

Особливості конструкції модульної біогазової установки з обертовим реактором

Розглянуто особливості врахування енергетичних витрат при створенні модульної біогазової установки з обертовим реактором.

Ключові слова: біогазова установка, обертовий реактор, модуль.

Суть проблеми. Для удосконалення процесу перемішування реагуючої біомаси з метою підведення свіжих доз біомаси до колоній мікроорганізмів, що переробляють органічну її складову в біогаз із вмістом метану (CH_4) до 70% та з метою створення однорідного реагуючого субстрату, який не мав би баластних непродуктивних шарів, створюються різні конструкції механізмів перемішування, але, на жаль, вони не дають необхідного результату і не виконують перемішування всього об'єму біомаси, зосередженої в анаеробному реакторі, і не ліквідують можливості розшарування та баластування непродуктивними фракціями, видалення яких з робочого об'єму реактора можливе лише у разі його зупинення, що тягне за собою значні економічні витрати та застосування ручної праці в шкідливих умовах. В результаті загальна продуктивність біогазових установок за виходом біогазу і органічних добрив зменшується, а час окупності установки збільшується.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі пристрої для анаеробного бродіння органічної маси, як правило, містять корпус, трубопроводи для подачі гною або посліду, відведення збродженої маси та біогазу, а відрізняються між собою конструкцією пристроїв для перемішування маси під час зброджування. Найчастіше перемішування здійснюють за допомогою вала з лопатями, який забезпечує пошарове перемішування зброджуваної маси [1]. Крім того, перемішування здійснюють гідравлічними та механічними пристроями, що забезпечують забір маси з нижніх шарів метантенка та подачу її у верхню частину [2]. В деяких реакторах перемішування здійснюють за рахунок тиску біогазу. Біогазові установки, що працюють в інтенсивному режимі, як правило, мають камери аеробного (кислого) бродіння, де відбувається підготовка маси до анаеробного (метанового) бродіння [3]. Деякі метантенки виконані у вигляді сфери або циліндра і мають можливість обертатися навколо своєї геометричної осі [4, 5].

В Україні був розроблений і експлуатувався комплект обладнання біогазової установки типу К-Р-9-1 [6], до складу якого входило два горизонтальні реактори об'ємом по 125 м^3 , але через високу вартість та металомісткість, а також з огляду на недоліки, пов'язані з недосконалістю системи перемішування субстрату, він не знайшов застосування.

