Под ред. С. Соуфера, О. Забарски. – М.: Мир, 1985. – 368 с.

61. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві: навч. посіб. / Голуб Г. А., Кухарець С.М., Марус О.А. та ін.; за ред. Г. А. Голуба. – К.: НУБіП України, 2017. – 229 с.

62. 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.

63. Брайнбалле Я. Руководство по аквакультуре в установках замкнутого водоснабжения. – Копенгаген, 2010. – 70 с.

64. Брайнбалле Я. Руководство по аквакультуре в установках замкнутого водоснабжения. Введение в новые экологические и высокопродуктивные замкнутые рыбоводные системы. – Копенгаген, АКВА group Denmark, 2010 г. – 70 с.

65. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П. М. Василенко – К.: УАСХН, 1960. – 284 с.

66. ВашБизнесплан [Електронний ресурс] / Разведение рыбы в домашних условиях как бизнес. – Електрон. дані. – 2018. – Режим доступу: <http://vashbiznesplan.ru/domashnij/razvedenie-ryby-kak-biznes.html>. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 04.03.2018.

67. Вашингтон С. Абабуш Л. Частные стандарты и сертификации в рыболовстве и аквакультуре. Современная практика и возникающие проблемы. – Анкара, 2013 г. – 211 с.

68. Г.А. Голуб, О.А. Завадська. Аквакультура в системі аграрного виробництва. – Збірник 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.: Видавничий центр НУБіП України, 2019. – 384 с. – 336-338.

69. Голуб Г.А. Радіальна швидкість руху компосту в барабанно-пальцевому розпушувачі / Г. А. Голуб // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства "Механізація сільськогосподарського виробництва". – Харків. – 2003. – Вип. 21. – С. 484-491.

70. Голуб Г. А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко-технологічні основи / Г. А. Голуб. – К.: Аграрна наука, 2007. – 332 с.

71. Голуб Г. А. Аналіз рівнянь руху матеріальної частинки по радіальній лопатці обертового барабана / Г. А. Голуб, О. А. Марус // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК – К.: 2016. – Вип. 251. – 408 с. – С. 43-53.

72. Голуб Г. А. Визначення мінімальної граничної кутової швидкості для забезпечення відцентрового руху частинки по радіальній лопатці обертового барабана / Г. А. Голуб, О. А. Марус // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК – К.: 2016. – Вип. 254. – 440 с. – С. 37-44.

73. Голуб Г., Войтенко В., Рубан Б, Єрмоленко В. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок. – Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18-21.

74. Голуб Г., Кухарець С., Рубан Б. Особливості конструкції модульної біогазової установки з обертовим реактором. – Техніка і технології АПК. – 2014. – № 9 (60). – С. 10-14.

75. Голуб Г., Рубан Б., Дубровіна О. Інженерно-економічні проблеми створення біогазових установок. – Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. – Дослідницьке, 2005. – Вип. 8 (22). Книга 2. – 308 с. – С. 147-156.

76. Голуб Г.А. Енергетична автономність агросистем. – Вісник аграрної науки. – 2010. – № 3. – С. 50-54.

77. Голуб Г.А., Горобець Р.В., Дубровіна О.В. Біоконверсія органічної сировини агроценозів у штучних умовах із виробництвом біогазу та печериць. – Науковий вісник Національного аграрного університету. – К., 2005. – Вип. 80. Частина I. – 398 с. – С. 218-222.

78. Голуб Г.А., Гох В.В. Використання жому і меляси в суміші з соломою для виробництва біогазу. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші. – К., 2012. – Вип. 170, ч. 2. – 387 с. – С. 74-80.

79. Голуб Г.А., Дубровіна О.В. Кінетика анаеробної ферментації рослинної біомаси. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші. – К., 2013. – Вип. 185, ч. 2. – 395 с. – С. 296-301.

80. Голуб Г.А., Дубровіна О.В. Обґрунтування рівня занурення та коефіцієнта заповнення біомасою обертового метантенка. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші. – К., 2012. – Вип. 170, ч. 2. – 387 с. – С. 55-61.

81. Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Войтенко В.О., Гох В.В. Аналіз метаноутворення в біогазових установках. – Сучасні проблеми збалансованого природокористування: Збірник наукових праць / Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ); Науковий редактор: Бахмат М.І. – Кам'янець-Подільський, 2012. – Спеціальний випуск до VII науково-практичної конференції. – 334 с. – С. 141-145.

82. Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Рубан Б.О., Войтенко В.О. Технічне забезпечення виробництва біогазу. – Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вінниця, 2012. – Вип. 10. – 186 с. – С. 17-19.

83. Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Чуба В.В., Павленко М.Ю. Експериментальне визначення питомої потужності перемішування біомаси в обертовому реакторі. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші. – К., 2013. – Вип. 185, ч. 1. – 372 с. – С. 272-277.

84. 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. – С. 75-78.

85. Голуб Г.А., Завадська О.А. Стан та перспективи розвитку установок замкнутого водопостачання для аквакультури. – Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь. Матеріали доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, 28-29 березня 2018 р. – Житомир, ЖАТК, 2018. – 327 с. – С. 29-32.

86. Голуб Г.А., Завадська О.А., Кухарець В.В. Розробка блок-схем установки замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури. – Науковий журнал Житомирського агроєкологічного університету «Наукові горизонти». – ЖНАЕУ: 2019. – № 5 (78). – С. 105-111.

87. Голуб Г.А., Кухарець С.М. Визначення параметрів руху частинок біомаси під час обертання метантенка. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редколегія: С.М. Ніколаєнко (відповідальний редактор) та інші – К.: 2015. – Вип. 212, ч. 2. – 336 с. – С. 254-264.

88. Голуб Г.А., Марус О.А., Ярош Я.Д. Аналіз руху частинки по радіальній лопатці обертового барабана з урахуванням опору середовища. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК [Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK] / Редколегія:

С.М.Ніколаєнко (відповідальний редактор) та інші. – К.: 2017. – Вип. 258. – 418 с. – С. 28-39.

89. Група компаній «Марвей» [Електронний ресурс] / Осетроводство в РСА. – Електрон. дані. – 2018. – Режим доступу: <http://fish.marway.in.ua/about/>. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 06.03.2018.

90. Електронний ресурс: [www.weltec-biopower.de](http://www.weltec-biopower.de).

