

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
ТА ОБЛАДНАННЯ БІОКОНВЕРСІЇ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2013

УДК 662.767.2

P25

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № _ від _ _____ 2013 р.)

Рецензенти:

С. Й. Ткаченко, доктор технічних наук, професор

І. П. Паламарчук, доктор технічних наук, професор

Ратушняк, Г. С.

Енергоефективні технологічні процеси та обладнання біоконверсії : монографія / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 160 с.

ISBN

В монографії обґрунтовано доцільність теоретичного та експериментального дослідження кінетики та механізмів біоконверсії для інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату за рахунок вдосконалення обладнання та технології. Теоретично обґрунтовано критерії вдосконалення конструктивно-технологічних параметрів біореакторів. Розроблено математичну модель управління процесом біоконверсії шляхом вдосконалення конструктивно-технологічних параметрів біореакторів із застосуванням нечіткої логіки та лінгвістичних змінних, яка дозволяє оптимізувати параметри інтенсифікації анаеробного бродіння субстрату. В результаті оброблення експериментальних досліджень уточнено теоретично обґрунтовані фактори впливу параметрів перемішування на енергоефективність біореактора.

УДК 662.767.2

ISBN

© Г. Ратушняк, К. Анохіна, 2013

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ БІОКОНВЕРСІЇ.....	8
1.1 Основні тенденції розвитку та вдосконалення систем біоконверсії.....	8
1.2 Напрямки інтенсифікації анаеробного процесу бродиння при виробництві біогазу.....	15
1.3 Конструктивні особливості устаткування біоконверсії..	21
РОЗДІЛ 2 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БІОКОН- ВЕРСІЇ ШЛЯХОМ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ АНАЕРОБНОГО БРО- ДІННЯ ПРИ ПЕРЕМІШУВАННІ СУБСТРАТУ.....	31
2.1 Теоретичне обґрунтування вдосконалення енерго- ощадних механізмів біоконверсії та конструктивно- технологічних параметрів біореакторів.....	31
2.2 Енергетичні витрати на конструктивно-технологічне забезпечення інтенсифікації біоконверсії.....	38
2.3 Моделювання нестационарних режимів теплообміну в біореакторах з вертикальним перемішувачем.....	43
2.4 Енергетичні витрати для забезпечення інтенсифікації ферментації субстрату.....	47
2.5 Обґрунтування конструктивних схем біореакторів.....	53
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМІВ БІОКОНВЕРСІЇ В БІОРЕАКТОРАХ З МЕХАНІЧНИМ ПЕРЕМІ- ШУВАННЯМ СУБСТРАТУ.....	62
3.1 Моделювання процесу біоконверсії з використанням лінгвістичних змінних та нечіткої логіки.....	62
3.2 Експертна система інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо вдосконалення параметрів біореакторів.....	75
3.3 Моделювання продуктивності біореактора з використанням нейро-нечіткої мережі.....	79

3.4 Моделювання кінетики механічного процесу перемішування органічної маси в біореакторі з вертикальним пропелерним перемішувачем.....	87
3.5 Моделювання процесу седиментації полідисперсного субстрату при перемішуванні в біореакторі.....	93
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕМІШУВАННЯ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ БІОРЕАКТОРІВ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ІННОВАЦІЙНИХ ПРОЕКТІВ БІОКОНВЕРСІЇ.....	
4.1 Програма та методика експериментальних досліджень впливу параметрів перемішування та термостабілізації на енергоефективність біореакторів.....	99
4.2 Результати експериментальних досліджень впливу параметрів перемішування на енергоефективність біореакторів.....	102
4.3 Управління енергоефективним технологічним процесом інтенсифікації виробництва біогазу при перемішуванні субстрату.....	109
4.4 Енергоощадні конструктивно-технологічні схеми вироблення біогазу.....	114
4.5 Інтенсифікація біоконверсії шляхом використання відновлювальних джерел енергії.....	120
4.6 Економічне оцінювання інноваційних енергоефективних проектів біоконверсії.....	135
ЛІТЕРАТУРА.....	139

