

АНАЕРОБНИЙ БІОРЕАКТОР ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ТА ОРГАНІЧНОГО СУБСТРАТУ

Карпушин С.О.¹, Тихий А.А.¹, Кузик О.В.¹,
Пантелесенко В.І.², Карпушин А.С.³

¹Центральноукраїнський національний технічний університет
пр. Університетський, 8, 25006, м. Кропивницький

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури
вул. Чернишевського, 24А, 49000, м. Дніпро

³Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 79013, м. Львів

karp22.05.1972ksa@gmail.com, a.a.tihiy@gmail.com, maestro_vladim1951@mail.ru,
kuzykov1985@gmail.com, hufchik2015@gmail.com

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов является актуальной экологической проблемой. Перспективным направлением является не только поиск путей удовлетворения энергетических потребностей среди традиционных энергоносителей, а и использование альтернативных источников энергии. Одним из путей успешного решения этой проблемы может быть использование биогаза – продукта анаэробного брожения органических отходов сельского хозяйства как альтернативы природному газу. Применение в сельском хозяйстве, в частности животноводстве (птицеводство, свиноводческие комплексы, комплексы с разведением КРХ, молочная отрасль, переработка сахарной свеклы, производство спирта, ...), современной биотехнологии, параллельно с основной деятельностью, даст возможность создать независимый энергетический комплекс. Важной сырьевой базой для работы биореактора являются биологические отходы основных производств фермерских хозяйств: навоз коров, свиней, лошадей, кур, ботва картофеля, стебли кукурузы, солома пшеницы, свекла, лузга подсолнечника, силос, свежая трава, отходы моркови, тирса древесины, фекальный осадок, домашние отходы и т.д. При этом возможно обеспечение хозяйства биогазом и экологически чистыми удобрениями в виде мульчи или субстрата. В статье предложено собственное, новое устройство анаэробного биореактора для производства биогаза и органического субстрата, а также описаны особенности и принцип его действия. Предложена конструкция анаэробного биореактора, адаптированная к климатическим условиям Украины и спроектирована с целью минимизации капитальных затрат подчас строительства и эксплуатации. С целью минимизации тепловых потерь значительное внимание уделено энергоэффективной форме ферментатора биореактора, компоновке броильных камер, способу централизованного выведения твердого осадка, что перебродив – субстрату. Применено общее устройство газгольдера для всех броильных камер. Новым также является применение модифицированного цементного раствора для устройства корпуса ферментатора биореактора. *Ключевые слова:* биологические отходы, броильная камера, биогаз, биореактор, ферментатор, биомасса, субстрат, цемент.

Anaerobic bioreactor for production of biogas and organic substrate. Karpushyn S., Tihiy A., Kuzyk O., Panteleienko V., Karpushyn A.

The rational use of fuel and energy resources is an urgent environmental problem. A promising area is to find ways to meet energy needs not only among traditional energy sources, but also to use alternative energy sources. One way to successfully solution of this problem may be to use biogas, a product of anaerobic fermentation of organic agricultural waste, as an alternative to natural gas. Application in agriculture, in particular animal husbandry (poultry, pig farms, cattle breeding complexes, dairy industry, sugar beet processing, alcohol production, ...), modern biotechnology, in parallel with the main activity, will allow to create its own independent energy complex. The raw material for the bioreactor is the biological waste of the main farm productions: manure of cows, pigs, horses, chickens, potatoes, corn stalks, wheat straw, beets, sunflower husk, silo, fresh grass, carrot waste, sawdust of wood, household waste and garbage. Self-sufficiency of biogas and environmentally friendly fertilizers in form of mulch or substrate is possible. The article proposes its own, new design of anaerobic bioreactor for production of biogas and organic substrate, as well as features and principle of its action. The proposed design of the anaerobic bioreactor is adapted to the climatic conditions of Ukraine and designed for the purpose of minimizing capital investment in construction and operation. In order to minimize heat losses, considerable attention is paid to the energy-saving form of the bioreactor fermenter, the layout of fermentation chambers, the method of centralized removal of the fermented solid precipitate – the substrate. The same gas-holder design is applied to all fermentation chambers. New is also the use of modified soil cement for the arrangement of the corps of the bioreactor. *Key words:* biological waste, fermentation chamber, biogas, bioreactor, fermenter, biomass, substrate, soil cement.