91. Завадська О.А. Голуб Г.А. Тенденції розвитку виробництва продукції аквакультури в установках замкнутого водопостачання. – Кліматичні зміни та сільське господарство. Виклики для аграрної науки та освіти. Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції за участю ФАО, 13-14 березня 2018 р. – Київ, Агроосвіта, 2018. – 791 с. – С. 301-303.

92. 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 2017р.): Зб. наук. статей. – Львів: НУ «Львівська політехніка» – 325 с. – С. 121-122.

93. Кононенко Р.В. Використання установки замкнутого водопостачання при інтенсифікації виробництва риби продукції. – Рибогосподарська наука України. – №2, 2013. – С. 56-65.

94. Кухарець С.М., Голуб Г.А. Отримання енергії із сировини сільськогосподарського походження. – Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016. – Вип. 6, Т. 1. – С. 80-98.

95. Кухарець С.М., Голуб Г.А. Сировинна база та ефективність виробництва біогазу. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редколегія: С.М. Ніколаєнко (відповідальний редактор) та інші – К.: 2015. – Вип. 212, ч. 1. – 335 с. – С. 11-20.

96. Малий бізнес [Електронний ресурс] / Разведение раков в РСА. – Електрон. дані. – 2018. – Режим доступу: <http://businessideas.com.ua/business->

ideas/razvedenie-rakov-v-domashnikh-usloviyakh. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 02.03.2018.

97. Марченко Н.М. Механизация внесения органических удобрений / Н. М. Марченко, Г. И. Личман, А. Е. Шебалкин. – М.: ВО “Агропромиздат”, 1990. – 207 с.

98. Мовсесов Г.Є. Основні положення технології біогазового (анаеробного метанового) зброджування органічних відходів / Мовсесов Г.Є., Ляшенко О.О. // Рекомендації Інститут механізації тваринництва НААН України. – Запоріжжя: ІМТ НААН України, 2010. – 29 с.

99. Молодик М.В., Голуб Г.А., Лук'янець В.О., Рубан Б.О., Вірьовка М.І. Енергоавтономність виробництва на основі біологічних видів палива. – Вісник аграрної науки. – 2008. – № 11. – С. 39-44.

100. Пасторек З., Кара Я., Линник Н.К., Голуб Г.А., Таргоня В.С. Производство биогаза из смеси органических материалов. – Науковий вісник Національного аграрного університету. – К., 2006. – Вип. 95. Частина I. – 284 с. – С. 144-149.

101. Патент 21889 Україна. МКІ<sup>6</sup> С 02 F 11/04. Спосіб переробки відходів / Стюарт Е. Еріксон (США) – №93101337; Заявлено 27.07.93; Опубл. 30.04.98, Бюл. №2 // Промислова власність. Офіційний бюлетень. – 1998. – №2.

102. Патент 278486 НДР, МКІ А 01 G 4. Verfahren zur Herstellung von Champignonkultursubstraten / P. Schencke, G. Vollmer, G. Riechel, M. Schon, G. Franzke (НДР); Institut fur Biotechnologie. – №3238511; Заявл. 23.12.88; Опубл. 09.05.90. – 3 с.

103. Патент на винахід 101226. Україна. МПК С02F 11/04, С02F 3/28. Метантенк / Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Маєвська А.Г., Рубан Б.О.– Заявка № а 2011 06300; Заявлено 19.05.2011; Опубліковано 11.03.2013, Бюл. № 5. – 6 с.

104. Патент на винахід 103843. Україна. МПК С02F 11/04. Гідрогравітаційний метантенк / Голуб Г.А., Рубан Б.О., Войтенко В.О. – Заявка № а 2012 09576; Заявлено 06.08.2012; Опубліковано 25.11.2013, Бюл. № 22. – 6 с.

105. Патент на винахід 110077. Україна. МПК C02F 11/04, C02F 3/28. Метантенк / Голуб Г.А., Кухарець С.М. – Заявка № а 2014 09259; Заявлено 19.08.2014; Опубліковано 10.11.2015, Бюл. № 21. – 4 с.

106. Патент на винахід 111008. Україна. МПК C02F 11/04, C02F 3/28. Гідрогравітаційний метантенк / Голуб Г.А., Рубан Б.О., Чуба В.В., Гох В.В., Дворник А.В., Захарченко М.М., Швець Р.Л. – Заявка № а 2014 08080; Заявлено 17.07.2014; Опубліковано 10.03.2016, Бюл. № 5. – 3 с.

107. Патент на винахід 113249. Україна. МПК C02F 11/04, A01C 3/02, C02F 3/28, C02F 103/20. Метантенк / Голуб Г.А., Швець Р.Л., Завадська О.А., Чуба В.В., Дворник А.В., Гох В.В. – Заявка № а 2016 11159; Заявлено 13.11.2015; Опубліковано 26.12.2016, Бюл. № 24. – 3 с.

108. Патент на винахід 113264. Україна. МПК C12M 1/06, C12M 1/00. Біогазовий реактор для твердофазної ферментації / Голуб Г.А., Марус О.А. – Заявка № а 2016 01387; Заявлено 16.02.2016; Опубліковано 26.12.2016, Бюл. № 24. – 3 с.

109. 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.

110. Патент на винахід 74718. Україна. МПК C02F 11/04. Метантенк / Голуб Г.А., Рубан Б.О., Дубровіна О.В. – Заявка № 2004 0503534; Заявлено 12.05.2004; Опубліковано 16.01.2006, Бюл. № 1 // Промислова власність. Офіційний бюлетень. – 2006. – №1. – 5 с.

111. Патент на винахід 81154. Україна. МПК C02F 11/04. Метантенк / Лінник М.К., Мельничук М.Д., Дубровін В.О., Голуб Г.А., Таргоня В.С., Рубан Б.О., Дубровіна О.В. – Заявка № а 2005 11162; Заявлено 25.11.2005; Опубліковано 10.12.2007, Бюл. № 20. – 3 с.

112. Патент на винахід 89305. Україна. МПК C02F 11/04, C02F 3/28. Метантенк / Голуб Г.А., Рубан Б.О., Дубровіна О.В. – Заявка № а 2008 08070; Заявлено 13.06.2008; Опубліковано 11.01.2010, Бюл. № 1. – 4 с.

113. Патент на винахід 97995. Україна. МПК C02F 11/04, C02F 3/28, C02F 3/06, C12P 5/00. Метантенк / Голуб Г.А., Рубан Б.О., Дубровіна О.В.– Заявка № а 2010 02089; Заявлено 25.02.2010; Опубліковано 10.04.2012, Бюл. № 7. – 5 с.