ВСТУП

Необхідність збалансованого споживання енергетичних ресурсів є головним завданням суспільства в зв'язку зі зменшенням запасів традиційного палива та подальшим зростанням його вартості, а також погіршенням екологічної ситуації. Сучасний стан енергоспоживання в Україні за умови, що 40 % енергоносіїв щорічно імпортується, потребує впровадження енергоощадних технологій та відновлюваних альтернативних джерел енергії, а також усунення екологічних проблем, пов'язаних із нераціональною утилізацією органічних відходів тваринного походження. Реалізація біоконверсійних процесів анаеробного зброджування шляхом утилізації органічних відходів в біореакторах дозволяє отримати альтернативне джерело енергії – біогаз, а також попередити забруднення біосфери шкідливими речовинами.

Законодавча база України сприяє поширенню енергозберігаючих технологій та альтернативних джерел енергії. Верховною Радою України було прийнято закон «Про альтернативні джерела енергії» (20 лютого 2003 р.) та закон «Про розвиток виробництва та споживання біологічних видів палив» (18 червня 2007 р.), якими передбачено комплекс державних програм з енергозбереження та впровадження альтернативних джерел енергії з використанням біомаси. Однією з причин недостатнього впровадження інноваційних енергоощадних проектів альтернативних джерел є висока енергоємність процесів біоконверсії та недостатня вивченість тепло- і масообмінних характеристик та кінетики технологічного обладнання. Проведення комплексу теоретичних та експериментальних досліджень механізму та кінетики технологічного процесу біоконверсії відходів тваринного походження є актуальним.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано механізми вдосконалення режимів анаеробного бродіння перемішуваного субстрату відходів тваринного походження і зменшення енергетичних витрат на їх забезпечення та запропоновано нові конструкції біореакторів для їх практичної реалізації; вперше розроблено експертно-моделювальну систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо вдосконалення механізмів інтенсифікації процесу анаеробного бродіння органічних відходів при перемішуванні

субстрату з використанням теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної й нейронних мереж; встановлено закономірності кінетики процесу перемішування та седиментації полідисперсної органічної маси в біореакторі з вертикальним перемішувачем залежно від технологічних параметрів і фізичних властивостей субстрату; експериментально підтверджено доцільність та ефективність перемішування субстрату вертикальною мішалкою в біореакторі та його вплив на інтенсивність процесу анаеробного бродіння при виробництві біогазу; запропоновано енергоощадні конструктивно-технологічні схеми біоконверсії відходів тваринного походження та оцінено їх конкурентоспроможність при виробництві альтернативного джерела енергії – біогазу та екологічно безпечних добрив.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовано конструктивні енергоощадні схеми для біореакторів. Розроблено та виготовлено експериментальний біореактор з пристроями термостабілізації та інтенсифікації тепломасообмінних процесів – вертикальним лопатевим перемішувачем. За результатами експериментальних досліджень виявлено, коли споживана потужність і час бродіння найменші, а продуктивність біореактора більша порівняно з існуючими. Результати досліджень є основою для інтенсифікації та підвищення енергоощадності процесу анаеробного бродіння субстрату відходів тваринного походження шляхом конструктивного вдосконалення механічного перемішування.

РОЗДІЛ 1

ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ БІОКОНВЕРСІЇ

1.1 Основні тенденції розвитку та вдосконалення систем біоконверсії

При зменшенні видобутку та збільшенні вартості традиційних видів палива (вугілля, нафтопродукти, природний газ тощо), використання органічних відходів, відходів тваринництва, рослинних залишків сільськогосподарського виробництва, твердих побутових відходів комунального господарства міст, якщо не повністю, то хоча б частково забезпечить потреби в енергетичних ресурсах. Прогнозованих ресурсів нафти на планеті вистачить не більше як на 20–40 років. В зв'язку з цим актуальною проблемою є пошук і використання відновлювальних джерел енергії [1–3]. Екологізація господарської діяльності потребує структурно-технологічної перебудови управління енергетичним комплексом на базі трансферу інноваційних енергоощадних екологічно безпечних технологій.