Постановка проблеми. Найважливіше в кожному фермерському або одноосібному господарстві великі обсяги органічних відходів [1] доцільно утилізувати з максимальним сумарним ефектом вирішення комплексних завдань: енергетичного, екологічного,

постачання власного господарства добривами, запобігання зараженню ґрунтових вод тощо.

Біологічні відходи сільськогосподарського виробництва, як правило, вивозяться за межі території ферм і складаються з метою натуральної природної

утилізації (перегнівання). Побутове сміття (так звані тверді побутові відходи – ТПВ) вивозяться на звалища ТПВ, де відбувається його гниття, що супроводжується підвищенням температури та в кінцевому підсумку призводить до самозаймання, тління, роздмухування весняними суховіями з виділенням суттєвих обсягів диму, високої ймовірності пожеж. І те, і інше призводить до зараження, окислення ґрунту, робить його непридатним для використання без застосування високовартісних заходів із оздоровлення та реабілітації. Продукти відходів, що розкладаються, проникають у ґрунтові води, приводять до викидів в атмосферу парникових газів і багатьох інших негативних наслідків.

У випадку з побутовими органічними відходами завдання утилізації вирішується за допомогою сортування і наступної переробки. На агропромислових підприємствах або фермерських господарствах ситуація простіша: там сортування практично не потрібне. Відходи можуть зразу поступати на переробку в біореактор.

Актуальність дослідження. В умовах постійного дорожчання енергоносіїв і погіршення екологічної ситуації все більше уваги приділяється альтернативним джерелам енергозабезпечення. Сучасна альтернативна енергетика представлена широким спектром засобів і джерел, проаналізувавши які стосовно кліматичних умов України та Кіровоградської області зокрема, очевидним є найбільша перспективність поширення біогазових технологій і сонячна енергетика.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Пропонована конструкція анаеробного біореактора належить до технології одержання біогазу шляхом анаеробного розкладу різних біологічних відходів (тваринництва, птахівництва, рослинництва, підприємств харчової промисловості, твердих побутових відходів, стічних вод) і може знайти застосування в сільському господарстві, на підприємствах харчової промисловості, міських звалищах ТПВ, станціях очистки стічних вод, підприємствах із виготовлення органічних добрив, наприклад мульчі, субстрату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біогазові реактори в Україні не набули значного поширення у зв'язку з їхньою значною вартістю, примхливістю технології метанового бродіння, значним енергоспоживанням [1–4]. Відхилення температури на 3°C від оптимальної для процесу вже сповільнює метаногенез. Значний вплив на протікання процесів виробництва біогазу має рухливість середовища, відсутність застійних зон, термостабілізація. У холодний період необхідно звести до мінімуму втрати тепла на підігрів субстрату та рівномірно розподілити тепло по всьому об'єму реактора. Практично відсутні засоби автоматизації процесу виробництва біогазу. Але необхідно пам'ятати, що зупинка реактора на годину може призвести до енер-

гетичних проблем у підприємстві, оскільки процес бродіння пов'язаний із життєдіяльністю анаеробних бактерій, і вони відновлюють свою активність після зупинки лише через декілька днів або тижнів. Процес потребує адаптації до умов України і постійного автоматичного моніторингу. Для умов України потрібні дешеві і надійні реактори, що будуть однаково ефективні як у теплу пору року, так і в холодну.