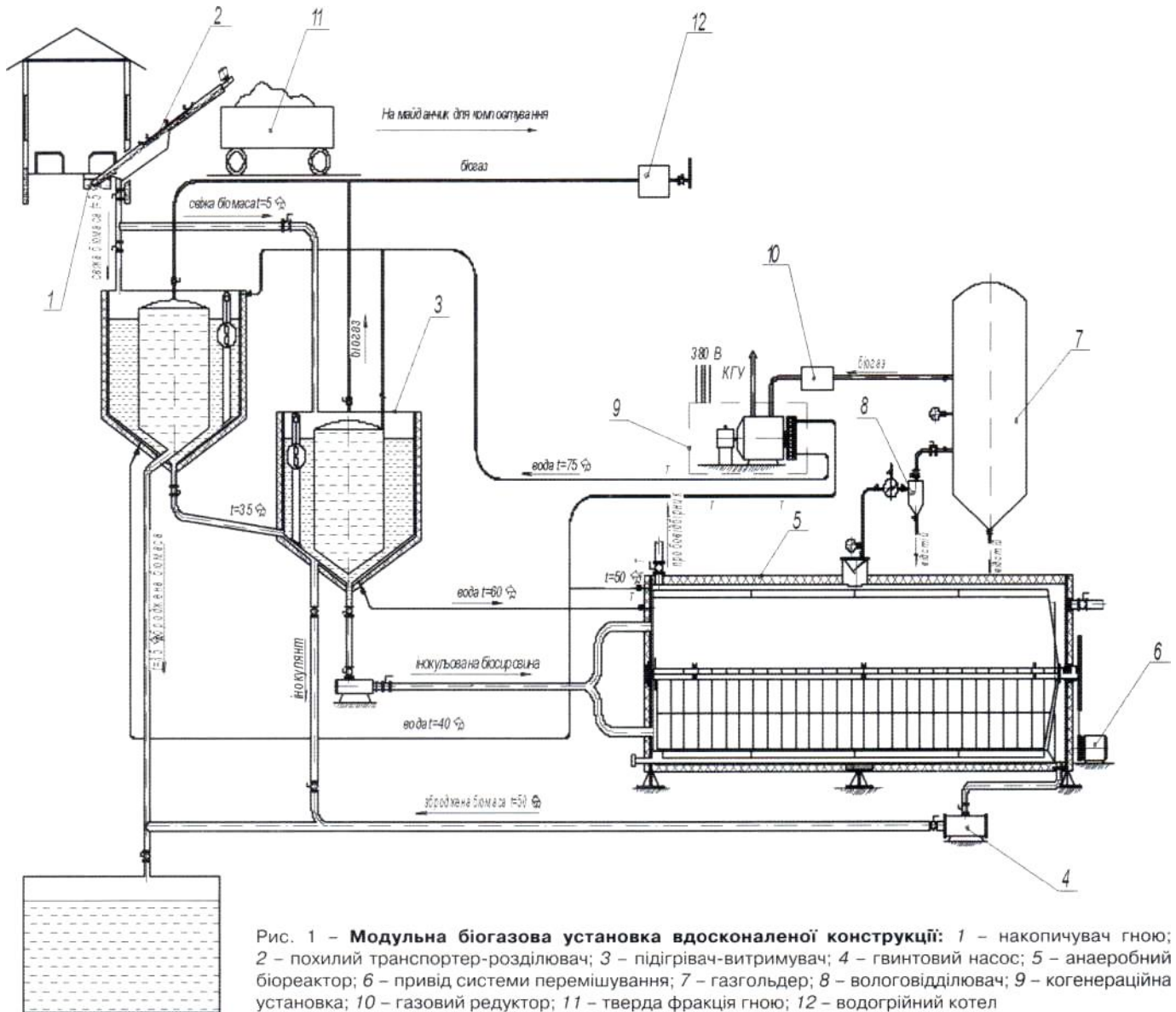
У Європейському Союзі найбільшого поширення набули біогазові установки з використанням реакторів об'ємом від 1 тис. м^3 [7, 8].

Нами також розроблено і запатентовано кілька конструкцій модульних метантенків обертового типу [9], які дозволяють ефективно перемішувати субстрат та не допускати його розшарування під час зброджування. Досвід роботи з такими установками, сировиною для яких є біомаса рослинного та тваринного походження вологістю від 90 до 95%, дозволяє стверджувати, що застосування реакторів з внутрішнім горизонтальним обертовим корпусом, в якому виконано діаметрально розташовану перегородку, дозволяє ліквідувати основний, спільний для існуючих реакторів експлуатаційний і технологічний недолік - розшарування реагуючого субстрату на легку органічну та важку мінеральну непродуктивні фракції, які через 1,5-2 роки проведення процесу метанового зброджування баластують реактор, понижуючи вихід біогазу на 50-60%, при цьому значно погіршуючи екологічні показники збродженої біомаси внаслідок прискореного її проходження через робочий об'єм реактора. При цьому задана експозиція запрограмованого технологічного процесу не дотримується.

Мета дослідження - проаналізувати енергетичні параметри біогазових установок, що дозволить на стадії анаеробного зброджування біомаси досягти запрограмованих кількісних і якісних показників продукції з використанням комплексу обладнання, до якого входять нові, підтверджені патентами конструкторські розробки біогазових установок з горизонтальними циліндричними реакторами.

Виклад основного матеріалу. За технологічну основу прийнято процес метаногенезу біосировини з добовим об'ємом до 300 м^3 , температурним режимом $38-55 \text{ }^\circ\text{C}$, яка має кислотність 6,5-7 од., вологість 90-95%, фракційний склад з максимальним розміром твердих складових до 30 мм, допустиме відхилення температури в анаеробному реакторі в межах $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, дозу добового завантаження 10%, що здійснюється кожні 2 год, та експозицію анаеробного зброджування від 10 до 20 діб у залежності від вибраного температурного режиму зброджування.

