

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА**

**Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів  
Кафедра біохімії та біотехнології**

**Доцільність застосування біогазових установок на відходах інтенсивної  
аквакультури на прикладі УЗВ з вирощування райдужної форелі**

**Кваліфікаційна робота**

**Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)**

***Виконала:***

студентка 4 курсу, 407 групи

**Олар Діана Олександрівна**

***Керівник:***

к.б.н., доц. кафедри біохімії та  
біотехнології Худа Л.В.

*До захисту допущено*

*на засіданні кафедри*

*протокол № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2023 р.*

*Зав. кафедрою \_\_\_\_\_ проф. Копильчук Г.П.*

**Чернівці – 2023**

## Анотація

### **Ключові слова: біогаз, метаногенез, УЗВ, райдужна форель**

Бакалаврська робота присвячена оцінці ефективності застосування біогазових установок в інтенсивній аквакультурі, зокрема на прикладі рециркуляційної системи з вирощування райдужної форелі. Розраховано кількість відходів діяльності УЗВ за товарообороту 2000 кг/тиж. товарної риби - 31,284 т/рік, які можна використовувати як сировину для біогазової установки. З урахуванням кількості відходів рекомендовано використовувати біореактор до 1000 кг. Розраховано економічну ефективність від застосування біогазової установки для забезпечення потреб вирощування райдужної форелі в умовах УЗВ. Встановлено, що за заданих потужностей УЗВ та товарообороту можна отримувати 987,84 МДж/доба (298,4 кВт-год/день) енергії і забезпечувати таким чином до 10 % енергетичних потреб УЗВ. Середньорічна потужність такої біогазової установки становить: 12 514, 3 м<sup>3</sup>/рік метану або ж 6257,15 м<sup>3</sup>/рік біогазу, що складе 360561,6 МДж/рік енергії. За рахунок цієї енергії можна вирішувати частково проблему енергопостачання УЗВ або ж повністю вирішити питання теплопостачання УЗВ (підтримання температури води та приміщень).

## *Annotation*

### **Key words: Key words: biogas, methanogenesis, RAS, rainbow trout**

The bachelor's thesis is devoted to the evaluation of the effectiveness of the use of biogas plant in intensive aquaculture, in particular, using the example of a recirculation system for growing rainbow trout. The amount of waste from RAS activities for a turnover of 2000 kg/week is calculated, commercial fish - 31,284 t/year, which can be used as raw material for a biogas plant. Taking into account the amount of waste, it is recommended to use a bioreactor up to 1000 kg. The economic efficiency of using a biogas plant to meet the needs of growing rainbow trout in the conditions of RAS is calculated. It has been established that with the specified capacities of RAS and commodity turnover, it is possible to obtain 987.84 MJ/day (298.4 kWh/day) of energy and thus provide up to 10% of RAS's energy needs. The average annual capacity of such a biogas plant is: 12,514.3 m<sup>3</sup>/year of methane or 6,257.15 m<sup>3</sup>/year of biogas, which will amount to 360,561.6 MJ/year of energy. At the expense of this energy, it is possible to partially solve the problem of the power supply of RAS or completely solve the issue of the heat supply of RAS (maintenance of water and room temperature).

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

Олар Д.О.

(підпис)

## Зміст

<b>Зміст</b> .....	3
<b>Вступ</b> .....	4
<b>Розділ I. Біогазові установки: принципи роботи, технологічні режими, перспективи впровадження</b> .....	6
1.1. Порівняльний аналіз запровадження технологій отримання біогазу в Україні та світі .....	6
1.2. Опис технології отримання біогазу з відходів УЗВ.....	9
1.3. Порівняння ефективності ключових агрегатів різних конструкцій	13
<b>Розділ II. Характеристика процесу метаногенезу</b> .....	15
2.1. Умови перебігу процесу метаногенезу .....	15
2.2. Основні виробничі штами, що використовуються для утилізації відходів .....	18
2.3. Вплив умов культивування на процес метаногенезу .....	20
<b>Розділ III. Розрахунок ефективності отримання біогазу на відходах аквакультури</b> .....	22
3.1. Розрахунок ефективності отримання біогазу на прикладі УЗВ з вирощування райдужної форелі .....	22
3.2. Монтаж біогазової установки для потреб УЗВ .....	28
<b>Висновки</b> .....	30
<b>Список використаної літератури</b> .....	31

## Вступ

Все частіше людство стикається із проблемами забезпечення енергії для власних потреб. Світова енергетика стикнулася з неунікною проблемою, коли запаси підземних надр постійно вичерпуються, а потреби людства в джерелах енергії постійно зростають. Отримання відновлюваних джерел енергії може відбуватись різними способами: використання енергії води, вітру, сонця, здійснення пошуку інших альтернативних джерел енергії. Все частіше на сьогодні акцентують увагу на отриманні біогазу, як основного перспективного виду палива майбутнього.

Біогаз – це складна суміш, що на 50-70 % складається з метану, 25-45 % вуглекислого газу, також у слідових кількостях сірководню, азоту, ароматичних вуглеводнів та галоген-ароматичних вуглеводнів [1]. Склад біогазу в першу чергу обумовлений субстратом, який використовували для метаногенезу, та природою збудників метаногенезу. Для його отримання використовують біогазові установки різної конструкції.

Перша документально підтверджена біогазова установка була встановлена у 1859 році у Бомбеї, хоча є відомості про те, що ймовірно біогазові установки застосовувалися ще раніше, наприклад у Китаї [2]. А наприкінці 19 століття у Великій Британії так обслуговувалися вуличні ліхтарі.

Найпростіші біогазові установки – це невеликі біореактори об'ємом всього 8 м<sup>3</sup>. До кінця 20 століття тільки у Китаї нараховувалося до 4,7 мільйона домашніх біогазових реакторів. В той час в Індії був започаткований Національний проект Biogas Development (NPBD), в межах якого на 2007 рік близько чотирьох мільйонів абонентів отримали фінансову та технічну підтримку задля впровадження установок для отримання біогазу у невеличких комунальних та фермерських господарствах [3].

Біогазові установки можуть мати різну потужність, бути призначеними для різної сировини, відповідно і кінцевий продукт буде вирізнятися – це може бути тільки біогаз, або ж тепла та електрична енергія. Однак, окрім прямої

переваги – отримання відновлюваного джерела енергії, беззаперечною перевагою є утилізація відходів та побічних продуктів виробництв, які використовуються як субстрат для культивування мікроорганізмів в біогазовій установці.

Найприйнятнішою сировиною для отримання біогазу є рослинна сировина – свіжа трава, сіно, солома, буряковий жом, кукурудзяний силос, тощо. Сировина тваринного походження та відходи сільськогосподарських комплексів теж є перспективним джерелом отримання біогазу. Також часто субстратом для отримання біогазу стають стічні води різного походження [4].

Перспективним з цього погляду є використання відходів інтенсивної аквакультури задля отримання біогазу. У цьому випадку субстратом для виробництва могли б стати як тверді відходи, так і стічні води із установок замкнутого водопостачання (УЗВ) [13], а невеличкі біогазові установки можна було б розміщувати поряд з господарством.

Метою роботи було оцінити ефективність застосування біогазових установок в інтенсивній аквакультурі, зокрема на прикладі рециркуляційної системи з вирощування райдужної форелі.

Відповідно були поставлені наступні завдання:

- порівняти перспективи розвитку газогенерації у різних країнах,
- оцінити переваги та недоліки існуючих технологій отримання біогазу,
- розрахувати економічну ефективність від застосування біогазової установки для забезпечення потреб УЗВ з вирощування райдужної форелі потужністю 100 т товарної риби/рік.