Анаеробний біореактор для виробництва біогазу й органічного субстрату – це пристрій, що являє собою замкнену ємність, куди подають біологічні відходи, витримують їх без доступу повітря за заданої стабільної температури (від +25 до +55°C) і перемішують. У результаті метаногенезу отримують біогаз та екологічно-безпечний органічний субстрат, що випадає як твердий осад, який можна застосовувати як органічне добриво в сільському господарстві. Як матеріал для корпусу біореактора традиційно застосовують бетон, метал, полімери.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Недоліками відомих конструкцій ферментаторів є їхня відносно висока вартість і нетехнологічність влаштування бетонної конструкції складної криволінійної форми, яка б забезпечувала найкращі умови термоізоляції, перемішування, руйнування поверхневої кірки субстрату, забезпечення максимальної площі для виходу біогазу із субстрату, періодичного виймання твердого осаду та технічного обслуговування. Також суттєвим недоліком є недостатня довговічність ферментатора, зумовлена корозійною нестабільністю.

Варіантом вирішення проблеми зі зниження вартості біореактора за умов одночасного забезпечення корозійної стійкості ферментатора є застосування як матеріалу дна і стінок ґрунтоцементу [5].

Передумовами застосування ґрунтоцементу для влаштування корпусу біореактора – ферментатора є [6–8]:

позитивний досвід використання ґрунтоцементу як матеріалу для будівництва шламових відстійників для токсичних відходів;

- висока водонепроникність W12-14;
- низька вартість виготовлення завдяки використанню природного ґрунту з котловану;
- висока міцність на стиск, 2 МПа;
- стійкість до агресивних складників (хімічна стійкість);
- довговічність, термін використання більш ніж 300 років;
- ґрунтоцемент екологічно безпечний;
- морозостійкість у межах М25;
- ґрунтоцемент має здатність до набору міцності з часом.

Новизна. Новими є ідеї, що полягають у вирішенні оптимізаційного завдання шляхом комбінаторики енергоощадної конструкції, форми і місця розташування та матеріалу корпусу анаеробного біореактора

для виробництва біогазу та органічного субстрату. Конструкція корпусу біореактора повинна мати найменшу площу зовнішньої поверхні, що контактує із зовнішнім середовищем (актуально в холодну пору року, мінімізує витрати на роботу теплового насосу для забезпечення необхідної температури процесу бродіння), при цьому форма камер бродіння повинна забезпечувати: якомога кращі умови перемішування; максимальну площу для виходу газу; не мати «глухих» застійних ділянок, де перемішування не відбувається; найкращі умови для руйнування поверхневої кірки; оптимальне, послідовне, без енерговитрат з'єднання камер; можливість застосування спільного для камер газгольдера; можливість автоматичного (без порушення температурного режиму) видалення осаду – органічного субстрату; тощо. До матеріалу ж корпусу біореактора висуваються вимоги герметичності та корозійної стійкості за виконання умов необхідної міцності.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Пропонована конструкція біореактора [5] належить до технології одержання біогазу шляхом анаеробного розкладу різних біологічних відходів (тваринництва, птахівництва, рослинництва, підприємств харчової промисловості, твердих побутових відходів, стічних вод) і може знайти застосування в сільському господарстві, на підприємствах харчової промисловості, міських звалищах ТПВ, станціях очистки стічних вод, підприємствах із виготовлення органічних добрив, наприклад мульчі, субстрату.

Виклад основного матеріалу. Метою пропонованої конструкції біореактора є вдосконалення анаеробного біореактора, ферментатора-газгольдера, в якому шляхом влаштування цільного і монолітного корпусу з ґрунтоцементу підвищується надійність і довговічність роботи біореактора, його герметичність, суттєво знижуються вартість і термін зведення за умов раціонального використання природних ресурсів.

На рис. 1 зображено вид зверху біореакторної установки, що складається із завантажувально-на-

сосного вузла та безпосередньо самого біореактора, де 1 – приймальна ємність для відходів біологічного походження, 2 – насос, 3 – ємність – дозатор. Ємності 1 і 3 утворені стінками і дном із ґрунтоцементу.