Законодавча база України сприяє поширенню енергозберігаючих технологій та альтернативних джерел енергії. Верховною Радою України було прийнято закон «Про енергозбереження» [1] та закон «Про альтернативні джерела енергії» [2], якими передбачено комплекс державних програм з енергозбереження та впровадження альтернативних джерел енергії. Згідно з «Державною цільовою економічною програмою енергоефективності 2010–2015 рр.» визначено переформування структури енергетичного балансу України за рахунок зменшення в ньому частки природного газу на 14–15 млрд м³ щорічно із заміщенням його іншими видами енергоресурсів, в т. ч. біогазу.

Теоретична методологія та прикладні аспекти трансформаційних особливостей розвитку ринку біопалив в Україні та організаційно-технологічні механізми впровадження інновацій в процеси біоконверсії досліджувались в роботах Б. Баадера, Д. Бойлса, Г. Г. Гелетухи, М. Ф. Друкованого, В. О. Дубровіна, Г. М. Забарного, В. Л. Зав'ялова,

Г. М. Калетніка, С. О. Кудрі, В. М. Перегінця, С. Соуфера, С. Й. Ткаченка [4–12] та ін.

Біоконверсія є технологічним процесом, який передбачає перероблення органічної маси з метою отримання тепла або палива високої якості, а також екологічно чистих органічних добрив. Біоконверсія є одним з найважливіших відновлюваних джерел енергії з найбільшим потенціалом. На сьогодні у країнах Євросоюзу функціонує понад 6500 біореакторів різного типу, що дає змогу отримувати понад 10 млн МВт·год електричної та близько 10 млн. Гкал теплової енергії щорічно [4]. Україна знаходиться серед 10 найбільших потенціальних виробників відновлюваної біоенергії в світі. Використання нетрадиційних джерел енергії дозволить суттєво зменшити енергозалежність нашої держави та негативний вплив на екологічний стан навколишнього середовища.

При переробленні органічних відходів з метою виробництва біогазу вони використовуються повністю. В результаті не лише покращується санітарний стан території, знищуються збудники інфекційних захворювань, зникає неприємний запах рослин, що гниють, знищується насіння бур'яну, а й утворюються цінні високоякісні добрива, що мають підвищений гумусний потенціал [11–23].

Зростання вартості традиційних енергоносіїв та подальше техногенне навантаження на природне середовище зумовлюють всебічне використання відновлюваних альтернативних джерел енергії. До 65 % відновлюваних енергоносіїв можна отримати із органіки сільськогосподарського походження [1, 4]. Економічно доцільний потенціал біомаси України становить 27 млн тонн умовного палива [4]. Середня кількість біогазу, яку можна отримати з 1 м³ виділень тварин, оцінюється у 20–25 м³, хоча рентабельною кількістю в техніко-економічному відношенні вважається 30–35 м³. Таку кількість газу можна отримати шляхом поєднання виділень тварин та господарських відходів з іншою сировиною, яка відрізняється високим вмістом сухої органічної маси, а саме відходами з підприємств харчової промисловості або рослинної маси [4]. Біогазовий потенціал залишкової біомаси складає в Україні 2,13 млн т у. п. Новітні технології біоконверсії дозволяють отримувати біопалива в різних агрегатних станах, а саме: твердому

(брикети, гранули тощо), рідкому (біодизель) й газоподібному (біогаз), та екологічно чисті органічні добрива. Перспективним напрямком біоконверсії є отримання біогазу шляхом утилізації відходів органічного побутового, тваринного та сільськогосподарського походження, а також відходів підприємств харчових виробництв. Обсяги використання біогазу, отриманого з гною, можуть становити в найближчі декілька років близько 130 млн м³.