## Розділ І.

### Біогазові установки: принципи роботи, технологічні режими, перспективи впровадження

#### 1.1. Порівняльний аналіз запровадження технологій отримання біогазу в Україні та світі

Найбільшого розвитку технології отримання біогазу набули в Європі. Європейський союз є світовим лідером з виробництва біогазу. Частка встановлених біогазових установок сягає 65 % від загальної світової потужності. Очікується, що європейський ринок біогазових установок зросте з 1,87 мільярда доларів США у 2021 році до 3,47 мільярда доларів США у 2028 році при середньорічному темпі зростання 9,2 % [5]. Це пов'язано з підтримкою держави невеликих виробників та розробленими стратегіями в рамках конкретної держави чи Євросоюзу в цілому щодо переходу на відновлювані джерела енергії. Станом на 2020 рік у країнах Європи було встановлено більше 20000 об'єктів виробництва біогазу.

75 % біогазу, що виробляється у європейських країнах, отримують із сільськогосподарських відходів. Також біогаз отримують на органічних відходах домогосподарств (15-20 %) та побутових та виробничих каналізаційних стоках – близько 10 % [6].

Повсюдною практикою є використання отриманого біогазу на власні потреби та обслуговування підприємства, де його виробляють. Так, наприклад у Німеччині, яка є лідером за кількістю функціонуючих біогазових комплексів, тільки 7 % отриманого біогазу направляється у газопроводи. На думку експертів у найближчі роки близько 20 % природного газу у Німеччині можна буде замінити на біогаз [7]. У Німеччині на кінець двадцятих років 21 століття функціонувало 194 біометанових заводів, тоді як у Великій Британії тільки 85.

Наймасштабніше отримання біогазу запроваджене у Данії та Швеції, біогаз у цих країнах покриває близько 20 % енергоспоживання (рис. 1.). Ця

кількість біогазу виробляється всього на 22 біометанових заводах, що функціонують у країні [8].

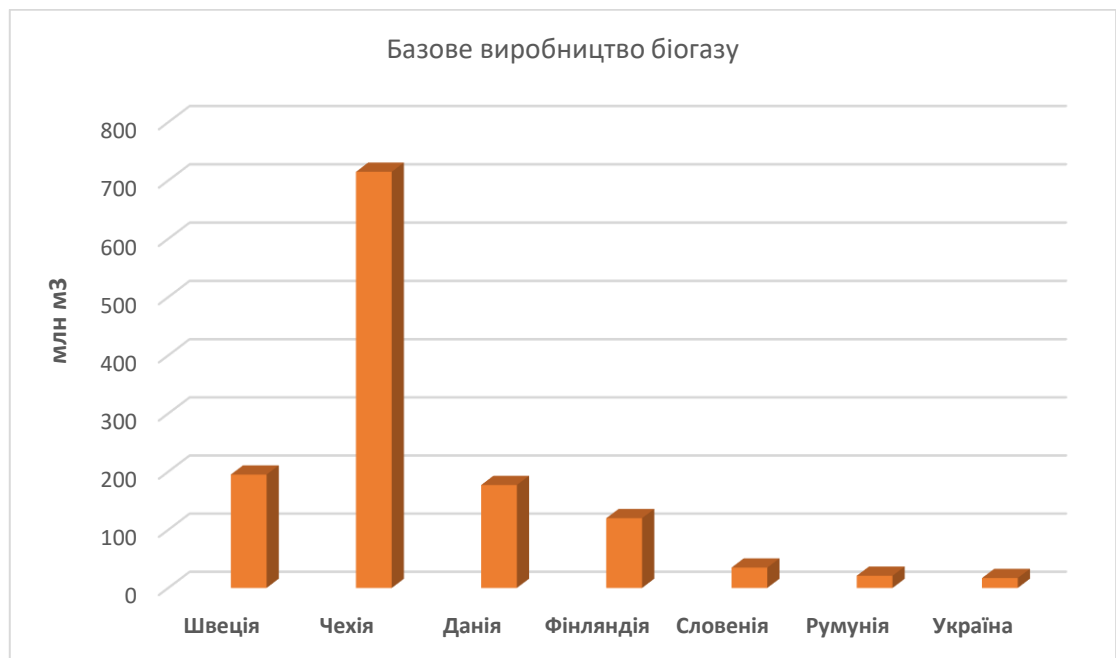


Рис. 1. Базове виробництво біогазу у країнах-лідерах та Україні [8].

Політика ЄС у сфері енергетики ґрунтується на основному завданні – збільшення частки низьковуглецевої енергетики до 2050 року. Діяльність у цій сфері курується рядом директив та стратегій «Паризька угода, Директива із відновлюваних джерел енергії, Стратегія біоікономіки (COM 2012), Енергетична дорожня карта до 2050 року, тощо» [8]. Масштабні державні програми діють також в країнах Азії (Китай, В'єтнам, Індія), а найуспішніша програма щодо впровадження біогазових установок в приватні господарства розроблена на сьогодні в Непалі [8]. Біогаз часто використовується для приготування їжі, опалення, освітлення або виробництва електроенергії. Більші за об'ємом установок можуть подавати біогаз у мережі газопостачання.

В Україні біогазові технології тільки починали поступово розвиватися і до початку повномасштабної війни існували поодинокі приклади функціонування біогазових установок.

Проте спостерігалася тенденція до збільшення їх кількості. На період з 2012 по 2019 роки в біогазові станції України було інвестовано близько 112 млн євро [9, 10]. Біогазові технології у нашій країні не мали широкого промислово впровадження. Поодинокі випадки радше були виключенням із правил.

Проте існують приклади успішного функціонування біогізових установок в Україні: свиноферма комбінату «Запоріжсталь» Запоріжжя (1993 р.), свиноферма корпорації "Агро-овен", Оленівка, Дніпропетровська область (2003р.), аграрна компанія "Еліта", Терезине, Київська область (2009 р.), ферма ВРХ "УМК", В. Крупіль, Київська область (2009 р.), «Миронівський хлібопродукт» будував біогазову установку на птахофабриці "Оріль-лідер" у Дніпропетровській області у 2012 [11]. Біореактори, які функціонували на цих підприємствах, мали об'єм від 500 до 2400 м<sup>3</sup>. Установки були запровадженні з метою очищення стоків, утилізації відходів та створення умов для часткової енергетичної незалежності підприємств. Спостерігалася тенденції щодо впровадження біогазових установок на великих агропромислових комплексах, бо вони володіли певними власними ресурсами і могли собі дозволити застосовувати інновації при відсутності інвестицій.

Агропромисловий комплекс України є джерелом надходження значних відходів, що є хорошим потенціалом для виробництва біогазу. При розвитку галузі і широкому використанні рослинної сировини цей потенціал може бути доведений до 18 млрд кубометрів у перерахунку на природний газ.

Не дивлячись на повільні темпи розвитку біогазової галузі в Україні, потенціал цієї технології досить високий. За розрахунками світових лідерів отримання альтернативних джерел енергії, біогазом поступово можна замінити до 20 % природного газу. Особливо це питання є актуальним для невеликих сільськогосподарських підприємств, які могли б таким чином забезпечити значне зниження витрат на енергетичні ресурси.

## 1.2. Опис технології отримання біогазу з твердих відходів УЗВ

Біогаз – це продукт життєдіяльності мікроорганізмів в анаеробних умовах. Отримують біогаз у процесі ферментації у спеціальних біогазових реакторах.

Основою будь-якої біогазової установки є анаеробний реактор, конструкцію якого обирають відповідно до конкретних умов ферментації. Біогаз також містить мікрокількості сірководню, аміаку, азоту, кисню та інші домішки, які необхідно видалити, оскільки вони спричиняють корозію труб біореактора та завдають шкоди здоров'ю людини. У процесі очищення біогазу виділяється вуглекислий газ і сірководень; видалений вуглекислий газ підвищує цінність біогазу як палива [12].

В цілому можна виділити наступні ефекти від запровадження біогазових технологій – утилізація органічних відходів, очищення води, отримання біодобрих, отримання альтернативного джерела енергії, зменшення парникових викидів, тощо.