Анаеробний біореактор для виробництва біогазу та органічного субстрату складається з корпусу 4 циліндричної в плані форми (див. рис. 1) з трьома внутрішніми вертикальними перегородками 5, що розташовані одна щодо іншої під кутом 120° та утворюють три камери для анаеробного бродіння, відповідно 6, 7 і 8. За межами біореактора розташований збірник зброженої маси 9 утворений стінками і дном із ґрунтоцементу. Корпус циліндричної форми 4, три внутрішні перегородки 5 та спільне дно 10 (рис. 2) виконані в «монолітному» варіанті – як одне ціле з ґрунтоцементу. На поверхні внутрішніх перегородок 5 передбачено теплообмінники 11 з полімерної труби з під'єднанням до теплового насосу (на рис. не показано). В бродильній камері 6 посередництвом траверси 12 встановлено змішувач біомаси, що включає гідродвигун 13, редуктор 14 з вертикально розташованим валом, у нижній частині якого закріплено короткобазовий одновитковий полий шнек 15, а у верхній частині закріплено трапецієвидний каркас із сітками 16 для руйнування поверхневої кірки. В перегородках 5 передбачено отвори для перепускних труб 17. Схема (розгортка камер біореактора) циркуляції біомаси наведена на рис. 3.

Накопичення газу та його початкове тимчасове зберігання відбувається в порожнині газгольдера 18, що утворена газовим ковпаком 19, який щільно та герметично встановлено в пази ґрунтоцементних стінок корпусу 4. У верхній частині ковпака 19, який виготовлений із матеріалу темного кольору для додаткового нагрівання біореактора від сонячних променів, встановлено засоби контролю та автоматичного керування 20, а також вивідну газову трубку 21.

У нижній частині біореактора передбачена залізобетонна труба 22 з встановленим у неї посередництвом підшипникових опор довгобазовим шне-

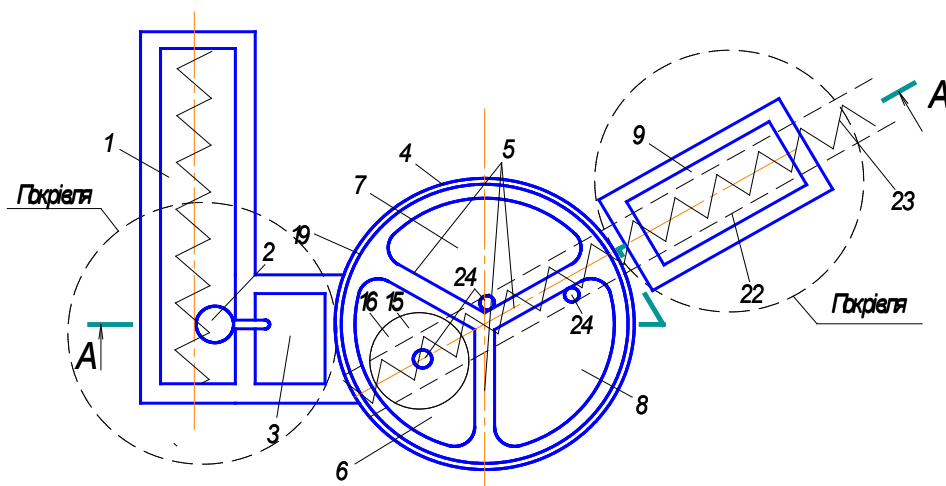


Рис. 1. Біореакторна установка (вид зверху) [5]