Враховуючи вид виробленого кінцевого продукту (тверде, рідке або газоподібне паливо), існують різні способи перероблення біомаси: термічний, хімічний, термохімічний, біологічний, біохімічний, в яких задіяні термохімічні, біохімічні та агрохімічні процеси [24]. Вибір способу перероблення органічних відходів сільськогосподарського виробництва та відходів тваринного походження харчових виробництв залежить від виду біомаси, кінцевої мети (одержання твердого, рідкого або газоподібного палива), економічної та екологічної доцільності та ін. Залежно від способів перероблення органічної маси на рис. 1.1 наведено класифікацію основних типів енергетичних процесів [1, 24].

Термохімічні процеси включають в себе спалювання, піроліз, газифікацію та гідрогенізацію. Спалювання використовують з метою отримання теплоти із сухого гомогенного палива. Під час піролізу біомасу нагрівають до температури 450...550 °C без доступу повітря, в результаті чого отримують твердий залишок – кокс (деревне вугілля), газу (CO, CO₂, H₂, H₂O тощо) та рідинну масу (спирти, олії тощо). При газифікації відбувається нагрівання (часткове спалювання) палива з обмеженою кількістю повітря у діапазоні температур 800...1600 °C та тиску від 1,0 до 10,0 МПа. Під час газифікації утворюється синтез-газ (CO, H₂, CH₄ у відповідній пропорції). Гідрогенізація відбувається з різними варіантами попередньої підготовки сировини і проведення самого процесу.

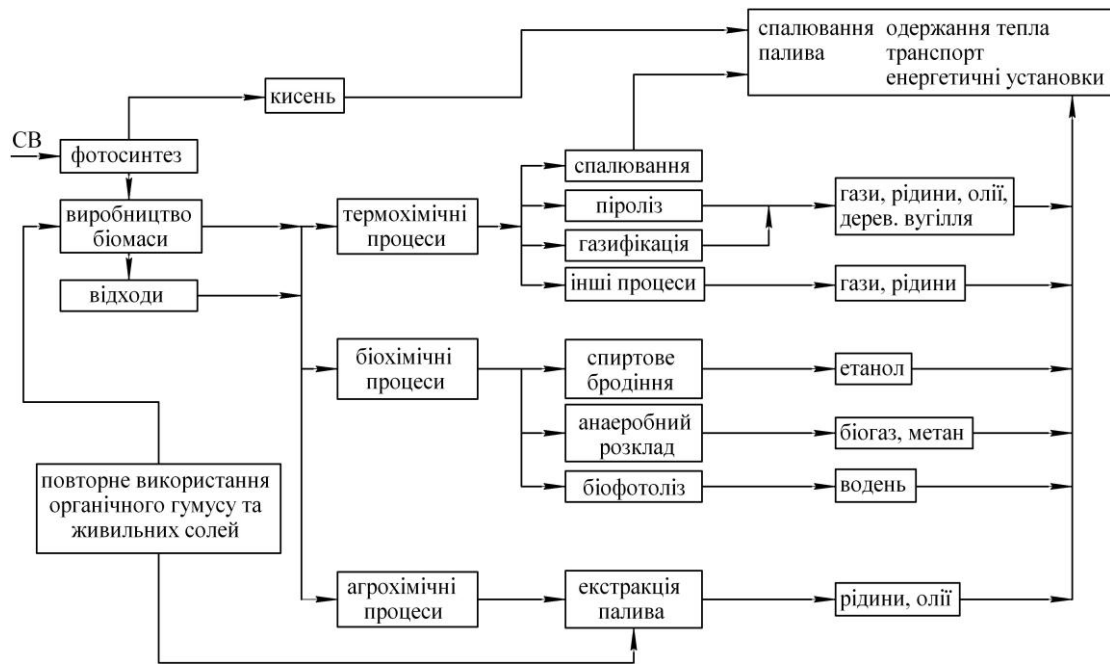


Рисунок 1.1 – Енергетичні процеси перероблення біомаси

До біохімічних процесів відносять спиртову ферментацію, анаеробну переробку та біофотоліз. В результаті спиртової ферментації утворюється етиловий спирт, що є альтернативною бензином. Під час анаеробної переробки мікроорганізми в безкисневому середовищі, поглинаючи енергію, безпосередньо переробляють вуглецевмісні компоненти і виробляють внаслідок цього діоксид вуглецю (CO_2) і метан (CH_4). Отриману суміш CO_2 і CH_4 , а також супутніх газів, називають біогазом. Біофотолізом є розкладення води на водень та кисень під дією світла. Агрохімічним процесом є екстракція палива. Рідке або тверде паливо можна отримати прямо від живих або свіжозрізаних рослин, з яких збирають або вичавлюють пресом сік (наприклад, виробництво каучуку).