Досвід роботи з обладнанням біогазових установок вітчизняного та зарубіжного виконання дозволяє оптимізувати конструкторсько-технологічну схему модуль-



ної біогазової установки (рис. 1) на основі закладених розрахункових параметрів системи підготовки біосировини на стадії її очищення, подрібнення з виходом на запропоновану в технологічному процесі вологість, що забезпечується використанням вібраційних решіт та насоса-подрібнювача НЦІ-Ф-100, який виконує функції перекачування біосировини та подрібнення рослинних решток у її складі.

Витрати електроенергії на цьому етапі складаються з витрат на подачу біосировини до пристрою розділення біомаси, на роботу розділювача, подрібнювача та на перекачування підготовленої біосировини до підігрівача-витримувача.

Загальна кількість енергії, що витрачається на низькотемпературну підготовку біосировини, знаходиться в функціональній залежності від кількості біосировини, яка пропорційна потужності біогазової установки, та якості сировини, що залежить від її фракційного складу та вологості. Відповідно добові витрати електричної енергії на першому етапі роботи реактора знаходяться в межах від 6,3 до 7,1 кВт год./м³.

Для нагріву біосировини до температури 38-55 °С та забезпечення заданої кислотності під час проходження

аеробної стадії біопроецесу у складі технологічного обладнання використовують підігрівач-витримувач, теплоносієм в якому є вода з температурою 75-80 °С. Циркуляція біомаси під час теплообміну, вивантаження та інокуляції підготовленої до анаеробного зброджування біомаси забезпечується фекальним відцентровим насосом, який подає готовий субстрат дозовано до метанового реактора через задані інтервали часу.

Витрати енергії на виконання аеробного процесу підготовки біомаси до анаеробного зброджування складаються з витрат теплової енергії на нагрів біосировини, витрат електроенергії на перекачування, перемішування, інокуляцію біомаси та наступну подачу інокульованої біомаси до анаеробного реактора.

На енергетичний баланс роботи підігрівача-витримувача в режимі аеробного реактора впливають такі показники: добова кількість біомаси та її теплоємність, початкова та кінцева температури біомаси, тепловий коефіцієнт корисної дії підігрівача-витримувача, потужність електропривода циркуляційного фекального насоса, час прокачування біомаси до досягнення заданої температури, потужність електропривода

водяного циркуляційного насоса, час роботи водяного насоса системи стабілізації температурного режиму підігрівача-витримувача.

Експлуатація біогазових анаеробних реакторів вимагає детального аналізу всіх етапів виконання технологічного процесу з метою зменшення їх енергоємності як за рахунок застосування більш ефективних конструкторських рішень, так і завдяки впровадженню сучасних ефективних методів ведення процесу метаногенезу.

Відповідно до запропонованої технологічної схеми модульної біогазової установки розглядаються принципово нові технічні рішення в системі перемішування реагуючого субстрату в метановому реакторі, які полягають у використанні зміни напрямку дії гравітаційних сил, що впливають на переміщення легкої і важкої фракцій біомаси, що заповнюють внутрішній обертовий корпус, зроблений у вигляді циліндра з діаметрально виконаною перегородкою.

Під час повороту корпусу навколо горизонтальної осі симетрії на 180° іде переміна напрямків руху легкої та важкої фракцій за рахунок різної їх питомої ваги, в результаті чого проходить перемішування складових реагуючого субстрату і усереднення складу всього об'єму біомаси. У такій конструкції використовується явище підіймання бульбашок утвореного біогазу до газової камери, що в конкретний момент обертання корпусу розміщена в його верхній частині. При цьому створюються умови для захвату і переміщення у верхні шари складових частинок біомаси.

З метою інтенсифікації перемішування субстрату також використовується механічне перемішування решічастими мішалками, які приводяться в дію за рахунок створеного потенціалу гравітаційних сил під час повороту обертового корпусу.

У горизонтальній площині перемішування використовується за рахунок енергії руху біомаси, що закачується до обертового корпусу реактора.

Значні об'єми реагуючого субстрату, за традиційних підходів до його перемішування з урахуванням його специфічного фракційного стану, вимагають великих енергетичних витрат і відповідно збільшують вартість роботи усього технологічного обладнання в цілому. Прийняті технологічні і конструкційні рішення, що використовують закон дії сил виштовхування на тіло, занурене в рідину, дозволяють значно зменшити навантаження на опорні підшипники обертового корпусу, зменшити його деформацію, що в результаті дає можливість застосування електроприводу системи перемішування меншої потужності та збільшує терміни експлуатації як окремих вузлів, так і метанового реактора в цілому.