114. 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.

115. Патент на корисну модель 125463. Україна. МПК А01К 61/00. Установа замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури / Голуб Г.А., Маєвська А.Г., Завадська О.А., Щербак С.Д. – Заявка № и 2017 12145; Заявлено 11.12.2017; Опубліковано 10.05.2018, Бюл. № 9. – 2 с.

116. 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 № и 2017 12146; Заявлено 11.12.2017; Опубліковано 10.05.2018, Бюл. № 9. – 2 с.

117. 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 № и 2017 12147; Заявлено 11.12.2017; Опубліковано 10.05.2018, Бюл. № 9. – 2 с.

118. Патент на корисну модель 43263 Україна. МПК (2009) С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г.С. Ратушняк, К.В. Анохіна (Україна) – Заявка № u200902331; Заявлено 16.03.09; Опубл. 10.08.09.

119. Патент на корисну модель 48079 Україна. МПК (2009) С 02 F 11/04, C02F 3/28. Установка для зброджування твердих та рідких органічних відходів з одержанням біогазу і добрива / Г.Є. Мовсесов, О.О. Ляшенко, Т.В. Сюркалова (Україна) – Заявка № u200908171; Заявлено 03.08.09; Опубл. 10.03.10.

120. Проскуренко И.В. Замкнутые рыбоводные установки. – М.: Изд-во ВНИРО, 2003. – 152 с.

121. Рубан Б.О., Голуб Г.А., Драгнєв С.В., Дубровіна О.В. Основні проблеми створення біогазових установок. – Науковий вісник Національного аграрного університету. – К., 2004. – Вип. 73. Частина I. – 354 с. – С. 195-201.

122. Руководство по биогазу. От получения до использования / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). 5-е издание. – Гюльцов: Германия, 2012. – 213 с.

123. Симеон АкваБиоТехнологии [Електронний ресурс] / Кислородные конусы (Оксигенаторы). – Електрон. дані. – 2018. – Режим доступу: <http://www.simeon-aquabio.ru/oksigenaziya/Cones/>. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 01.03.2018.

124. Симеон АкваБиоТехнологии [Електронний ресурс] / Кормление гидробионтов. Кормушки. – Електрон. дані. – 2018. – Режим доступу: [http://www.simeon-aquabio.ru/kormlenie\\_gidrobiontov/Kormushki/](http://www.simeon-aquabio.ru/kormlenie_gidrobiontov/Kormushki/). – Назва з екрану. – Дата перегляду: 01.03.2018.

125. Симеон АкваБиоТехнологии [Електронний ресурс] / Озонирование. – Електрон. дані. – 2018. – Режим доступу: <http://www.simeon-aquabio.ru/obezzarajivanie/ozone/>. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 01.03.2018.

126. Симеон АкваБиоТехнологии [Електронний ресурс] / Ультрафиолетовая дезинфекция. – Електрон. дані. – 2018. – Режим доступу: <http://www.simeon-aquabio.ru/obezzarajivanie/UV/>. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 01.03.2018.

127. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами / [Г.А.Голуб, О.В.Сидорчук, С.М.Кухарець та ін.; за ред. Г.А.Голуба] – К.: НУБіП України, 2014. – 106 с.

128. Установки замкнутого водоснабжения для рыбных хозяйств от «Аqua Plast» [Електронний ресурс] / РСА для рыбных хозяйств. – Електрон. дані. – 2018. – Режим доступу: [http://www.stroy.kg/promyshlennoe-oborudovanie/fish\\_industry/502-uzv-dlya-ribnih-hozyaystv.html](http://www.stroy.kg/promyshlennoe-oborudovanie/fish_industry/502-uzv-dlya-ribnih-hozyaystv.html). – Назва з екрану. – Дата перегляду: 13.03.2018.

129. Франс Дж., Торнли Дж. Х. М. Математические модели в сельском хозяйстве: Пер. с англ. А.С. Калянського. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

130. Экологическая биотехнология: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А.Дж. Вейза. – Л.: Химия, 1987. – 384 с.
131. Якубаускас В.И. Технологические основы механизированного внесения удобрений / В. И. Якубаускас – М.: “Колос”, 1973. – 231 с.
132. Куріс Ю.В., Ткаченко С.І., Семененко Н.В. Способи утилізації біогазу. – Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – №7 (77), 2010. – с 20-30.
133. Cripps S. J., Bergheim A. (2000). Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems, *Aquacultural Engineering* 22, 33-56. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00031-5).
134. Ozbay, G. (2005). Effects of coagulant treatments on aquaculture effluent quality, *Journal of Applied Aquaculture*, 17 (4), pp. 1-23. DOI: [https://doi.org/10.1300/J028v17n04\\_01](https://doi.org/10.1300/J028v17n04_01).
135. Sindilariu P.-D., Schulz C., Reiter R. (2007). Treatment of flow-through trout aquaculture effluents in a constructed wetland, *Aquaculture*, Vol. 270, Issues 1-4, 92-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.03.006>.
136. Snow A.M., Ghaly A.E. (2008). Use of Barley for the Purification of Aquaculture Wastewater in a Hydroponics System, *American Journal of Environmental Sciences*, Vol. 4, no. 2, 89-102. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.89.102>.
137. Veerapen J.P., Lowry B.J., Couturier M.F. (2005). Design methodology for the swirl separator, *Aquacultural Engineering*, 33 (1), pp. 21-45. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2004.11.001](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.11.001).
138. Sandu S., Brazil B., Hallerman E. (2008). Efficacy of a pilot-scale wastewater treatment plant upon a commercial aquaculture effluent: I. Solids and carbonaceous compounds, *Aquacultural Engineering*, Vol. 39, Issues, 78-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.08.001>.
139. Sarkar S., Kamilya D., Mal B.C. (2007). Effect of geometric and process variables on the performance of inclined plate settlers in treating aquacultural waste, *Water ReSearch*, Vol. 41, Issue 5, 993-1000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.015>.

140. Sindilariu P.-D., Brinke A., Reiter R. (2009). Waste and particle management in a commercial, partially recirculating trout farm, *Aquacultural Engineering*, Vol. 41, Issue 2, 127-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.03.001>.

141. VDI 4630:2016. Fermentation of organic materials - Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests.

142. G. Golub, S. Kukharets, O. Zavadska, 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. <http://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/10163>.

143. Meyer A.K.P., Ehimen E.A., and Holm-Nielsen J.B. Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production, *Biomass and Bioenergy*, DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.05.013, vol. 111, 2018, pp. 154-164, June 2017.