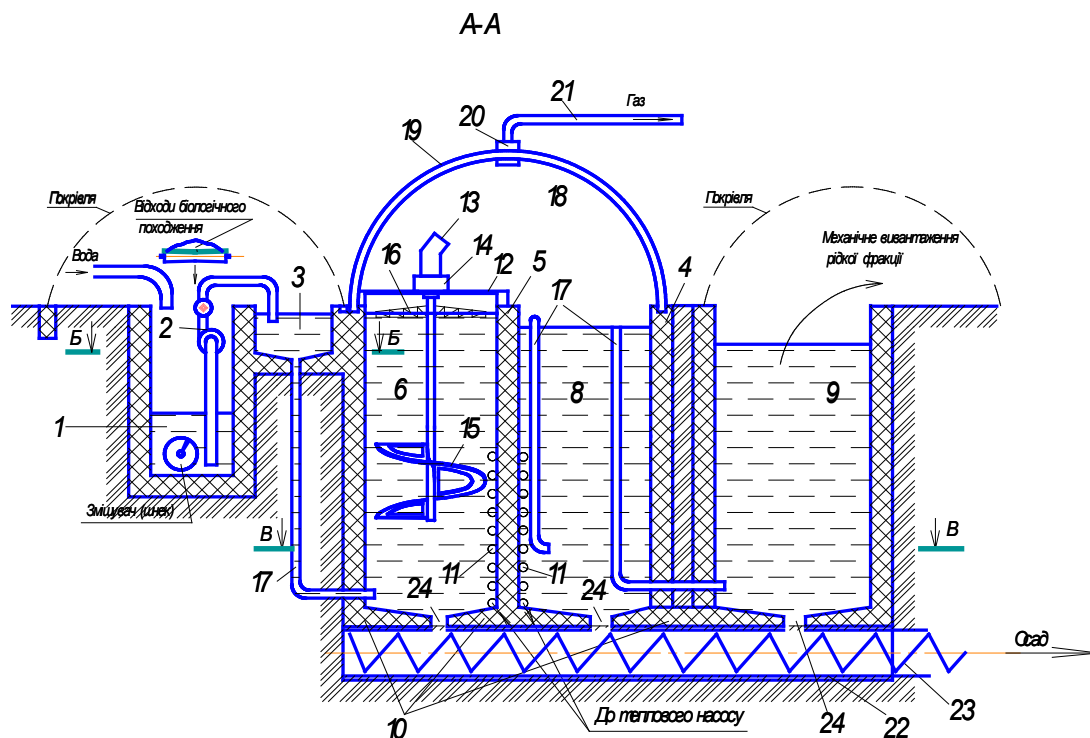


Рис. 2. Розріз А-А біореактора з рис. 1 [5]

ком 23 для виведення осаду (субстрату). При цьому поверхня дна 10 корпусу 4 біореактора в бродильних камерах 6, 7, 8 і збірнику зброженої маси 9 має внутрішні ухили до отворів із встановленими в них гідрозатворотами 24, через які періодично і у визначеній послідовності осад (субстрат) потрапляє у внутрішню порожнину труби 22 зі шнеком 23.

Працює анаеробний біореактор для виробництва біогазу та органічного субстрату таким чином: стрічковим транспортером, трактором, навантажувачем, ... подається вихідна сировина біологіч-

ного походження в ємність 1, туди ж додають воду і перемішують шнековим змішувачем до необхідної консистенції. Після цього насосом 2 подають вихідну біомасу в дозуючу ємність 3 і контролюють необхідну температуру суміші (в межах +25...55°C) і підтримують необхідний рівень біомаси в ємності 3. При цьому надлишкова біомаса (див. рис. 3) через трубопровід 17 потрапляє в нижню частину біореактора в бродильну камеру 6, де підігрівається нагрівачем біомаси 11 та перемішується короткобазовим порожнистим шнеком 15. Відбувається про-