Отримання біогазу із органічних відходів базується на їх властивості виділяти горючий газ в результаті метанового бродіння в анаеробних умовах. Біогаз, що утворюється при метановому бродінні, являє собою суміш, що складається із 50...80 % метану, 15...20 % вуглекислого газу, біля 1 % сірководню, а також незначної кількості деяких інших газів (азоту, кисню, водню, аміаку, окису вуглецю тощо) [25].

Відферментована маса, що перебродила, зовнішнім виглядом не відрізняється від первинної сировини, маючи близьку до неї вологість.

Водночас це готове високоякісне знезаражене і позбавлене неприємних запахів органічне добриво, придатне для безпосереднього внесення в ґрунт без додаткового витримування в траншеях і відстійниках. У відферментованій масі знищено патогенну мікрофлору, але цілком збережено поживну цінність гною за азотом, фосфором, калієм тощо [26, 27].

Як вихідний матеріал для одержання біогазу можуть бути використані відходи тваринницьких ферм та різних рослин, побутові органічні відходи населених пунктів та відходи тваринного походження харчових виробництв. Вихід і склад біогазу визначається значною кількістю чинників, але в основному залежить від складу вихідної сировини [28–33]. Вихід біогазу з різних відходів сільськогосподарського виробництва та органічних побутових й промислових відходів наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихід біогазу і вміст у ньому метану при використанні різних видів відходів [25]

Вихідна сировина	Вихід біогазу на 1 кг сухої речовини, л/кг	Вміст метану (CH ₄), %
Гній великої рогатої худоби	200–300	50
Гній свинячий	340–480	60–75
Кінський гній із соломою	250	56–60
Бадилля картопляне	420	60
Стебла кукурудзи	420	53
Солома пшенична	342	58
Лузга соняшникова	300	60
Силос	250	84
Трава свіжа	360	52
Бурак	430	84
Відходи моркви	250	60
Тирса деревини	220	51
Твердий осад стічних вод	570	70
Фекальний осад	250–310	60
Домашні відходи і сміття	600	50

Процес анаеробного розкладу органічних речовин здійснюється двома основними групами мікроорганізмів. Перша група – це гетеротрофні кислототворні бактерії, які клітковими ферментами здійснюють гідроліз (розклад) складних органічних з'єднань (білків, жирів, вуглеводнів) до мономерів та утилізують їх із створенням низькомолекулярних кислот, діоксиду вуглецю, аміаку, сірководню та води.

Друга група анаеробних організмів – це метанотворні бактерії, які в своєму розвитку використовують лише низькомолекулярні органічні речовини, тобто продукти обміну кислототворних бактерій. Метанове бродіння органічних речовин протікає з утворенням аміаку, метану (біогаз), вільного азоту, діоксиду вуглецю та води [10].

Ефективність виробництва метану залежить від кількості нерозкладеної вуглецевмісної речовини у відстої: чим старіші відходи тваринного походження, тим вища ступінь його попереднього розкладу і тим менше нерозкладеної речовини, яка може бути перетворена в метан. Технологія виробництва метану також залежить від вмісту у відстої інертних речовин: чим їх більше, тим менший вихід метану на одиницю маси відходів [33–36].

Анаеробні біореактори з іммобілізованою мікрофлорою є більш поширеними, ніж аеробні біорегенератори, оскільки в них не потрібно організовувати умови для інтенсивного масообміну (постійна аерація). В біореакторах середньої конструкції для анаеробного перероблення мінімальний час бродіння складає 6–12 год, що значно перевищує показники аеротенків [14].