144. Ahlberg-Eliasson, K., Nadeau, E., Levén, L., & Schnürer, A. (2017). Production efficiency of Swedish farm-scale biogas plants. *Biomass and Bioenergy*, 97, 27–37. doi:10.1016/j.biombioe.2016.12.002

145. N. Halder, Thermophilic Biogas Digester for Efficient Biogas Production from Cooked Waste and Cow Dung and Some Field Study, *International Journal of Renewable Energy Research*, vol.7, No.3, pp. 1062-1073, September 2017

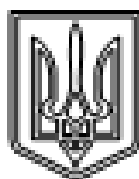
146. Cucchiella, F., D'Adamo, I., & Gastaldi, M. (2019). An economic analysis of biogas-biomethane chain from animal residues in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 230, 888–897. doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.116

147. Torrellas, M., Burgos, L., Tey, L., Noguerol, J., Riau, V., Palatsi, J., ... Bonmatí, A. (2018). Different approaches to assess the environmental performance of a cow manure biogas plant. *Atmospheric Environment*, 177, 203–213. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.01.023

148. Ishikawa, S., Iwabuchi, K., Takahashi, K., Hara, R., & Kita, H. (2018). Performance evaluation based on long-term operation results of biogas plant for livestock manure management. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. doi:10.1016/j.eaef.2018.12.003.

**ДОДАТКИ**





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **113249** (13) **C2**

(51) МПК

C02F 11/04 (2006.01)

A01C 3/02 (2006.01)

C02F 3/28 (2006.01)

C02F 103/20 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

<p>(21) Номер заявки: а 2015 11159</p> <p>(22) Дата подання заявки: 13.11.2015</p> <p>(24) Дата, з якої є чинним право на винахід: 26.12.2016</p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: 11.04.2016, Бюл.№ 7</p> <p>(46) Публікація відомостей про винахід-патент: 26.12.2016, Бюл.№ 24</p>	<p>(72) Винахідник(и): Голуб Геннадій Анатолійович (UA), Шавць Роман Леонідович (UA), Завадська Оксана Анатоліївна (UA), Чуба В'ячеслав Володимирович (UA), Дворник Андрій Віталійович (UA), Гох Василь Васильович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ-41, 03041 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертами: UA 96315 U, 26.01.2015 UA 73668 U, 10.10.2012 UA 81154 C2, 10.12.2007 RU 2408548 C2, 27.09.2010 RU 2085408 C1, 20.08.1996 RU 2149531 C1, 27.05.2000 RU 2242434 C1, 20.12.2004 DE 630242 C, 23.05.1986 US 4927530 A, 22.05.1990 DE 3339918 A1, 26.04.1984 DE 3810250 A1, 05.10.1989</p>
--	--

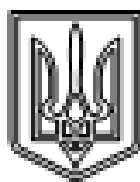
## (54) МЕТАНТЕНК

## (57) Реферат:

Метантенк містить вертикальний корпус, патрубком для завантаження й вивантаження органічної маси та для відводу біогазу, а також перегородки, встановлені в корпусі метантенка, які розділяють корпус на камери зброжування. Для можливості отримувати два види біогазу, які відрізняються по співвідношенню вмісту метану та вуглекислого газу, перегородки, встановлені в корпусі метантенка, виконані у вигляді подвійних поверхонь, які утворюють порожнину для подачі теплоносія. Перегородки встановлені таким чином, що розділяють його у вертикальній площині на верхню та нижню внутрішню та зовнішню камери, з можливістю потоку органічної біомаси між верхньою та нижньою внутрішніми камерами, а також між нижніми внутрішньою та зовнішньою камерами, а патрубки для відводу біогазу встановлені як у верхній камері, так і у нижній зовнішній камері.

UA 113249 C2





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **114971** (13) **C2**

(51) МПК

C02F 1/52 (2006.01)

C02F 103/00 (2006.01)

B01D 21/02 (2006.01)

B01D 21/24 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

<p>(21) Номер заявки а 2015 11160</p> <p>(22) Дата подання заявки 13.11.2015</p> <p>(24) Дата, з якої є чинним 28.08.2017 права на винахід:</p> <p>(41) Публікація відомостей 10.05.2016, Бюл.№ 9 про заявку:</p> <p>(46) Публікація відомостей 28.08.2017, Бюл.№ 16 про видачу патенту:</p>	<p>(72) Винахідник(и): Голуб Геннадій Анатолійович (UA), Заввадська Оксана Анатоліївна (UA), Павленко Максим Юрійович (UA), Чуба В'ячеслав Володимирович (UA), Осипчук Олександр Юрійович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ-41, 03041 (UA)</p> <p>(56) Паралелі документів, взятих до уваги експертною: UA 105270 C2, 25.04.2014 SU 1648576 A1, 07.05.1991 SU 1556708 A2, 15.04.1990 SU 1771798 A1, 30.10.1992 RU 2316378 C1, 10.02.2008 SU 1256784 A1, 15.09.1988 UA 30914 A, 15.12.2000 US 5120436 A, 09.06.1992 US 6793814 B2, 21.09.2004</p>
--	--

## (54) ВІДСТІЙНИК

## (57) Реферат:

Відстійник для розділення суспензій із прогнозованим виходом осаду містить прямокутний вертикальний корпус, патрубки для підведення суспензій, відведення освітленої рідини та видалення осаду, пакет вертикальних протитурбулізаційних пластин, які встановлені з можливістю переміщення під час проходження вздовж них осаду, утвореного при розшаруванні суспензії, очисний скребок, встановлений у основній накопичувальній камері для осаду з можливістю переміщення вздовж похилого дна основної накопичувальної камери, висантажувальну камеру, обладнану висантажувальним скребком і встановлену в нижній частині корпусу відстійника перпендикулярно напрямку руху очисного скребка. Між пакетом вертикальних протитурбулізаційних пластин та очисним скребком встановлено додаткову накопичувальну камеру для осаду, яка з'єднана із верхньою частиною прямокутного вертикального корпусу відстійника за допомогою пристрою для вимірювання рівня осаду, а із корпусом відстійника - за допомогою кульового крана, прямого патрубок для відведення освітленої рідини встановлено над кульовим краном, крім того сумарний об'єм висантажувальної камери, основної та додаткової накопичувальних камер для осаду менший за об'єм осаду, утвореного під час розшарування суспензії.