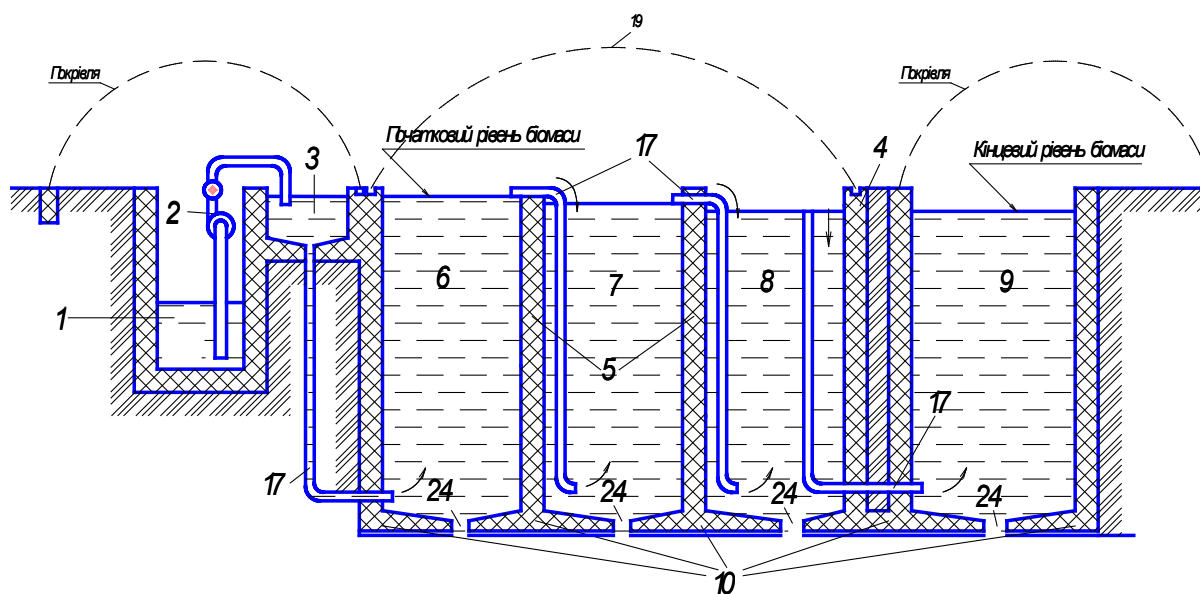


Рис. 3. Схема (розгортка камер біореактора) циркуляції біомаси [5]

цес бродіння. Поверхнева кірка з твердих елементів, що утворюється на поверхні біомаси в камері 6, руйнується трапецієвидними сітками 16, що дає змогу бульбашкам газу без перешкод виходити до порожнини 18 газового ковпака – газгольдера 19.

Частково перебродивши, біомаса, що зайняла положення у верхній частині бродильної камери 6, поступає по перепускній трубі 17 в нижню частину проміжної бродильної камери 7, перемішуючись і підігріваючись від перегородки 5 з підігрівачами 11. Відбувається продовження бродіння біомаси в проміжній камері бродіння 7 і виділення біогазу, який вільно поступає в порожнину 18 газового ковпака – газгольдера 19. У міру заповнення камери 7 біомаса з верхньої частини потрапляє через перепускную трубу 17 між камерою 7 і камерою остаточного зброджування 8 в її нижню частину, перемішуючись і підігріваючись від перегородки 5 з підігрівачами 11. Відбувається кінцеве доброджування біомаси в камері 8 з виділення біогазу в порожнину 18 газового ковпака – газгольдера 19, де газ накопичується, якийсь термін зберігається та за допомогою автоматичних пристроїв 20 відводиться по трубі 21 до місць більш тривалого зберігання, очищення або безпосереднього використання.

З камери остаточного зброджування біомаса посередництвом перепускної труби 17 потрапляє в збірник збродженої маси 9, звідки механічно виймається грейфером, норією тощо.