Біогаз є одним із продуктів розкладання органічної сировини. Цією сировиною може слугувати будь-що – рослинні відходи, тваринні відходи, стічні води різного походження, відпрацьована біомаса продуцентів. Біомаса із співвідношенням вуглець : азот у межах 20 - 30 найкраще підходить для отримання оптимізованого складу біогазу [4].

Субстрати з надмірним вмістом вуглецю або азоту можуть призвести до зменшення продуктивності біореактора та отриманням біогазу з високим вмістом вуглекислого газу. Такій характеристиці (C : N, 20 - 30) відповідають тверді відходи та стічні води рибницьких господарств та систем УЗВ, високий вміст сполук азоту у яких робить їх перспективною сировиною для отримання біогазу [13-14].

Можна використовувати практичну будь-яку рослинну сировину чи відходи як субстрат для ферментації, основною умовою використання є розмір подрібнених частин. Відходи тваринницьких комплексів, молочних

підприємств теж є хорошою сировиною, оскільки містять достатню кількість тваринних триацилгліцеролів.

Частка метану у біогазі, отриманому на основі тваринних жирів, становить близько 87 %, що значно підвищує його якість. Надоступнішою та найдешевшою сировиною для отримання біогазу є екскременти. Але, наприклад свинячий та курячий послід не можна безпосередньо використовувати в біореакторах, його попередньо змішують з силосом [10, 11].

Всі найрізноманітніші технології отримання біогазу можна згрупувати у два класи установок:

- високотонажні біогазові установки, для яких об'єм сировини для ферментації, що завантажується за день, у межах від 50 до 100 тонн,
- індивідуальні біогазові установки, з об'ємом переробленої сировини за день до 1-2 тонн [15].

При виборі оптимальної установки та підборі ключових агрегатів окрім передбачуваних об'ємів виробництва керуються також типом сировини, яку будуть використовувати для отримання біогазу.

Існують два принципово відмінні підходи щодо реалізації ферментації у виробничих умовах: твердофазна ферментація та рідкофазна або рідинна (глибинна) ферментація.

Вибір способу ферментації буде залежати від агрегатного стану та хімічних характеристик сировини. При твердофазній ферментації вологість використаної сировини має бути меншою за 85 %, зазвичай вона становить 45-55 %. При рідкофазній ферментації використовують сировину із вологістю більше 85 %.

Твердофазна ферментація передбачає використання твердих органічних відходів в якості субстрату. Відходи товарної риби, дентрит із стоків та ван в УЗВ, відпрацьована біомаса водростей, та інші тверді відходи УЗВ можуть бути успішно використанні як субстрат для отримання біогазу за принципом твердофазної ферментації.

Типова схема установки для твердофазного отримання біогазу має наступний вигляд (рис. 2). Зазвичай за цим типом оснащують міні-ТЕЦ, біогаз з яких йде на вирішення проблем обігріву підприємства та забезпечення його електроенергією. Частина біогазу використовується на підтримання температури біореактора у межах 30 – 40 °С, бо мікроорганізми, які здійснюють твердофазну ферментацію, є переважно анаеробними мезофілами.

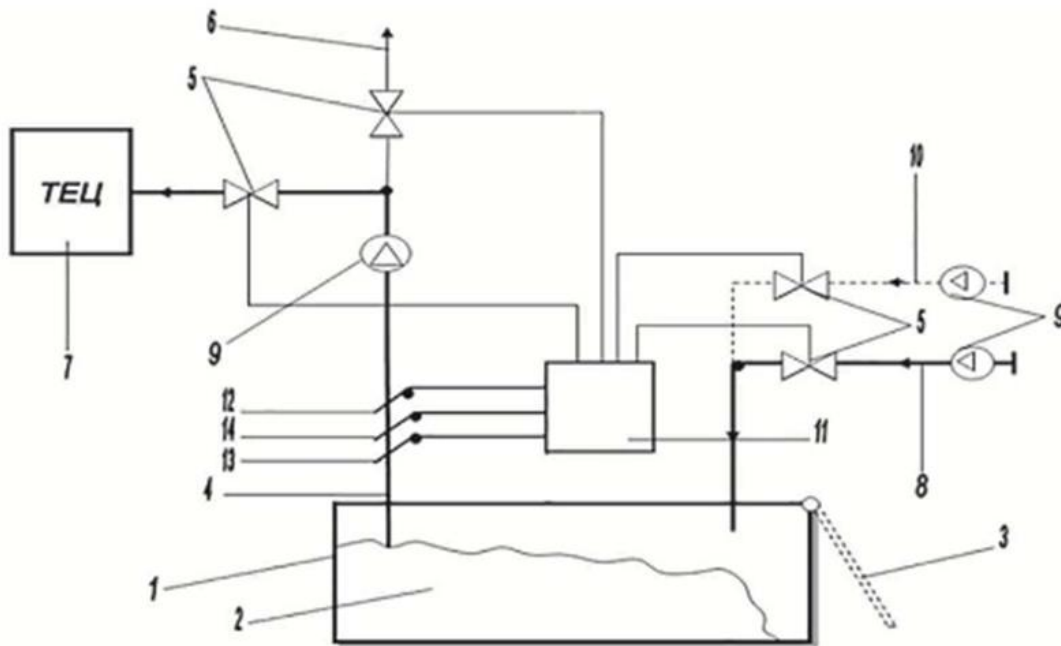


Рис. 2. Схема твердофазної біогазової установки,

де: 1 – ферментер, 2 – біомаса, 3 – завантажувально-розвантажувальний отвір, 4 – вихід біогазу, 5 – клапан, 6 – газопровід, 7 – блок ТЕЦ, 8 – лінія відпрацьованого газу, 9 – вентилятор, 10 – надходження свіжого повітря, 11 – пульт управління, 12 – 14 – датчики [1].

Найбільш поширеною практикою при виробництві біогазу є, все ж таки, використання рідкофазної ферментації. При цьому оптимальною вважається сировина із 90 – 95 % вмістом вільної вологи. Процес полягає у постійному надходженні невеликих порцій сировини і безперервному анаеробному

зброджуванні рідкої сировини метаногенними бактеріями. Все відбувається у метантенку, який є по суті великим змішувачем, без доступу повітря.

На рисунку 3 представлена схема біореактора для рідкофазної біогазової установки. Такі реактори можуть бути виконані із залізобетону чи сталі і обов'язково мають антикорозійне покриття. Необхідним елементом також є наявність мішалок для безперервного змішування [1].

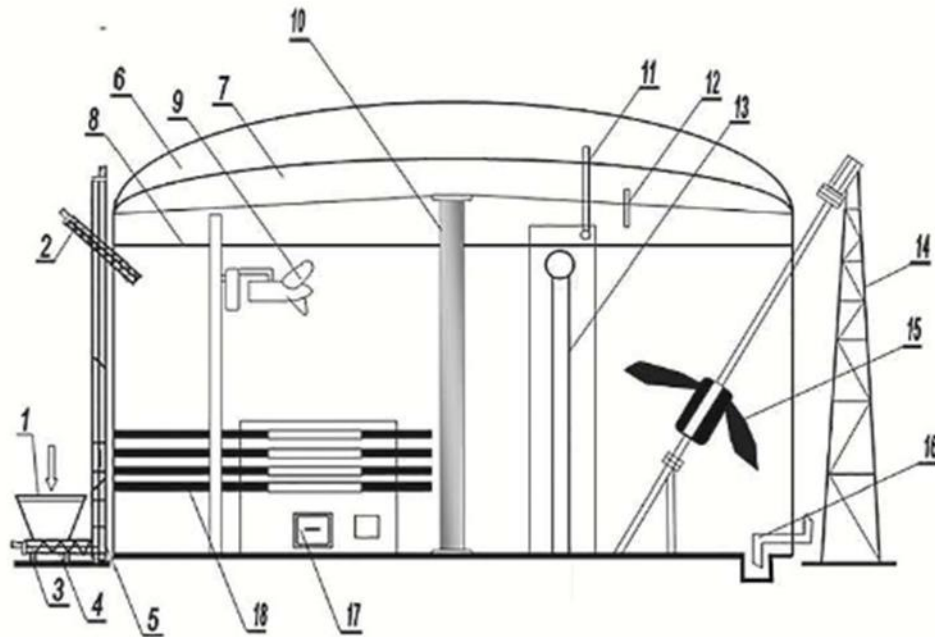


Рис. 3. Схема рідкофазної біогазової установки,

де: 1 – бункер для субстрату, 2, 4, 5 – гвинтові транспортери, 3 – вагова платформа, 6 - повтряний купол, 7 – біогазовий купол, 8 – рівень наповнення, 9 – мішалка, 10 – центральна опора, 11 – подача повітря, 12 – вихід біогазу, 13 – подача рідких відходів, 14 – опора мішалки, 15 – мішалка, 16 – виведення біомаси, 17 – регулювання температури, 18 – виведення біомаси [1].