Відстійник забезпечує періодичний процес відстоювання суспензій, що в свою чергу дає можливість використовувати дане обладнання в сезонній роботі, а додаткова накопичувальна

UA 114971 C2





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **116270** (13) **U**  
 (51) МПК (2017.01)  
 А01К 61/10 (2017.01)  
 А01К 63/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ  
 УКРАЇНИ

### (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки	ш 2016 12663	(72) Винахідник(и): Голуб Геннадій Анатолійович (UA), Завальська Оксана Анатоліївна (UA), Кудьменко Микола Сергійович (UA), Кушарець Савелій Миколайович (UA), Щербак Сергій Дмитрович (UA), Масальська Анна Геннадіївна (UA)
(22) Дата подання заявки	12.12.2016	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ-41, 03041 (UA)
(24) Дата, з якої є чинним права на корисну модель:	10.05.2017	
(46) Публікація вказана в описі патенту:	10.05.2017, Бюл. № 9	

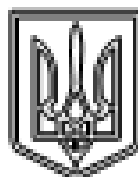
### (54) УСТАНОВКА ЗАМКНУТОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ АКВАКУЛЬТУРИ

#### (57) Реферат:

Установка замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури включає резервуари для культивування риби, механічний фільтр, біофільтр з відстійником, пристрій для бактеріцидної обробки води та насичення її киснем. Додатково установка має пристрій для видалення вуглекислого газу із води, що пройшла біофільтрацію, біогазову установку для метанового збродування осаду, що утворюється під час біофільтрації, та коопераційну установку для виробництва тепла і електроенергії.

UA 116270 U





МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **125463** (13) **U**  
(51) МПК (2018.01)  
A01K 61/00

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>ш 2017 12145</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>11.12.2017</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинним право на корисну модель: <b>10.05.2018</b></p> <p>(46) Публікація національної патенту: <b>10.05.2018, Бюл. № 9</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Голуб Геннадій Анатолійович (UA), Масальська Анна Геннадіївна (UA), Заварська Оксана Анатоліївна (UA), Щербак Сергій Дмитрович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ-41, 03041 (UA)</b></p>
--	--

**(54) УСТАНОВКА ЗАМКНУТОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІ АКВАКУЛЬТУРИ**

**(57) Реферат:**

Установка замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури включає резервуари для культивування риби, механічний фільтр, біофільтр в відстійнику, пристрій для бактеріцидної обробки води, видалення вуглекислого газу із води, що пройшла біофільтрацію, насичення води киснем, біогазову установку для метанового збродження осаду, що утворюється під час біофільтрації та когенераційну установку для виробництва тепла і електроенергії. Пристрій для видалення вуглекислого газу із води, що пройшла біофільтрацію та пристрій для насичення її киснем об'єднують в один пристрій та виконують у вигляді блока для культивування водоростей, сполученого з біогазовою установкою для забезпечення збродження на дрішквовій масі водоростей.

**UA 125463 U**





МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **125464** (13) **U**  
(51) МПК (2018.01)  
A01K 61/00

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки	ш 2017 12146	(72) Винахідник(и): Щербак Сергій Дмитрович (UA), Голуб Геннадій Анатолійович (UA), Завадська Оксана Анатоліївна (UA), Масальська Анна Геннадіївна (UA)
(22) Дата подання заявки	11.12.2017	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 16, м. Київ-41, 03041 (UA)
(24) Дата, з якої є чинним право на корисну модель:	10.05.2018	
(46) Публікація інформації про надану патенту:	10.05.2018, Бюл.№ 9	

**(54) УСТАНОВКА ЗАМКНУТОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ АКВАКУЛЬТУРИ**

**(57) Реферат:**

Установа замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури включає резервуари для культивування риби, механічний фільтр, біофільтр із відстійником, пристрій для бактеріцидної обробки води, видалення вуглекислого газу із води, що пройшла біофільтрацію, насичення води киснем, біогазову установку для метанового зброджування осадку, що утворюється під час біофільтрації та когенераційну установку для виробництва тепла і електроенергії. Після резервуарів для культивування риби встановлено резервуари для вирощування двостулкових моллюсків, вода у які потрапляє із резервуарів для культивування риби.

UA 125464 U





МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **125465** (13) **U**  
(51) МПК (2018.01)  
A01K 61/00

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

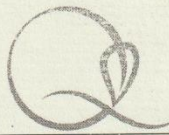
(21) Номер заявки	u 2017 12147	(72) Винахідник(и): Голуб Геннадій Анатолійович (UA), Заварська Оксана Анатоліївна (UA), Щербак Сергій Дмитрович (UA), Чуба Вячеслав Володимирович (UA), Масальська Анна Геннадіївна (UA)
(22) Дата подання заявки	11.12.2017	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ-41, 03041 (UA)
(24) Дата, з якої є чинним право на корисну модель	10.05.2018	
(46) Публікація інформації про надану патенту:	10.05.2018, Бюл. № 9	

**(54) УСТАНОВКА ЗАМКНУТОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІ АКВАКУЛЬТУРИ**

**(57) Реферат:**

Установка замкнутого водопостачання для виробництва продукції аквакультури включає резервуари для культивування риби, механічний фільтр, біофільтр із відстійником, пристрій для бактеріцидної обробки води, видалення вуглекислого газу із води, що пройшла біофільтрацію, насичення води киснем, біогасову установку для метанового збродження соєду, що утворюється під час біофільтрації та когенераційну установку для виробництва тепла і електроенергії. Перед резервуарами для культивування риби встановлено резервуари для вирощування ракоподібних, вода із яких надходить у резервуари для культивування риби.

**UA 125465 U**



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКА ЛАБОРАТОРІЯ  
ЯКОСТІ І БЕЗПЕКИ ПРОДУКЦІЇ АПК

Фактична адреса: вул. Машинобудівників, 7, смт Чабани, Фастівський р-н, Київська область, 08162, Україна.  
Юридична адреса: вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна. Тел./факс: +38(044) 5264502, 5264503  
E-mail: info@quality.ua http://www.quality.ua/

РОЗПОРЯДЖЕННЯ  
КАБІНЕТУ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ  
ВІД 2 ЖОВТНЯ 2003 РОКУ  
№ 584-Р

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ №  
ЗАМОВЛЕННЯ №  
ДАТА ВИДАННЯ ПВ  
ДАТА ОТРИМАННЯ ЗРАЗКІВ  
ДАТИ ПРОВЕДЕННЯ  
ВИПРОБУВАНЬ

2341-Р
10811
31.03.23
22.03.23
22-31.03.2023

#### НАЗВА ТА АДРЕСА ЗАМОВНИКА:

Приватна особа: Голуб Геннадій Анатолійович  
Адреса замовника: вул. Героїв Оборони, 12 Б, корпус 11, м. Київ

#### ОПИС ОБ'ЄКТІВ ВИПРОБУВАНЬ ТА ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЯ:

Зазначена інформація про зразки вказана згідно із супровідними документами та їх маркуванням.  
Зразки відібрані Замовником та доставлені у неопломбованих скляних банках. Місце відбору:  
Акваферма, м. Васильків

10811/1 Осад

Обсяг наданого зразка на випробування: 3 л.