При цьому процес бродіння та знаходження біомаси в камерах 6, 7, 8 і збірнику збродженої маси 9 супроводжується випаданням осаду (субстрату) з біомаси. Осад накопичується на дні 10 камер 6, 7, 8 і 9 та завдяки внутрішнім ухилам більш концентровано потрапляє в спільні з бетонною трубою 22 отвори з гідрозатворами 24 і відводиться шнеком 23 до місця збирання, пакування.

Періодичність, послідовність, час відкриття гідрозатворів 24 і ввімкнення шнека 23 може відбуватися як у ручному, так і в автоматичному режимах відповідно до програми керування роботою біореактора.

Анаеробний біореактор для виробництва біогазу та органічного субстрату призначений для роботи як безперервно, так і дискретно в будь-яку пору року.

Головні висновки. 1. Представлено нову, енергоефективну і компактну конструкцію анаеробного біореактора, що поєднує в собі ефекти: максимальної площі поверхні для виходу газу; забезпечення умов для механічного перемішування (раціональна форма камер бродіння без глухих кутів); мінімальних енергозатрат на підігрів (мінімальна довжина зовнішнього периметра), можливість централізованого виводу осаду з усіх камер бродіння.

2. Застосування запропонованої конструкції біореактора дасть змогу вирішити низку істотних проблем: раціональне використання природних, зокрема відновлюваних джерел енергії; екологічна утилізація продуктів життєдіяльності; раціональне використання природних ресурсів для будівництва; отримання екологічно чистих добрив для агрокомплексу.

3. Запропоновано та логічно обгрунтовано доцільність застосування ґрунтоцементу для влаштування корпусу ферментатора анаеробного біореактора з виробництва біогазу й органічного субстрату.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані під час проектування ферментаторів біореакторів, гідроізоляційних перепон із ґрунтоцементу для звалищ ТПВ з метою унеможливлення потрапляння отруйних речовин у водоносний горизонт, також перспективним з економічного погляду є застосування ґрунтоцементу для влаштування стінок і дна штучних водойм та як окремих фундаментів для сонячних батарей.

Література

1. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <http://saee.gov.ua/uk/bioenergy>.
2. Ратушняк Г.С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання : навч. посібник / Джеджула В.В., Анохіна К.В. Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2010. 170 с. URL: <http://ratushnyak.vk.vntu.edu.ua/file/Books/f410c4ae983b7bccaf34971045a58dc8.pdf>.
3. Біогазові установки : практичний посібник / Барбара Едер, Хайнц Шульц. 2008.
4. Компактні біогазові установки контейнерного виконання, виробництва Польщі. 2016. URL: http://atagos.com.ua/produkt/kompaktnye_biogazovye_ustanovki_v_kontejnernom_ispolnenii_proizvodstvo_polsha.
5. Пат. 124712 Україна. МПК C02F11/04, C02F3/28. Анаеробний біореактор для виробництва біогазу та органічного субстрату / С.О. Карпушин, В.В. Клименко, А.В. Шиндер; заявник і патентовласник – Центральноукраїнський національний технічний університет. u201709143 заявл. 15.09.2017. Опубл. 25.04.2018. Бюл. № 8.
6. Пат. 71256 Україна, МПК E02B 17/02 (2006.01) E02D 5/22(2006.01). Шламовий амбар для токсичних відходів буріння та експлуатації нафтогазових свердловин / М.Л. Зоценко, К.А. Тимофеева; заявник і патентовласник – Полтавський нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. u201114845 заявл. 14.12.2011. Опубл. 10.07.2012. Бюл. № 13.
7. ґрунтоцементные основания и фундаменты / М.М. Вагидов, Н.Л. Зоценко // *Вестник Дагестанского государственного технического университета* : сб. научн. трудов. Технические науки. Махачкала : ДГТУ, 2012. Вып. 26. С. 94–102.
8. Будівельні властивості ґрунтоцементу за наявності у його складі органічних речовин / Ю.Л. Винников, О.І. Ярмолюк // *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск : ПГАСА, 2010. Вып. 56. С. 97–103.