З використанням метанового реактора такої конструкції енерговитрати на ведення технологічного процесу метаногенезу складаються з витрат теплової енергії на стабілізацію температури в реакторі, витрат електроенергії на перемішування субстрату та енергії на відкачування зброженої біомаси.

У свою чергу, витрати електроенергії на перемішування субстрату в реакторі залежать від моментів інерції біомаси і обертового корпусу реактора, площі контакту біомаси з обертовим корпусом, величини сили дії обертового корпусу на опорні підшипники, а також коефіцієнтів тертя біомаси по матеріалу оберто-

вого корпусу та коефіцієнта в'язкості рідини зовнішнього контуру обертового корпусу реактора.

До загальних витрат енергії на роботу біогазових установок відносяться енерговитрати на функціонування рекуператорів теплової енергії біомаси та отриманого біогазу, а також витрати електроенергії на його хімічне очищення і стискування.

Витрати електроенергії на роботу рекуператора теплової енергії біомаси лежать в межах споживання електроенергії підігрівача-витримувача.

Від рекуператора теплової енергії біомаси потік тепла може бути використаний для зменшення витрат енергії на нагрівання біосировини або, у разі роботи теплового насоса, - для термостабілізації метанового реактора чи на інші потреби.

Електроенергія, що її використовують на відкачування, очищення і стискування біогазу, є функцією від його кількості, часу хімічного очищення та створення тиску в газгольдері під час зберігання біогазу.

Процес утворення біогазу (суміш метану $\text{CH}_4 \sim 70\%$, сірководню $\text{H}_2\text{S} \sim 2,0\%$, парів води $\text{H}_2\text{O} \sim 8\%$, вуглекислого газу $\text{CO}_2 \sim 15\%$ та інших домішок) проходить за умови забезпечення герметичності та тиску в робочому об'ємі метанового реактора за періодичного перемішування реагуючого субстрату та стабілізації температури на заданому рівні.

Моделювання роботи обертового реактора дозволило отримати його основні конструкційні та технологічні параметри.

Очевидно, що одним з показників, які значною мірою впливають на енерговитрати під час обертання метантенка, та показники його роботи, є відношення об'єму, заповненого біомасою, до загального об'єму метантенка, або коефіцієнт заповнення k_3 .

За рекомендованих параметрів біомаси, біогазу та обраних конструкційних параметрів біореактора [10] можна оцінити вплив коефіцієнта заповнення на витрати енергії та визначити його оптимальне значення.

Так, прийнявши діапазон робочих (внутрішніх) радіусів R метантенка від 0,5 до 3,5 м, отримано залежності потужності для забезпечення обертання реактора N_k від коефіцієнта заповнення k_3 в межах від 0,8 до 1 при повному зануренні метантенка, прийнявши інші параметри реактора, виходячи з раціональних міркувань та враховуючи середні значення параметрів [10].

Знайдено емпіричні рівняння залежності потужності на обертання метантенка від його внутрішнього радіуса та коефіцієнта заповнення (наприклад, при фіксованій довжині $b=5$ м):

$$N_{kP} = 28349,09 - 6243,82R - 58092,08k_3 + 3106,01R_2 + 2481,46Rk_3 + 31192,28k_3^2$$

та зроблено висновок, що коефіцієнт заповнення збільшується в міру збільшення внутрішнього радіуса реактора від 0,5 до 2,15 м в діапазоні від 0,89 до 0,946. При цьому встановлено раціональний радіус метантенка $R=2,15$ м), що забезпечує мінімальні енерговитрати ($N=6912$ Вт) на обертання метантенка в широкому діапазоні коефіцієнта заповнення ($k_3=0,8\dots 0,946$) та є граничним максимальним значенням цього параметра за рахунок узгодження динаміки зміни потужностей на перемішування біомаси N_{ub} та подолання