Якщо вихідний матеріал знаходиться в рідкому стані, то анаеробний спосіб бродіння є переважним, оскільки потреби в енергії для окремих етапів процесу (наприклад, підігріву) можуть бути покриті за рахунок отриманого газу. При відповідному веденні процесу можливим є додаткове зниження витрат завдяки корисному використанню надлишкової кількості газу. Ще однією перевагою анаеробного бродіння можна вважати підвищений вміст азоту в кінцевому субстраті (при аеробному бродінні втрати азоту сягають 40 %) [17].

За рахунок анаеробного перероблення відходів тваринного походження із вмістом сухого залишку від 5 до 15 % отримується біогаз з теплою згоряння від 2,5 до 5,6 кВт·год/м³ [36]. Густина біогазу –

1,22 г/м³. Вибухонебезпечна концентрація його в повітрі становить від 19 до 25 %. Споживання енергії на власні потреби складає від 20 до 30 % біогазу, який отримується внаслідок бродіння.

Підхід до проблеми перероблення відходів харчових та сільськогосподарських виробництв повинен базуватись перш за все на вимогах захисту навколишнього середовища, до яких входять: усунення емісії неприємних запахів при отриманні і зберіганні відходів; зараження людей і тварин збудниками хвороб; запобігання перевантаженню ґрунту, води та рослин шкідливими речовинами. При цьому застосування анаеробних методів утилізації відходів тваринного походження харчових підприємств дозволяє отримати додаткові переваги з точки зору виробництва продукції та економії енергії, оскільки при заданих умовах зменшуються затрати на первинну енергію шляхом реалізації енергетичного потенціалу відходів.

Основні тенденції розвитку систем біоконверсії визначаються вимогами охорони навколишнього середовища та можуть бути досягнуті в результаті використання як аеробного, так і анаеробного способу бродіння.

Вирішальними факторами при виборі конкретного способу бродіння є:

- первинні та експлуатаційні витрати;
- надійність біогазового обладнання в експлуатації;
- вимоги до технічного обслуговування та персоналу;
- ефективність використання отриманої продукції.

Державна політика з впровадження енергозберігаючих технологій та альтернативних джерел енергії може бути успішно реалізована шляхом подальшого розвитку систем біоконверсії. Вирішення цієї задачі потребує детального дослідження процесів інтенсифікації анаеробного бродіння в біореакторах з метою розроблення практичних рекомендацій з удосконалення систем технологічних процесів біоконверсії.

Ефективність перероблення біомаси в енергетичну продукцію досягається лише за раціональних параметрів технологічних процесів і машин для переробних підприємств, що здійснюють конверсію біосировини. Формалізація зв'язків між параметрами обладнання та пара-

метрами процесів, адаптивних до наявної сировини, дозволить підвищити ефективність біоенергетичних виробництв та показники якості біопалива.

1.2 Напрямки інтенсифікації анаеробного процесу бродіння при виробництві біогазу

Для досягнення високої ефективності роботи біореакторів та отримання максимальної кількості біогазу із одиниці об'єму біомаси необхідно створити оптимальні технологічні параметри в біореакторі [37]. На інтенсивність процесу зброджування і, як наслідок, утворення біогазу впливають чотири групи факторів: біологічні, фізичні, хімічні та організаційно-технологічні.

Структурну схему шляхів інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату в біореакторах наведено на рис. 1.2.