Основною умовою успішного здійснення бродіння є підтримання сталої температури ферментації. У таких біореакторах купольного типу спостерігається подекуди, нерівномірне перемішування субстрату, а отже і не рівномірне його прогрівання, що є основним недоліком цих біореакторів. Технології отримання біогазу передбачають підтримання оптимальних

температур та оптимального рівня теплообмінних процесів між нагрівником і субстратом.

Потрапляння кисню до складу біогазу може призвести до корозії біореактора. Тому при виборі вузлів і агрегатів для біогазової установки важливим є стійкість матеріалу до корозії, довговічність та можливість модульного нарощування потужності.

Кожен із запропонованих типів біогазових установок має як свої переваги та і ряд недоліків. Врахувавши їх усі виробник обирає найбільш вдалий для свого підприємства варіант оснащення.

### **1.3. Порівняння ефективності ключових агрегатів різних конструкцій**

Типова установка для отримання біогазу складається з таких основних вузлів: ємність для гомогенізації (подрібнення), біореактор, змішувачі, резервуар для зберігання (газгольдер), комплекс насосів, сепаратори, датчики контролю, газовий комплекс, комп'ютерний блок з візуалізацією для спостереження, система безпеки [15].

Ключовим агрегатом будь-якої установки є метантенк. Для вдалого вибору метантенків потрібно враховувати такі аспекти – якість субстрату, його маса та об'єм заповнення робочого простору, тривалість та тип ферментації, рівень механізації.

У більшості біогазових установок використовують одноступінчастий біореактор проточного типу із постійним перемішуванням. Практично 68% біореакторів, що на сьогодні застосовуються у виробництві, належать до такого типу реакторів [16]. Проте, такі одноступінчасті реактори мають певні конструктивні недоліки, які призводять до нерівномірного перемішування сировини. Відповідно ефективність метаногенезу буде знижуватися.

Якщо субстрат містить речовини, що швидко гідролізуються, то потрібно перебачити окремий резервуар для гідролізу, а потім вже оброблену

сировину переміщати у біореактор. Такі конструкції є більш ефективними та захищеними від корозії.

Ще одним важливим вузлом біогазової установки є газгольдер (резервуар для зберігання газу). Його модель в першу чергу буде визначатися обсягом виробництва біогазу, який потрібно розраховувати індивідуально для кожної установки. Газгольдер – це герметична ємність, яка знаходиться безпосередньо над біореактором, або приєднана до нього трубопроводом [15].

Розрізняють газгольдери низького тиску (до 5 кПа), середнього (до 300 кПа) та високого тиску (до 1,8 МПа).

Вибір газгольдера для біогазового реактора здійснюється з урахуванням його продуктивності, а також кліматичних особливостей місцевості, де він буде експлуатуватися. Безпека роботи біогазової установки багато в чому залежить від обсягу біогазу, який вона виробляє, а також від дотримання правил експлуатації персоналом установки.

Вибір оптимальної моделі мішалок та сепараторів теж буде залежати від обсягів виробництва та типу застосованого субстрату.

Стримуючим фактором при впровадженні біогазової установки є висока вартість залізобетонних метантенків. Тому, можливе здешевлення комплексу виробництва якщо для виготовлення вузлів, з'єднань та трубопроводів використовувати сучасні полімерні матеріали. Доцільно використовувати поліетиленові труби також для будівництва магістральних трубопроводів та ємкостей для зберігання твердих чи рідких відходів, які використовуються як субстрати.

## Розділ II. Характеристика процесу метаногенезу

### 2.1. Умови перебігу процесу метаногенезу

Мікробно-контрольоване виробництво біогазу є важливою частиною глобального кругообігу вуглецю. Щороку відбувається природне біорозкладання органічних речовин в анаеробних умовах, яке, за оцінками, виділяє 590–800 мільйонів тонн метану в атмосферу. Системи відновлення біогазу використовують ці біохімічні процеси для розкладання різних типів біомаси, з вивільненим біогазу, який потенційно може стати джерелом енергії. Метан є компонентом, який головним чином відповідає за типову калорійність величиною 21–24 МДж/м<sup>3</sup> або близько 6 кВт/м<sup>3</sup> [4].

Утворення біогазу відбувається в результаті природного процесу розкладання органічної маси в анаеробних умовах у вологому середовищі за участі мікроорганізмів. Даний процес утворення біогазу називають метановим бродінням. По суті це анаеробне бродіння, яке відбувається внаслідок життєдіяльності метаноутворюючих мікроорганізмів через ряд біохімічних реакцій [15, 16].

Для даного біохімічного процесу потрібні принаймні три групи бактерій. По-перше, під час гідролізу позаклітинні ферменти бактерій розкладають складні вуглеводи, білки та ліпіди до складових. Далі відбувається ацидогенез (або бродіння), де продукти гідролізу перетворюються на оцтову кислоту, водень і вуглекислий газ.

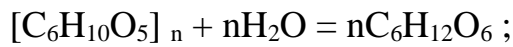
Факультативні бактерії, які є посередниками цих реакцій, використовують залишковий кисень у варильному котлі, таким чином створюючи відповідні умови для останнього етапу: метаногенезу, де obligatні анаеробні бактерії забезпечують виробництво метану з продуктів ацидогенезу.

Типовими є анаеробні метантенки, призначені для роботи в мезофільних (20–40 °C) або термофільних режимах (вище 40 °C) температурних зон. Осад,

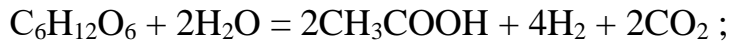
отриманий з анаеробного зброджування рідкої біомаси часто використовується як добриво.

«Процес утворення біогазу (метаногенез) проходить у три стадії:

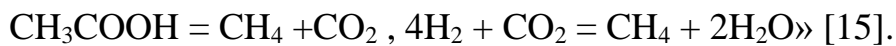
I стадія – розкладання органічної маси (гідроліз):



II стадія – розмноження кислотоутворюючих бактерій (ацетогенез):



III стадія – розмноження метаноутворюючих бактерій (метаногенез):



На першій стадії метаногенезу шляхом гідролізу відбувається розкладання високомолекулярних сполук (вуглеводів, особливо клітковини (целюлози), жирів, жироподібних речовин (фосфогліцеролів, гліколіпідів, воску, стероїдів тощо) та білків на низькомолекулярні органічні сполуки, а саме, моно- та олігосахариди, амінокислоти і пептиди, пуринові й піримідинові азотисті основи, гліцерол, карбонові кислоти, діоксид вуглецю і водню (рис. 4.).

На другій стадії за участю кислотоутворюючих бактерій відбувається подальше розкладання з утворенням органічних кислот і їх солей, а також спиртів,  $CO_2$  і  $H_2$ , а потім  $H_2S$  і  $NH_3$ . Ці кислоти окислюються переважно до ацетату і діоксиду вуглецю. Утворюються також водень, аміак, сірководень. На третій стадії за участю ферментів, що їх продукують спорові і неспороутворюючі сарцинові і сарциноподібні мікроорганізми, органічні речовини перетворюються на метан ( $CH_4$ ) і діоксид вуглецю ( $CO_2$ ). Крім того, з  $CO_2$  і  $H_2$  утворюється в подальшому додаткова кількість  $CH_4$  і  $H_2O$ . Ці реакції протікають одночасно, причому умови існування метаноутворюючих бактерій значно вищі, ніж кислотоутворюючих.