10811/2 Відстій

Обсяг наданого зразка на випробування: 3 л.

#### СУПРОВІДНІ ДОКУМЕНТИ:

Лист-Заявка від 22.03.2023 р. № б/н, яка зареєстрована в УЛЯБП АПК від 22.03.2023 р. за № 10811

#### РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

Регістраційний код зразка: 10811/1

Визначення показників якості органічного добрива:

Найменування показників, одиниці вимірювань	(1) Результати випробувань	(2) Розширена невизначеність
Органічна речовина (С), %	0,04	0,004
Масова частка загального азоту (N), % на вихідну вологу	0,25	0,03
Масова частка амонійного азоту (NH <sub>4</sub> ), % на вихідну вологу	0,11	0,001
Масова частка загального фосфору (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), % на вихідну вологу	0,06	0,005
Масова частка загального калію (K), мг/кг	128,98	19,86
Масова частка загального калію (K), %	0,01	0,002
(3) Масова частка загального калію (K), мг/дм <sup>3</sup>	131,18	20,15
Масова частка загального калію в перерахунку на K <sub>2</sub> O, мг/кг	154,78	23,19
Масова частка загального калію в перерахунку на K <sub>2</sub> O, %	0,02	0,002
(3) Масова частка загального калію в перерахунку на K <sub>2</sub> O, мг/дм <sup>3</sup>	157,41	23,52
Масова частка загального кальцію (Ca), мг/кг	741,26	97,72
Масова частка загального кальцію (Ca), %	0,97	0,009
(3) Масова частка загального кальцію (Ca), мг/дм <sup>3</sup>	742,74	87,87
Масова частка загального кальцію в перерахунку на CaO, мг/кг	1037,76	117,0
Масова частка загального кальцію в перерахунку на CaO, %	0,1	0,01
(3) Масова частка загального кальцію в перерахунку на CaO, мг/дм <sup>3</sup>	1039,84	117,0
pH сольової витяжки, одиниці pH	5,93	0,05

Регістраційний код зразка: 10811/2

Визначення показників якості органічного добрива:

Найменування показників, одиниці вимірювань	(1) Результати випробувань	(2) Розширена невизначеність
1	2	3
Масова частка загального азоту (N), % на вихідну вологу	0,17	0,02
Масова частка амонійного азоту (NH <sub>4</sub> ), % на вихідну вологу	0,06	0,01
Масова частка загального фосфору (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), % на вихідну вологу	0,001	0,0001
Масова частка загального калію (K), мг/кг	59,97	10,21
Масова частка загального калію (K), %	0,006	0,001
(4) Масова частка загального калію (K), мг/дм <sup>3</sup>	59,09	10,23
Масова частка загального калію в перерахунку на K <sub>2</sub> O, мг/кг	70,77	11,93

Сформила: Л. ДЕМІДЕНКО  
тел.: +38 (044) 526-45-62

05/3000/20/В

Протокол випробувань № 2341-Р/10811  
стор. 1 з 2

Продовження результатів випробувань для зразка 10811/2

1	2	3
Масова частка загального калію в перерахунку на $K_2O$ , %	0,007	0,001
<sup>(3)</sup> Масова частка загального калію в перерахунку на $K_2O$ , мг/дм <sup>3</sup>	70,91	11,95
Масова частка загального кальцію (Ca), мг/кг	34,51	6,48
Масова частка загального кальцію (Ca), %	0,003	0,0006
<sup>(4)</sup> Масова частка загального кальцію (Ca), мг/дм <sup>3</sup>	35,10	6,57
Масова частка загального калію в перерахунку на $CaO$ , мг/кг	48,32	8,62
Масова частка загального калію в перерахунку на $CaO$ , %	0,005	0,0008
<sup>(4)</sup> Масова частка загального калію в перерахунку на $CaO$ , мг/дм <sup>3</sup>	49,14	8,75
pH сольової витяжки, одиниці pH	6,22	0,02

**МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ:**

Визначення вмісту органічної речовини – ДСТУ 8454:2015 Добрива органічні. Методи визначення органічної речовини (зразок №10811/1).

Визначення вмісту сумарної масової частки загального азоту – ДСТУ 7911:2015 Добрива органічні та орґано-мінеральні. Метод визначення сумарної масової частки азоту та масової частки амонійного азоту.

Визначення масової частки амонійного азоту – ДСТУ 7911:2015 Добрива органічні та орґано-мінеральні. Метод визначення сумарної масової частки азоту та масової частки амонійного азоту.

Визначення вмісту загального фосфору – ДСТУ EN 15956:2015 Добрива. Метод екстрагування фосфору, розчинного в мінеральних кислотах (EN 15956:2011, IDT); ДСТУ EN 15959:2015 Добрива. Метод визначення вмісту екстрагованого фосфору (EN 15959:2011, IDT).

Визначення масової частки загального калію та кальцію – РМ.УЛ.5.4-90 Визначення вмісту масової частки кальцію, міді, заліза, магнію, марганцю, калію, натрію та цинку в органічних та мінеральних добривах методом атомно-абсорбційної спектроскопії.

Визначення густини розчину – ДСТУ 7261:2012 Продукти хімічні технічні. Методи визначення густини рідин.

Визначення pH – ДСТУ 7862:2015 Торф і продукти його перероблення для сільського господарства. Методи визначення об'ємної й активної кислотності.

**Примітки:**

1. Протокол випробувань стосується тільки зразків, які представлені на випробування.
2. Протокол випробувань не підлягає повному або частковому передрукуванню без дозволу Української лабораторії якості і безпеки продукції АПК.
3. Без оригіналу відтиску печатки і оригіналу підпису Директора УЛЯБП АПК Протокол випробувань не дійсний.
4. Українська лабораторія якості і безпеки продукції агропромислового комплексу Національного університету біоресурсів і прибородокористування України акредитована Національним інститутом з акредитації України відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT). Атестат про акредитацію зареєстрований в Реєстрі НААУ від 1 листопада 2022 р. за ID 11724. Методи, що акредитовані можна переглянути за посиланням <http://quality.ua/atestati-ta-sertifikati/>

<sup>1</sup> Результати подано на вихідну вагу.