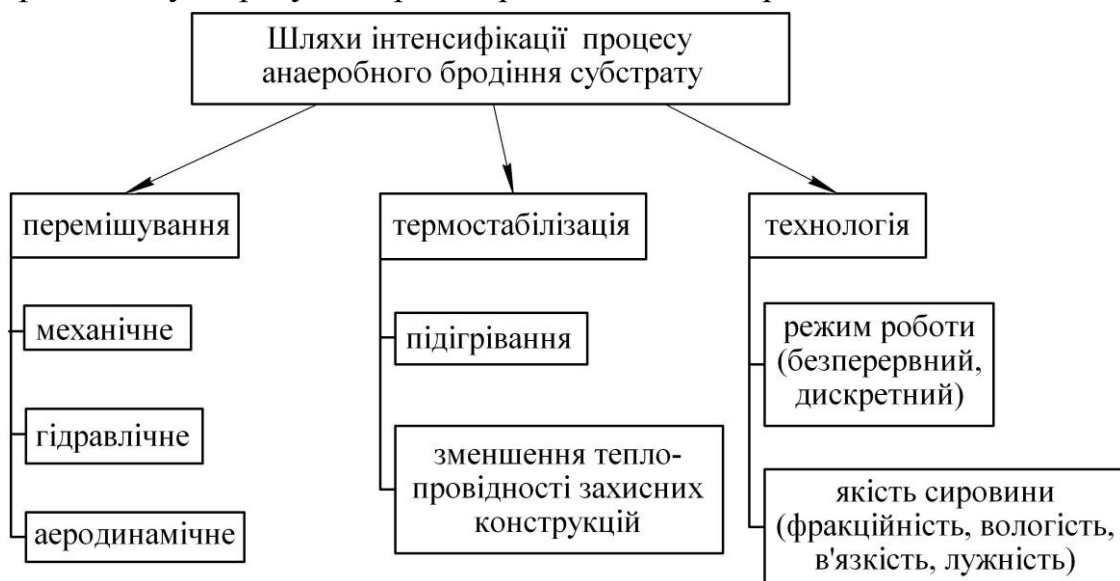


Рисунок 1.2 – Структурна схема шляхів інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату в біореакторах

До біологічних факторів відносяться: склад зброджуваної біомаси (вміст білків, жирів, вуглеводів, лігнінів); склад мікрофлори (кількість і групи мікроорганізмів відповідної стадії розкладання); умови життєдіяльності мікроорганізмів (вміст шкідливих домішок). Фізичні фактори включають: температуру зброджування; тиск у біореакторах; гідравлічний режим. Хімічні фактори визначаються кислотністю сере-

довища (величина рН); вмістом летючих жирних кислот у збродженій масі; обсягом і складом біогазу, що утворюється. Організаційно-технологічні фактори передбачають: дозу добового завантаження нових порцій збродженної маси; навантаження за беззольною речовиною; вміст у біомасі речовин, що не піддаються переробці.

Залежно від температурного інтервалу, що підтримується в біореакторі в процесі роботи, розрізняють такі режими збродження [10, 13, 14, 25, 32, 38]:

- кріофільний ($t < 20^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{опт}} = 5\text{--}15^{\circ}\text{C}$);
- мезофільний ($t = 25\text{--}45^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{опт}} = 32\text{--}42^{\circ}\text{C}$);
- термофільний ($t = 45\text{--}55^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{опт}} = 48\text{--}51^{\circ}\text{C}$).

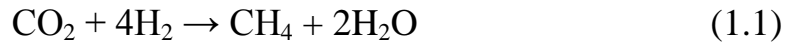
Кріофільний режим збродження не потребує спеціального підігріву субстрату, протікає при температурі навколишнього середовища і використовується на невеликих індивідуальних установках у країнах з теплим кліматом. Як правило, такі установки мають дискретний характер завантаження і вивантаження. Перевагою кріофільного режиму є відсутність витрат теплової енергії на підтримку стабільної температури. До недоліків слід віднести повільне протікання біологічних процесів і низький вихід біогазу.

Мезофільний режим збродження, як це підтверджено дослідженнями і практикою експлуатації установок [9, 10, 12, 17], протікає найбільш інтенсивно в температурному інтервалі $32\text{--}42^{\circ}\text{C}$. При цьому найбільш активно «працюють» метаногенні бактерії з максимальним утворенням біогазу. Однак відхилення від оптимального інтервалу температур на $\pm 5^{\circ}\text{C}$ приводить до зменшення виходу біогазу в 2–2,5 рази, що свідчить про чутливість бактерій до температури середовища і потребує виконання конструктивно-технологічних заходів щодо її підтримання. Підігрівання і підтримання стабільної температури збродження здійснюється, як правило, прокачуванням нагрітої води через спеціальні теплообмінники, змонтовані в біореакторі. Нагріту воду одержують у котельному агрегаті, використовуючи для його роботи частину біогазу.