Швидкість і масштаби анаеробного бродіння метаноутворюючих бактерій залежать від їх метаболічної активності [17]. На інтенсивність процесу зброджування і, як наслідок, утворення біогазу впливають чотири групи чинників: біологічні (склад зброджуваної біомаси; склад мікрофлори;

умови життєдіяльності мікроорганізмів), фізичні (температура збродження; тиск у біогазовій установці; гідравлічний режим), хімічні (концентрація, кислотність середовища; вміст летких жирних кислот в зброджуваній масі; обсяг і склад біогазу, що утворюється) та організаційно технологічні (доза добового завантаження нових порцій зброджуваної маси; навантаження за безольною речовиною; залишкові речовини) [4] .

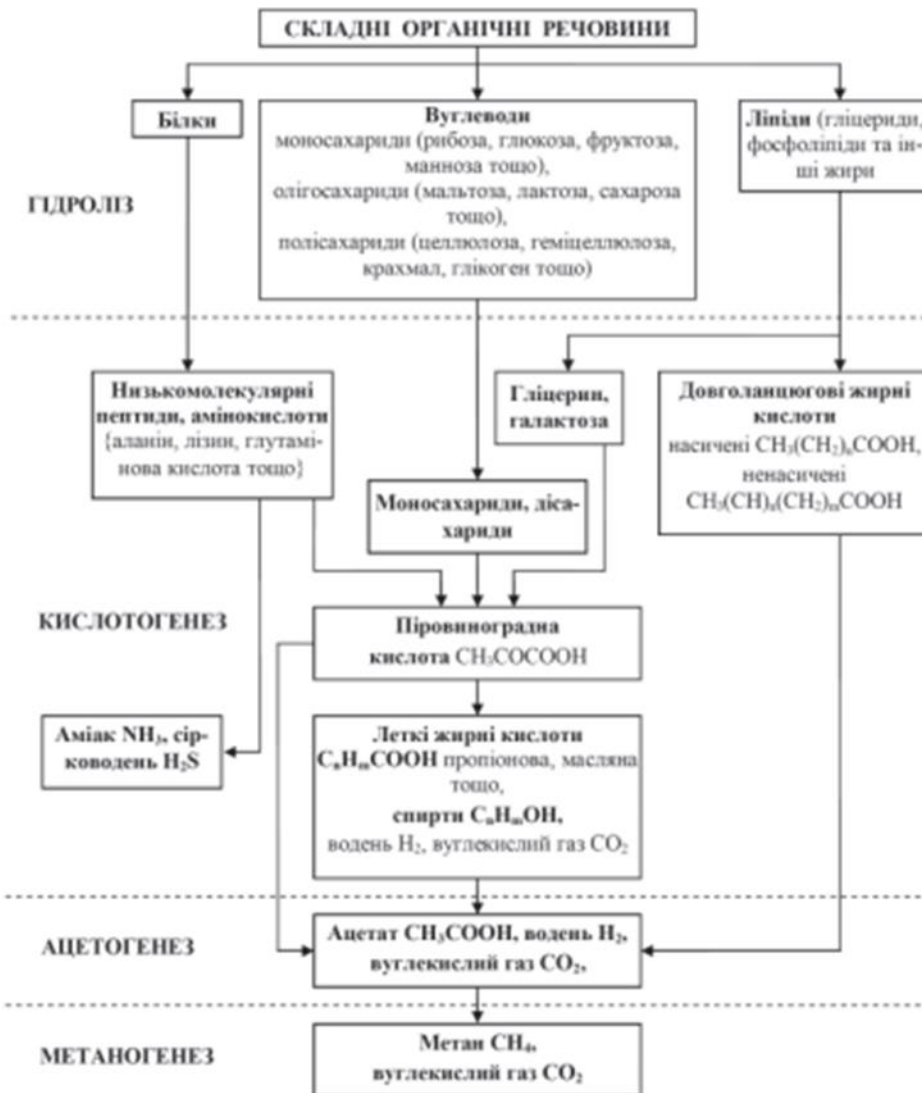


Рис. 4. Схема анаеробного бродиння [17].

Весь цей складний комплекс перетворень здійснює велика кількість мікроорганізмів (за деякими оцінками – до декількох сотень видів), серед яких переважають бактерії. Кількісний і якісний склад мікрофлори сильно залежить

від складу зброджуваних органічних речовин і умов, які створюються в навколишньому середовищі [12].

## **2.2. Основні виробничі штами, що використовуються для утилізації відходів**

Анаеробне розщеплення є складним процесом, який складається з ряду біохімічних перетворень і опосередковується взаємопов'язаними мікроорганізмами, головним чином представниками із доменів бактерій та архей, а також меншою мірою еукаріотами та дуже невеликим відсотком вірусів [20]. Шляхом індивідуальних біохімічних перетворень складні органічні сполуки розкладаються до якомога більше окиснених і відновлених форм вуглецю, тобто вуглекислого газу і метану.

Під час метаногенезу метан утворюється трьома основними групами організмів - ацетокластичними, гідрогенотрофними і метилотрофними метаногенними археями [21]. Після встановлення рівноваги всі процеси в анаеробному біореакторі протікають паралельно.

Анаеробний процес зазвичай протікає з використанням мезофільних (35-50 °C) або термофільних (50-60 °C) культур мікроорганізмів, причому, з точки зору виходу біогазу, термофільні культури демонструють вищу продукцію біогазу.

Окрім метаногенних культур, біореактори також можуть містити бактерії, які можуть конкурувати з метаногенами за доступний субстрат і таким чином негативно впливати на виробництво біогазу. Це факультативно анаеробні бактерії, які можуть використовувати молекулярний кисень як акцептор електронів, денітрифікуючі бактерії, які використовують нітрати, сульфатвідновлюючі бактерії (SRB) з використанням сульфідів і сульфатів, або бактерії, які відновлюють іони заліза [21].

Останні дослідження демонструють сильну конкуренцію між метаногенними археями та SRB за молекулярний водень. Це в основному

гідрогенотрофні метаногени, які використовують водень для відновлення метильної групи до метану. Зменшення метаболічної активності SRB може сприяти покращенню якості біогазу, бо сірководень роз'їдає двигуни когенераційних установок для виробництва електроенергії.

Повідомляється, що широкий спектр анаеробних бактерій мешкає в анаеробних ферментерах. Це в основному *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Spirochaetes*, *Chloroflexi*, *Planctomycetes* і *Synergistes* [21]. Це переважно грампозитивні та грамнегативні палички палички та коки, можуть зустрічатися звивисті чи ниткоподібні форми. Серед паличкоподібних форм зустрічаються рухливі форми.

Археї становлять приблизно 5–6 % загальної мікробної популяції в анаеробних ферментерах. Більшість досліджень, що вивчають присутність архей в анаеробному розпаді та метаногенезі, вказують представника типу *Euryarchaeota*. Крім того, їхні результати вказують на той факт, що найбільш поширені мікроорганізми з типу *Euryarchaeota* в анаеробних реакторах тісно пов'язані з родом *Methanothrix* [18].

Представники ацетокластичного порядку *Methanosarcinales*, особливо *Methanosarcinaceae* і рідше *Methanosaetaceae*, також часто виявляються в анаеробних реакторах [19]. У межах порядку *Methanosarcinales* мезофільні види змінюються теплолюбними. Крім того, роди порядку *Methanomicrobiales*, такі як *Methanoculleus* sp. і *Methanospirillum* sp., можна знайти під час анаеробного очищення стічних вод. Види, виділені за допомогою анаеробної біотехнології, це, наприклад, *Methanospirillum hungatei*, *Methanoculleus bourgensis* або *Methanolinea tarda*.