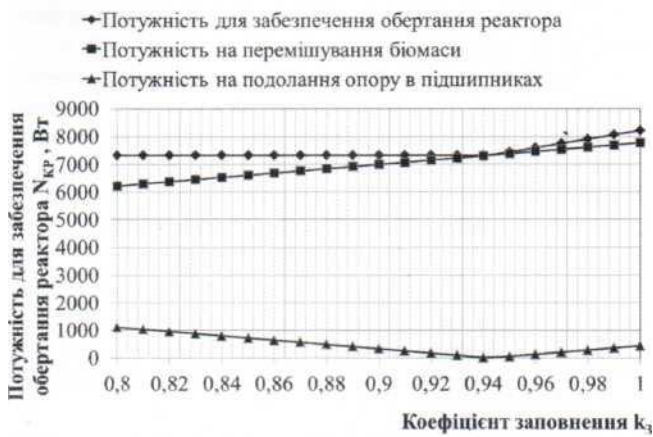


Рис. 2 – Залежність потужності для забезпечення обертання біореактора від коефіцієнта заповнення (внутрішній радіус $R=2,15$ м, робоча довжина $L=5$ м)

опору підшипників $N_{оп}$ (рис. 2). Подальше збільшення радіуса реактора недоцільне з конструкційних і економічних міркувань та не забезпечує отримання оптимального значення коефіцієнта заповнення.

Розрахунки показують, що оптимальне значення коефіцієнта заповнення забезпечує мінімальну питому потужність N_p , що витрачається на обертання біореактора (рис. 3)

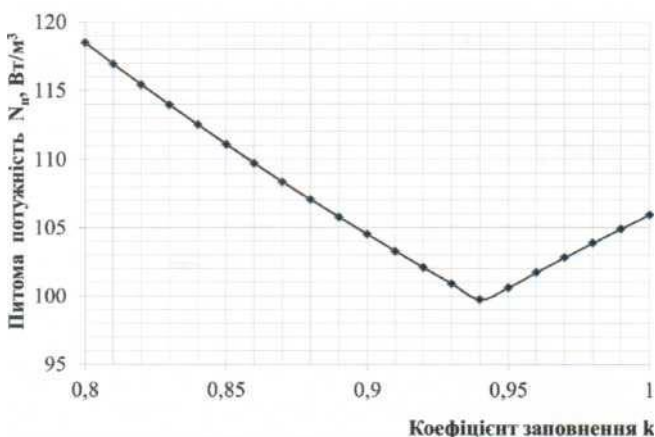


Рис. 3 – Залежність питомої потужності на обертання метантенка від коефіцієнта його заповнення біомасою

Також проведено дослідження, що дозволили встановити залежність між робочою довжиною метантенка та коефіцієнтом заповнення:

$$k_3 = 0,9147 + 0,036 \lg L,$$

Рациональні конструкційні параметри обертювих біореакторів

| Внутрішній радіус, R , м | Товщина стінки (рекомендована) s , м | Об'ємна маса матеріалу конструкції (максимальна) ρ_m , кг/м ³ | Робоча довжина L , м | Коефіцієнт заповнення біомасою K_3 | Об'єм завантаженої біомаси (максимальний) V_B , м ³ | Потужність на обертання $N_{кр}$, Вт | Питома потужність N_p , Вт/м ³ |
|----------------------------|--|---|------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| 0,5 | 0,003 | 3000 | 4 | 0,941 | 2,96 | 299 | 101,1 |
| 1 | 0,005 | 3000 | 4 | 0,941 | 11,82 | 1197 | 101,2 |
| 1,5 | 0,005 | 4000 | 4 | 0,941 | 26,61 | 2661 | 100,0 |
| 2 | 0,005 | 4500 | 6 | 0,945 | 71,25 | 7115 | 99,9 |
| 2,15 | 0,005 | 4830 | 7,5 | 0,946 | 103,03 | 10409 | 101,0 |

що дозволяє зробити висновок про те, що коефіцієнт заповнення збільшується від 0,91 при довжині 1 м до величини 0,946 при довжині 8 м і з подальшим збільшенням довжини метантенка не підвищується (в межах раціонального діапазону радіусів метантенка $R=0,5...2,15$ м), що пояснюється зменшенням впливу конструкційних характеристик метантенка із збільшенням об'єму, заповненого біомасою.

Встановлено параметри біореактора за оптимального коефіцієнта заповнення, що забезпечують плавання біореактора. Так, за граничних значень $R=2,15$ м і $k_3=0,946$ умова плавання реактора буде забезпечуватись при $L>7,5$ м, причому повне занурення реактора буде спостерігатись при $L=7,5$ м, а при $L>7,5$ м - часткове.