<sup>2</sup> Розширена невизначеність отримана шляхом множення стандартного відхилення відтворюваності, обчисленого за уточненим рівнянням Горіца-Томпсона, на коефіцієнт охоплення  $k=2$ , що визначає інтервал з рівнем довіри, який приблизно дорівнює 95 % при допустимому нормальному розподілі.

<sup>3</sup> Переведення одиниць вимірювання г/кг в г/дм<sup>3</sup> здійснювалось шляхом розрахунку через густину розчину, яка для даного зразка дорівнює  $1,002 \pm 0,001$  г/см<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> Переведення одиниць вимірювання г/кг в г/дм<sup>3</sup> здійснювалось шляхом розрахунку через густину розчину, яка для даного зразка дорівнює  $1,0174 \pm 0,001$  г/см<sup>3</sup>.

Директор УЛЯБП АПК

«КІНЕЦЬ ДОКУМЕНТУ»

Валентина КОРНІЄНКО




Формат: A4, 210x297, 20/8

Формат: A4, 210x297, 20/8



Сформула: А. ДЕМІДЕНКО  
тел: +38 (044) 526-45-02

05/3086/20/8

Протокол випробувань № 2341-9/10811  
стор. 2 з 2



**УКРАЇНЬСЬКА ЛАБОРАТОРІЯ  
ЯКОСТІ І БЕЗПЕКИ ПРОДУКЦІЇ АПК  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

20724  
ДСТУ EN ISO/IEC 17025

**ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ/ЗАМОВЛЕННЯ №** 2827-P/11265 **ДАТА ВИДАННЯ ПВ** 12.03.2024

**ДАТИ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ** 29.02-11.03.2024 **ДАТА ОТРИМАННЯ ЗРАЗКІВ** 11.03.2024

**НАЗВА ТА АДРЕСА ЗАМОВНИКА:**  
Приватна особа: Голуб Геннадій Анатолійович  
Адреса замовника: вул. Героїв Оборони, 12 Б, корпус 11, кім. 309, м. Київ.

**ОПИС ОБ'ЄКТІВ ВИПРОБУВАНЬ ТА ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЯ:**  
Зазначена інформація про зразки вказана згідно з супровідними документами та їх маркуванням. Зразки відібрані замовником та доставлені у неопломбованих скляних банках. Місце відбору: Акваферма, м. Васильків, Київська область.

11265/1 **Ущільнений осад аквакультури**  
Обсяг наданого зразка на випробування: 3,0 л.

11265/2 **Відстій ущільненого осаду**  
Обсяг наданого зразка на випробування: 3,0 л.

**СУПРОВІДНІ ДОКУМЕНТИ:**  
Лист-Заявка від 29.02.2024 р. № б/н, яка зареєстрована в УЛЯБП АПК від 29.02.2024 р. за № 11265

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ**

Реєстраційний код зразка: 11265/1  
Визначення показників якості органічного добрива:

Найменування показників, одиниці вимірювань	(1) Результати випробувань	(2) Розширена невизначеність
Органічна речовина (С), % на вихідну вологу	1,95	0,05
рН сольової витяжки, одиниці рН	5,55	0,01
Масова частка загального азоту (N), % на вихідну вологу	0,28	0,01
Масова частка фосфору (P), г/кг	1,24	0,14
Масова частка фосфору в перерахунку на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	0,28	0,03
(3) Масова частка фосфору в перерахунку на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , г/дм <sup>3</sup>	3,21	0,30
Масова частка калію (K), мг/кг	119,48	18,61
Масова частка калію в перерахунку на K <sub>2</sub> O, %	0,01	0,002
(3) Масова частка калію в перерахунку на K <sub>2</sub> O, мг/дм <sup>3</sup>	162,31	24,14
Масова частка кальцію (Ca), г/кг	1,87	0,19
Масова частка кальцію в перерахунку на CaO, %	0,26	0,03
(3) Масова частка кальцію в перерахунку на CaO, г/дм <sup>3</sup>	2,97	0,28

Реєстраційний код зразка: 11265/2  
Визначення показників якості органічного добрива:


Найменування показників, одиниці вимірювань	(1) Результати випробувань	(2) Розширена невизначеність
рН сольової витяжки, одиниці рН	6,59	0,05
Масова частка загального азоту (N), % на вихідну вологу	0,05	0,01
Масова частка фосфору (P), мг/кг	86,91	14,20
Масова частка фосфору в перерахунку на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	0,02	0,003
(3) Масова частка фосфору в перерахунку на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	198,62	28,66
Масова частка калію (K), мг/кг	75,98	12,67
Масова частка калію в перерахунку на K <sub>2</sub> O, %	0,009	0,001
(3) Масова частка калію в перерахунку на K <sub>2</sub> O, г/дм <sup>3</sup>	90,99	14,76
Масова частка кальцію (Ca), мг/кг	59,06	10,23
Масова частка кальцію в перерахунку на CaO, %	0,008	0,001
(3) Масова частка кальцію в перерахунку на CaO, мг/дм <sup>3</sup>	82,53	13,59

**МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ:**

Визначення рН – ДСТУ 7882:2015 Торф і продукти його перероблення для сільського господарства. Методи визначення обмінної й активної кислотності.

Визначення вмісту сумарної масової частки загального азоту – ДСТУ 7911:2015 Добрива органічні та органо-мінеральні. Метод визначення сумарної масової частки азоту та масової частки амонійного азоту.

Визначення вмісту органічної речовини у зразку №11265/1 – ДСТУ 8454:2015 Добрива органічні. Методи визначення органічної речовини.



Фактична адреса: вул. Машинобудівників, 7, смт Чабани, Фастівський р-н, Київська обл., 08162, Україна.  
Юридична адреса: вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна.  
Тел./факс: +38 (044) 526 45 02, +38 (093) 225 09 78  
e-mail: [info@quality.ua](mailto:info@quality.ua); [spz@quality.ua](mailto:spz@quality.ua)  
web: [www.quality.ua](http://www.quality.ua)

Протокол випробувань №2827-P/11265  
Оформила: Л. ДЕМИДЕНКО  
тел.: +38 (044) 526-45-02  
Сторінка 1 з 2

Визначення масової частки фосфору - РМ.УЛ.5.4-100  
 Визначення вмісту елементів (Ag, Al, B, Ba, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr, Ti, Zn, Be, Mo, Se, Tl, V, As, Hg, S, P) методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою. Межа детектування фосфору (P) - 0,10 мг/кг.