Такі види як *Methanosarcina barkeri*, *Methanococcus mazei* та *Methanothrix soehngenii* є частіше використовуваними з метою реалізації метаногенезу. Як субстрат для метаногенезу ці види використовують оцтову, мурашину кислоти, метанол та метанамін і перетворюють їх в метанол. Для успішного здійснення бродіння кількість клітин промислового штаму має знаходитися у межах  $10^6$  -  $10^8$  клітин на 1 мл інокуляту.

У теплолюбних умовах різноманітність мікроорганізмів не настільки велика. *Methanobacteriales* стає домінуючим порядком, особливо рід *Methanobacterium*. Цей гідрогенотрофний рід включає види, адаптовані до більш високих температур, і ізоляція його видів від анаеробних намулів є звичайним явищем. Прикладами є *Methanobacterium subterraneum*, *Methanothermobacter thermoautotrophicus* і *Methanothermobacter wolfei* [20].

Для життєдіяльності промислових штамів і успішного здійснення метаногенних реакцій потрібна присутність специфічних ферментних кофакторів - кофактора F430 (тетрапірольний комплекс нікелю) та коферменту F420 (синя флуорисцентна сполука).

На видовий склад мікроорганізмів в анаеробних біореакторах впливає багато факторів. Це конструкція реактора, температура, рН, співвідношення C:N, склад стічних вод, швидкість завантаження органіки, час гідравлічного утримання та перемішування [11].

### **2.3. Вплив умов культивування на процес метаногенезу**

Анаеробне зброджування особливо потребує суворого контролю умов навколишнього середовища, оскільки процес вимагає взаємодії між всіма метаногенними організмами. Швидкість анаеробного бродіння сильно залежать від характеристик субстрату. Токсичні речовини, присутні в стічних водах, можуть перешкоджати метаболізму субстратів, які легко біологічно розкладаються [18]. Існує багато промислових стічних вод, які піддаються анаеробній біотехнології. Проте потрібен індивідуальний підхід до використання кожного субстрату, бо вони можуть містити сполуки, які можуть призвести до гальмування процесу метаногенезу. Відомо, що ацетокластичний метаногенез більш чутливий, ніж гідрогенотрофний метаногенез [19].

Основними факторами впливу є температура, рН, лужність, концентрація летких кислот, окисно-відновний потенціал, солоність, дефіцит макро- та мікроелементів, наявність специфічних катіонів ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), водень, сульфід, важкі метали, відбілювачі та барвники, антибіотики тощо [21].

Температура впливає на швидкість ферментативних реакцій та швидкість дифузії субстрату. Зміни рН, лужність та концентрації летких кислот можуть впливати на активність ферментів і підвищувати токсичність ряду сполук [22].

Відомо про інгібування аміаком процесу метаногенезу, про те це явище вивчене погано. Дослідження показують, що висока концентрація аміаку може призвести до зміни утилізації метаногенного ацетату від прямого розщеплення ацетату до синтрофічного окислення ацетату [22]. Також повідомлялося про зміну внутрішньоклітинного рН, збільшення потреби в енергії для підтримки та пригнічення специфічних ферментативних реакцій. А от стічні води з високою мінералізацією викликають зневоднення бактеріальних клітин через осмотичний тиск.

## **Розділ III.**

### **Розрахунок ефективності отримання біогазу на відходах аквакультури**

#### **3.1. Розрахунок ефективності отримання біогазу на прикладі УЗВ з вирощування райдужної форелі.**

Залежно від методу обробки велика частина (до 50%) рибної маси (нутрощі, голова, хребет і шкіра) утилізується як залишок чи відходи. Однак ці відходи можуть мати інші цілі (включаючи виробництво біогазу), оскільки вони містять речовини, які потенційно біологічно розкладаються шляхом анаеробного зброджування.

Є кілька досліджень, які розглядають виробництво біогазу як рішення для обробки відходів у рибній промисловості. Також показано, що для виробництва біогазу можна використовувати намул та осади стічних вод або частину оборотної води із рибоводних установок замкнутого водопостачання [22, 23, 30].

Ретельна розробка та управління УЗВ є основою для успішного управління відходами щодо виробництва та обробки відходів. Робота УЗВ у добре контрольованих умовах значною мірою сприяє ефективному використанню корму, отже, знижує утворення відходів. Крім того, належне впровадження процедур очищення в контурі рециркуляції або в потоці стічних вод може додатково сприяти значному зменшенню утворення відходів цими системами. У більшості УЗВ закритих приміщень основна частина відходів, які виробляє риба, уловлюється та видаляється в концентрований потік стічних вод, який можна очищати на місці перед остаточним скиданням. Така обробка на місці, як правило, передбачає згущення осаду та стабілізацію потоку, але також може бути призначена для бактеріального розкладання твердих відходів.

Тверді частинки відходів, що утворюються в УЗВ, зазвичай збираються та концентруються в осад за допомогою механічної фільтрації та гравітаційних систем відповідно.

Утилізація осаду, видаленого з басейнів для вирощування риби, часто викликає труднощі, пов'язані із зневодненням, зберіганням і переміщенням. Крім того, утилізація, як правило, дорога в районах із суворими правилами скидання, що обмежує кількість концентрованої органічної речовини та поживних речовин у місцевих водоймах або очисних спорудах. Рибний намул, біологічно багатий органічними речовинами та поживними речовинами, такими як азот і фосфор, представляє унікальну можливість використання відходів [27].

Накопичення відходів в УЗВ, як і в будь-якій іншій системі аквакультури, залежить від ряду факторів, найважливішими з яких є: тип і вік риби, склад корму, режим годівлі та якість води [24].

При розрахунку доцільності запровадження біогазової установки на аквакультурному об'єкті слід чітко розуміти кількість доступної сировини для виробництва біогазу.

Проведемо розрахунок на конкретному прикладі функціонуючого УЗВ з вирощування форелі, які характерні обсяги виробництва та скільки ймовірно утворюються відходів у вигляді намулу (невиїденого корму, відходів життєдіяльності) та твердих відходів продукції рибництва (табл. 1.).

Таблиця 1.

Основні параметри виробництва райдужної форелі в умовах УЗВ [26].

<b>Критерії</b>	<b>Характеристики</b>
Обсяг товарної риби до реалізації	2 т на тиждень (104 т/рік)
Середня вага риби для реалізації	400 г (350 - 450 г)
Тривалість вирощування до реалізації (від ікри до товарної риби)	8 місяців

Інкубація ікри, викльов личинки	80 % виходу
Відхід риби в період вирощування (0,5г – 50г)	20 %
Цех підрощування	24 басейни по 4,5 м <sup>3</sup>
Переведення личинки середньою масою 0,5 г (по 8400 штук) в басейни	10 басейнів
Коефіцієнт конверсії корму	1
Щільність посадки	26 кг на 1 м <sup>3</sup>
Реалізація живої риби	70% від загальної маси
Реалізація патраної риби з головами	30% від загальної маси

**Варіант 1. Продукція біогазу при використанні як сировини осадового намулу (невиїдений корм та відходи життєдіяльності риби)**

Для такого виробництва райдужної форелі в УЗВ розрахуємо кількість утвореного намулу.

Для УЗВ, яка щотижня виробляє 2000 кг риби з коефіцієнтом конверсії корму 1,0 буде потрібно:

$$2000 \text{ кг} \times 1 = 2000 \text{ кг корму.}$$

Орієнтуємося, що корм для риб містить 20% вологи. Оцінюється, що риба споживатиме:

$$2000 \text{ кг} \times 0,8 = 1600 \text{ кг сухого корму.}$$

Враховуючи, що 0,25 г сухого мулу утворюється 1 г сухого корму [28], це призведе до утворення такої кількості намулу:

$$1600 \times 0,25 = 400 \text{ кг/тиж.}$$

$$\text{або ж } 400 \text{ кг/тиж} \times 52,14 \text{ тиж.} = 20 \text{ 856 кг/рік}$$

Отже таку кількість мулу на тиждень / рік можна використати як субстрат для метаногенезу для власної біогазової установки.