Виконавши відповідні розрахунки з урахуванням умов міцності [11,12] та економічності [10], встановлено раціональні параметри ряду метантенків з мінімальними питомими енерговитратами (див. табл.). Використання параметрів, наведених в таблиці, дозволяє проектувати обертюві біореактори з мінімальними питомими енерговитратами на перемішування біомаси.

Випробування фрагментів нових конструкційних рішень, застосованих для створення анаеробного реактора з горизонтальним обертювим корпусом, дозволяють стверджувати про можливість отримання високої ефективності використання таких реакторів у складі модульних промислових біогазових установок.

Висновки. Встановлено, що оптимальне значення коефіцієнта заповнення, розраховане для відповідних конструкційних та технологічних параметрів, забезпечує мінімальну питому потужність N_p (в межах від 99 до 102 Вт/м³), що витрачається на обертання біореактора.

Очікуваний енергетичний ефект від впровадження анаеробних реакторів із внутрішнім обертювим корпусом у складі біогазових установок різної потужності збільшується на 30 % у порівнянні з існуючими рішеннями. Загальна складова додаткових доходів в економічному балансі від використання модульних біогазових установок, що мають у своєму складі горизонтальний анаеробний реактор з обертювим корпусом, становить, враховуючи внутрішні виробничі витрати біогазу як енергетичного джерела, 10-15% від реалізації всього об'єму виробленого біогазу.

Список літератури

1. Устройство для анаэробного сбраживания органической массы: А.с. 785231 СССР, МКИЗ С 02 Р 11/04. / В.А. Зуев, А.А. Ковалев, В.М. Шрамков, В.П. Лосяков, П.И. Гиднев (СССР) - №2571722/29-26; заявл. 20.01.78; опубл. 07.12.80, Бюл. №45 // Открытия. Изобретения. - 1980. - №45.
2. Метантенк: А.с. 971828 СССР, МКИЗ С 02 Б 11/04. / В.В. Найденко, Ю.Ф. Колесов (СССР) - №3274245/23-26; заявл. 08.04.81; опубл. 07.11.82, Бюл. №41 // Открытия. Изобретения. - 1982. - №41.

3. Установка для производства биогаза: А.с. 1198026 СССР, МКИ4 С 02 F 11/04, 3/28. / В. Яр, Э-К. Пинтернагел, Х. Кёбке, Х. Мюллер (ГДР) - №7772246/23-26; заявл. 27.02.81; опубл. 15.12.85, Бюл. №46 // Открытия. Изобретения. - 1985. - №46.
4. Спосіб переробки відходів: Патент 21889 Україна, МКИ6 С 02 F 11 /04. / Стюарт Е. Еріксон (США) - №93101337; заявл. 27.07.93; опубл. 30.04.98, Бюл. №2 // Промислова власність. Офіційний бюлетень. - 1998. - №2.
5. Установка для получения биогаза: А.с. 1606468 СССР, МКИ5 С 02 F 11/04. / Ш.Ж. Имомов, С.П. Рудобашта, А.Г. Пузанков, Б.Ф. Рахманов, В.И. Бородин (СССР) - №4605072/23-26; заявл. 14.11.88; опубл. 15.11.90, Бюл. №42 //Открытия. Изобретения. - 1990. - №42.
6. Мовсесов Г.Є., Ляшенко О.О. Основні положення технології біогазового (анаеробного метанового) зброджування органічних відходів: Рекомендації / Інститут механізації тваринництва НААН України. - Запоріжжя: ІМТ НААН України, 2010. - 29 с.
7. O. Hacke, M. Helm. Biogas von A bis Z. - Borsig Energy GmbH, 2001. - 47 p.
8. В. Drescher. Проекты МТ: Эффективность в многообразии. - МТ-Energie GmbH & Co, 2010. - 35 с.
9. Голуб Г.А. Техніко-технологічне забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем// Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші - К., 2010. - Вип. 144. - Ч. 4. - 417 с. -С. 303-312.
10. 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.

Аннотация. *Рассмотрены особенности учета энергетических затрат при создании модульной биогазовой установки с вращающимся реактором.*

Summary. *Especially consideration energy costs in creating modular biogas plant with a rotating reactor are given.*