Визначення масової частки калію та кальцію - РМ.УЛ.5.4-90  
 Визначення вмісту масової частки кальцію, міді, заліза, магнію, марганцю, калію, натрію та цинку в органічних та мінеральних добривах методом атомно-абсорбційної спектроскопії. Межа детектування калію (K) - 0,10 мг/кг, кальцію (Ca) - 0,30 мг/кг.

**Примітки:**

1. Протокол випробувань стосується тільки зразків, які представлені на випробування.
2. Протокол випробувань не підлягає повному або частковому передрукуванню без дозволу Української лабораторії якості і безпеки продукції АПК.
3. Без оригіналу відтиску печатки і оригіналу підпису Директора УЛЯБП АПК Протокол випробувань не дійсний.
4. Українська лабораторія якості і безпеки продукції агропромислового комплексу Національного університету біоресурсів і природокористування України акредитована Національним агентством з акредитації України відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT). Атестат про акредитацію зареєстрований в Реєстрі НААУ від 1 листопада 2022 р. за № 20724. Методи, що акредитовані можна переглянути за посиланням <http://quality.ua/atestati-ta-sertifikati/>.

<sup>1</sup> Результати подано на вихідну вологу.

<sup>2</sup> Розширена невизначеність отримана шляхом множення стандартного відхилення відтворюваності, обчисленого за уточненим рівнянням Горвіца-Томпсона, на коефіцієнт охоплення  $k=2$ , що визначає інтервал з рівнем довіри 95 % за допустимого нормального розподілу.

<sup>3</sup> Переведення одиниць вимірювання  $\text{г/дм}^3$  в  $\text{г/кг}$  здійснювалось шляхом розрахунку через густину розчину, яка для даного зразка дорівнює  $0,998 \pm 0,001 \text{ г/см}^3$ .

ДИРЕКТОР УЛЯБП АПК



Валентина КОРНІЄНКО  
 «КІНЕЦЬ ДОКУМЕНТА»

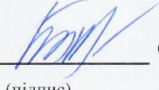


ПОГОДЖЕНО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректорка з наукової роботи та інноваційної діяльності  
 національного університету трансформації біоресурсів і природокористування України

Проректорка з науково-педагогічної роботи та цифрової трансформації національного університету біоресурсів і природокористування України



Оксана ТОНХА

(підпис)

« 16 »

2024 р.

М.П.



Олена ГЛАЗУНОВА

(підпис)

« 16 »

2024 р.

М.П.



## АКТ

про впровадження/використання результатів  
 кандидатської дисертаційної роботи у навчальний процес

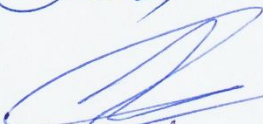
Даним актом стверджується, у Національному університеті біоресурсів і природокористування України результати кандидатської дисертаційної роботи на тему: «Обґрунтування біотехнологічного процесу виробництва біогазу із осаду стічних вод систем штучного вирощування риби», яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 03.00.20 «Біотехнологія» (технічні науки), виконаної Яременко Оксаною Анатоліївною, а саме матеріали щодо визначення параметрів біотехнологічного процесу виробництва біогазу у біогазових реакторах із періодичним завантаженням, використано на кафедрі технічного сервісу та інженерного менеджменту імені М. П. Момотенка для підготовки здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за спеціальністю 208 «Агроінженерія» за освітньо-науковою програмою «Агроінженерія» при викладанні освітньої компоненти «Відновлювана енергетика в аграрному виробництві» та підготовки здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» за освітньо-професійної програмою «Галузеве машинобудування» при викладанні освітніх компонент «Біоенергетичні системи в аграрному виробництві» та «Машини і обладнання для біоенергетики».

Декан факультету  
 конструювання та дизайну



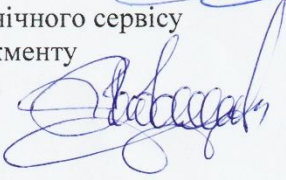
Зіновій РУЖИЛО

Декан механіко-технологічного  
 факультету



Вячеслав БРАТІШКО

Завідувач кафедри технічного сервісу  
 та інженерного менеджменту  
 імені М. П. Момотенка



Іван РОГОВСЬКИЙ

## АКТ

**впровадження результатів наукових досліджень**

1. *Назва впровадження заходу:* Обладнання для підготовки змивної води механічних фільтрів до анаеробного зброджування з метою отримання біогазу.

2. *Якою дослідно-науковою установою (вищим навчальним закладом):* захід запропонований до впровадження Національним університетом біоресурсів та природокористування України (за результатами наукових досліджень асистента кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. М.П. Момотенка Яременко О.А.).

3. *Ким і коли прийнято рішення про впровадження заходу:* Керівництвом ТОВ «Аква Систем Органік» 23.09.2021 р.

4. *Назва господарства і його адреса де проведено впровадження:* Товариство із обмеженою відповідальністю «Аква Систем Органік», Київська обл., місто Васильків вул. Київська, буд. 97-А.

5. *Рік і об'єм впровадження:* 2021-2024 рр., обладнання для підготовки змивної води механічних фільтрів до анаеробного зброджування з метою отримання біогазу, із продуктивністю за кількістю змивної води механічних фільтрів 1577 м<sup>3</sup>/рік.

6. *Фактичний економічний ефект від впровадження:* переробка змивної води механічних фільтрів в кількості 1577 м<sup>3</sup>/рік дозволила отримати фактичний економічний ефект 10 тис. грн/м<sup>3</sup> та додатковий розрахунковий економічний ефект від виробництва електроенергії на основі біометану – 16 тис. грн.

7. *Відповідальний за впровадження (прізвище, ім'я, по батькові та посада)*  
- *від університету (навчального закладу)* – Геннадій Голуб, Оксана Яременко;

- *від господарства* – головний технолог – Олександр Сапончик.

Акт складений «31» січня 2025 р.

Представник від:

ТОВ «Аква Систем Органік»  
Директор

Завідувач кафедри технічного сервісу  
та інженерного менеджменту ім. М.П. Момотенка



Оксана Прокоса

Іван Роговський