## Варіант 2. Продукція біогазу при використанні як сировини відходів рибної продукції

Розрахуємо для цієї УЗВ кількість утворених твердих відходів рибної продукції. Існують чіткі норми твердих відходів рибиництва (табл. 2).

Таблиця 2.

Норми відходів в рибистві та аквакультури [25]

Тип відходів	Кількість, %
Нутрощі риби	10
Рибні відходи філетування без нутрощів	50
Норма мертвої риби	5
Норма відходів креветок	40

Отже, орієнтовно всі ці відходи можна використовувати як сировину для анаеробного зброджування і отримання біогазу.

Виходячи із представлених даних можемо розрахувати ймовірну кількість твердих відходів від діяльності такої УЗВ.

Нутрощі риби складають 10 % від 2000 кг/тиж. обороту. Таким чином при виробництві такого виду кінцевого продукту як патрана риба буде утворюватися:

$$2000 \text{ кг/тиж.} \times 0,1 = 200 \text{ кг/тиж.}$$

або ж  $200 \text{ кг/тиж.} \times 52,14 = 10\,428 \text{ кг/рік}$

Їх можна використовувати як субстрат для отримання біогазу шляхом метаногенезу.

Отже, в результаті діяльності даної УЗВ з вирощування райдужної форелі утворюється наступна кількість відходів тиждень (рис. 5.).

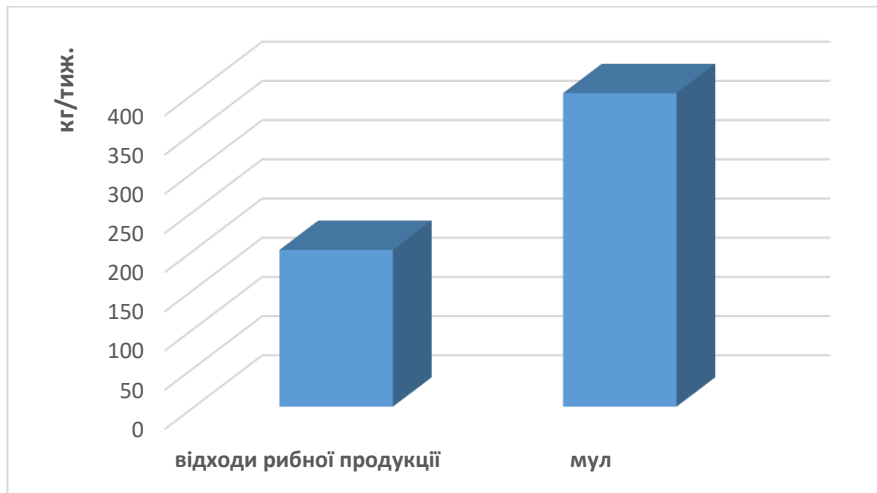


Рис. 5. Розрахована кількість відходів УЗВ для вирощуванні райдужної форелі за тиждень діяльності

При такій кількості відходів, доцільно використовувати для метаногенезу анаеробний котел на 1000 кг.

Зазвичай для завантаження метантенків співвідношення *інокулят / субстрат* становить 1 : 2 [28], тому для ефективного процесу метаногенезу потрібно буде внести 100 кг інокуляту з концентрацією клітин бактерій 1,5 %.

Враховуючи дані літератури [25, 28] теоретично з 1 кг твердих відходів УЗВ можна отримати 0,415 м<sup>3</sup> СН<sub>4</sub>.

Отже, з розрахованих нами 600 кг/тиж. (200 кг/тиж - відходи рибної продукції + 400 кг/тиж. - намул) відходів можна отримати:

$$600 \text{ кг} \times 0,415 = 249 \text{ м}^3/\text{тиж.}$$

$$249 \text{ м}^3/\text{тиж.} / 7 \text{ діб} = 34,3 \text{ м}^3/\text{доба метану}$$

$$12 \text{ 514, 3 м}^3/\text{рік метану} \text{ або ж } 6257,15 \text{ м}^3/\text{рік біогазу}$$

Припускаючи, що 1 М СН<sub>4</sub> - 36 МДж/м<sup>3</sup>, когенераційна установка може виробляти (ККД= 80%):

$$34,3 \text{ м}^3/\text{доба} \times 36 \text{ МДж/м}^3 \times 0,8 = 987,84 \text{ МДж/доба} \text{ (298,4 кВт-год/день)}$$

$$\text{Що складе: } 987,84 \text{ МДж/доба} \times 365 \text{ діб} = 360561,6 \text{ МДж/рік}$$

Споживання енергії УЗВ, що вирощують рибу товарного розміру, може коливатися від 2,9 кВт-год/кг риби до 81,48 кВт-год/кг риби через відмінності у розмірі та типі системи (повна рециркуляція або часткове повторне використання), стадії вирощування риби, температурі води та рециркуляції швидкості, технології аерації, видалення твердих частинок та поводження з відходами [29, 30].

Потужність рибоводної установки замкнутого водопостачання з вирощування райдужної форелі становить 2000 кг/тиж або 285,7 кг/доба товарної риби, що орієнтовно потребує використання 10,1 кВт-год/кг риби:

$$285,7 \times 10,1 \text{ кВт-год/кг} = 2885,57 \text{ кВт-год/кг}$$

За результатами цього дослідження можна підрахувати, що УЗВ з власною біогазовою установкою могла б задовольнити до 10% (298,4 кВт-год/день ) своїх енергетичних потреб за допомогою міні-ТЕЦ. Така міні-ТЕЦ має бути оснащена когенераційною установкою - двигуном внутрішнього згорання, призначений для біогазу. Двигун приводить в дію генератор, в результаті чого отримуємо тепло та електроенергію.

Таким чином, отриманий біогаз можна використовувати на інші потреби (табл. 3.).

Таблиця 3.

Використання біогазу в умовах УЗВ

Операції	Витрати
Відведення тепла за допомогою теплообмінників із системи охолодження двигуна	1м <sup>3</sup> біогазу ≈ до 2кВт/год тепл.енергії
Спалювати безпосередньо в котлі і отримувати пару або гарячу воду	1м <sup>3</sup> біогазу ≈ 5 – 6 кВт/год тепл.енергії
Відведення тепла із вихлопних газів двигуна	1м <sup>3</sup> біогазу ≈ до 0,5 кВт/год тепл.енергії

По закінченню процесу метаногенезу, відпрацьований субстрат (близько 20 % від попередньої кількості) можна використовувати як біодобриво, що містить достатню кількість біологічно активних сполук та мікроелементів.

Таке добриво характеризується достатньо значним вмістом залишкової мікрофлори.

Серед переваг біодобрива:

- відсутність спецефічного запаху,
- дрібні розміри частинок чи однорідність,
- відсутність патогенної мікрофлори,
- висока ефективність засвоєння рослинами,
- високий вміст азоту,
- стійкість до вимивання поживних речовин.

Всі ці фактори позитивно впливають як на рослинні організми, так і на якість ґрунту: поліпшуються фізико-механічні властивості ґрунту, родучість та доступність живильних факторів. Як результат, врожайність сільськогосподарських культур може збільшитись від 30 до 50 % [31].

### **3.2. Монтаж біогазової установки для потреб УЗВ**

Для професійного монтажу біогазової установки варто обрати постачальника технології та оснащення. При виборі постачальника слід орієнтуватися на досвід компанії на ринку, основний напрямок роботи компанії, доступний і повний референт-лист компанії.

Варто вивчити досвід колег, хто проходив етап впровадження біогазових технологій.

Важливо уникнути помилок на етапі розрахунку потужностей установки та завантаженості реактора. Адже від цього буде залежати який тип обладнання, із яких матеріалів, обере підприємець.

Основне, на що варто звертати увагу при виборі обладнання:

1. Тип метантенки, матеріал з якого буде будуватися реактор (залізобиток, нержавіюча сталь, тощо),
2. Потужність міксерів та змішувачів,
3. Наявність або відсутність окремого реактора для попереднього гідролізу сировини,
4. Обігрів ферментера,
5. Наявність системи газоочистки від сірководню,
6. Вибір когенератора.

На ринку України можна знайти пропозиції щодо монтажу біогазових установок «під ключ» (табл. 4).

Таблиця 4.

Підприємства на ринку України, які пропонують біогазові установки

За літературними даними, тривалість будівництва та монтажу біогазової установки становить 1 рік. Тривалість можливої експлуатації біогазової установки – 20 років.

## Висновки

1. Проаналізована доцільність застосування біогазових установок на твердих та рідких відходах інтенсивної аквакультури (на прикладі УЗВ з вирощування райдужної форелі).

2. Розраховано кількість відходів від діяльності УЗВ з вирощування райдужної форелі: за товарообороту 2000 кг/тиж. товарної риби утворюється 600 кг відходів за рахунок: 200 кг/тиж - нутроці риби та 400 кг/тиж. – намул (невийдений корм та продукти життєдіяльності). За рік діяльності такого УЗВ формується 31,284 т твердих відходів, які доцільно використовувати як сировину для біогазової установки. З урахуванням кількості відходів рекомендовано використовувати біореактор до 1000 кг.

3. Розраховано економічну ефективність від застосування біогазової установки для забезпечення вирощування райдужної форелі в умовах УЗВ. Встановлено, що за заданих потужностей УЗВ та товарообороту (2000 кг/тиж товарної риби), можна отримувати 987,84 МДж/доба (298,4 кВт-год/день) енергії і забезпечувати таким чином до 10 % енергетичних потреб УЗВ.

4. Середньорічна потужність біогазової установки на основі твердих відходів УЗВ для вирощування райдужної форелі становить: 12 514, 3 м<sup>3</sup>/рік метану або ж 6257,15 м<sup>3</sup>/рік біогазу, що складе 360561,6 МДж/рік енергії. За рахунок цієї енергії можна вирішувати частково проблему енергопостачання УЗВ або ж повністю вирішити питання тепlopостачання УЗВ (підтримання температури води та приміщень).

## Список використаної літератури

1. Голуб Г., Гайденок О. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок. Електронний ресурс <http://agro-business.com.ua/>
2. Bond T., Templeton M.R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*. 2011. 15. С. 347-354.
3. Chen Y, Yang G, Sweeney S, Feng Y. Household biogas use in rural China: a study of opportunities and constraints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010. 14 (1). С. 545–9
4. das Neves LCM, Converti A, Penna TCV. Biogas production: new trends for alternative energy sources in rural and urban zones. *Chemical Engineering and Technology* 2009. 32(8). С. 1147–53.
5. Europe biogas Plant market Size <https://www.fortunebusinessinsights.com/europe-biogas-plant-market-106351>
6. Хажмурадов М.А. Установка та технологія по утилізації біогазу. Наука та інновації. 2006. 4. С. 19.
7. Сакун Л.М., Різніченко Л.В., Велькін Б.О. Перспективи розвитку ринку біогазу в Україні та за кордоном. Економіка і організація управління. 2020. 37 (1). С. 160 – 170.
8. Сидорчук О. Досвід Європи та світу застосування біогазових технологій – AgroBiogas. <https://agrobiogas.com.ua/the-experience-of-europe-and-the-world-of-biogas-technologies/>
9. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності) <http://saee.gov.ua/en>
10. Калетнік Г. М., Здирко Н. Г., Фабіяньська В. Ю. Біогаз в домогосподарствах – запорука енергонезалежності сільських територій України. Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2018. 8. С. 7-22.

11. Гелетуха Г. Перспективи біогазу в Україні  
<https://www.epravda.com.ua/columns/2013/07/3/383399/>
12. Nikinmaa M. The biogas (methane) produced in anaerobic digestion can be used in energy production (heating, electricity), increasing the environmental friendliness of the treatment // *An Introduction to Aquatic Toxicology*, 2014. 41-46  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124115743000037>
13. Гребенюк Т.В., Константиненко Г.В. Методи очистки води на рибоводних підприємствах в умовах вирощування риби в установках замкнутого водопостачання. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2015. Вип. 28. С. 110–114.
14. Гроховська Ю.Р., Кононцев С.В. Фізіолого-біохімічні основи очищення оборотної води УЗВ від сполук нітрогену та фосфору. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2018. Т. 29 (68). Ч. 3. № 1. С. 42–47.
15. Панчук М.В., Шлапак Л.С. Аналіз перспектив розвитку виробництва та використання біогазу в Україні. *Актуальні питання нафтогазової галузі. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 3(60). С. 26–33.
16. Liao B.Q., Kraemer J.T., Bagley D.M. Anaerobic membrane bioreactors. Application and research directions. *Sci. Technol.* 2006. 36. P. 489–530.
17. Шаманський С.Й., Бойченко С.В. Екологічно безпечний процес утилізації осадів стічних вод авіапідприємств із отриманням біогазу. *Нафтогазова галузь України*. 2016. 3. С. 38-42.
18. Imachi H., Sakai S., Sekiguchi Y., et al. *Methanolinea tarda* gen. nov., sp. nov., a methane-producing archaeon isolated from a methanogenic digester sludge. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2008. 58. P. 294–301.
19. Sun W., Yu G., Louie T., et al. From mesophilic to thermophilic digestion: The transitions of anaerobic bacterial, archaeal, and fungal community

- structures in sludge and manure samples. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2015. 99. P. 10271–10282.
20. Weiss A., Jérôme V., Freitag R., Mayer H.K. Diversity of the resident microbiota in a thermophilic municipal biogas plant. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2008. 81. P. 163.
21. Vítězová M., Kohoutová A., Vítěz T., Hanišáková N., Kushkevych I. Methanogenic Microorganisms in Industrial Wastewater Anaerobic Treatment. *Processes.* 2020. 8(12):1546.
22. Van Lier J.B. High-rate anaerobic wastewater treatment: Diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques. *Water Sci. Technol.* 2008. 57. P. 1137–1148.
23. Bermúdez-Penabad N., Kennes K., Veiga M.C. Anaerobic digestion of tuna waste for the production of volatile fatty acids. *Waste Management.* 2017. 68. P. 96-102.
24. Jaap van Rijn, Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering.* 2013. 53. P. 49-56.
25. Ximenes J., Siqueira A., Kochanska E., Łukasik R.M. Valorisation of Agri- and Aquaculture Residues via Biogas Production for Enhanced Industrial Application. *Energies* 2021, 14, 2519
26. <https://vismar-aqua.com/biznes-plan-teo-forel-v-uzv-akvakultura-rybna-ferma>
27. Mirzoyan N., Tal Y., Gross A. Anaerobic Digestion of Sludge from Intensive Recirculating Aquaculture Systems: Review. *Aquaculture.* 2010. 306. 1–6.
28. Moody L.B., Burns R.T., Bishop G., et al. Using Biochemical Methane Potential Assays to Aid in Co-Substrate Selection for Co-Digestion. *Appl. Eng. Agric.* 2011. 27. P. 433–439.
29. Badiola M., Basurko O.C., Piedrahita, R., et al. Energy Use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A Review. *Aquac. Eng.* 2018. 81. P. 57–70.
30. Sergejs Osipovs, et al. Biogas Production Possibility from Aquaculture Waste. *Environment. Technology. Resources.* Rezekne, Latvia. Proceedings

of the 13th International Scientific and Practical Conference. 2021. 1. P. 195-199.

31.Голуб Г., Кухарець С. Виробництво органічних добрив та біогазу в умовах фермерських господарств. Наука та інновації. 2016. 4. С. 19-21.