Термофільний режим дає можливість одержувати максимальну кількість біогазу за короткий термін збродження. Інтенсивність збродження в 2 рази вища, а час перебування в біореакторі в 2 рази

менший, ніж при мезофільному. Однак підтримання порівняно високої температури потребує значних витрат енергії [25].

Підвищення тиску в біореакторі впливає двозначно. З одного боку, з підвищенням загального тиску і парціального тиску CO₂ реакція утворення метану



зміщується вправо, що є сприятливим для одержання біогазу. З іншого боку, підвищення тиску веде до зростання розчинності газів (H₂ і CH₄) у воді, що гальмує вихід метану (CH₄) у газову фазу. Тому більшість установок працюють при тиску, що незначно перевищує атмосферний.

Підготовка біомаси включає відділення сторонніх речовин та субстанцій, подрібнення, гомогенізацію і встановлення потрібного для зброджування складу субстрату. Подрібнення біомаси дозволяє покращити змішування субстрату з вмістом ферментера та поліпшує доступ бактеріям до поживних речовин субстрату. За рахунок цього процес зброджування протікає швидше і в більш повному обсязі.

Різні групи бактерій для життєдіяльності віддають перевагу різній кислотності середовища. Оптимальним вважається значення рН 4,5–7,5 [25]. Для стабілізації використовують в біореакторі добавки карбонату NaHCO₃ або бікарбонату NaCO₃ натрію.

Деякі елементи і сполуки діють гнітюче на мікроорганізми аж до повного припинення їхньої життєдіяльності. До таких речовин відносяться: солі важких металів; солі лужних і лужноземельних металів; нітрати, сульфати; органічні розчинники й антибіотики.

Деякі речовини залежно від концентрації можуть бути стимулювальними, гальмувальними або інгібувальними. Аміак при концентрації більше 200 мг/л стимулює ріст мікроорганізмів, при концентрації більше 500 мг/л – гальмує їхній ріст, а при концентрації більше 3000 мг/л – токсичний.

На підставі досвіду експлуатації біореакторів у мезофільному режимі оптимальною дозою завантаження на добу вважається 7–10% від загальної маси субстрату при вологості 90–95 % [25].

Із закордонних даних стабільна робота біореактора забезпечується при витраті 1–2,5 кг сухої речовини на 1 м³ установки за

добу [25]. Максимальне навантаження допускається 8,5 кг сухої речовини на м³ за добу. При цьому вихід біогазу складає 0,8–1,4 м³/кг сухої речовини .

Час перебування субстрату в біореакторі складає 15–40 діб, а ступінь перероблення сухої речовини 36–54 % [25].

Експлуатація комплексів одержання біогазу з відходів сільського господарства показала, що ліпіди (жири) і вуглеводи розкладаються на 62–70 %, білки – на 46–48 %, розкладання лігнінів не перевищує 20 %.

Тривалість виходу біореактора на стабільний режим вироблення біогазу (запуску) залежить від інтенсивності розмноження метаногенних бактерій. З метою скорочення часу запуску доцільно під час завантаження вводити в установку зброджувальну масу («запал») зі стабільно працюючих установок.

Процес анаеробного бродіння відбувається ефективніше при його інтенсифікації та термостабілізації. Важливим аспектом стабільності теплового режиму в біореакторі є підігрівання субстрату та одночасна теплоізоляція стінок біореактора від коливань температур навколишнього середовища. Рентабельність біореакторів пропорційна витратам енергії на її обігрівання. Мікробіологічні особливості протікання процесу анаеробного бродіння потребують дотримання меж температурних режимів і температурної стабілізації, рівномірного прогрівання середовища, відсутності зон переохолодження і перегрівання [39-44].

Щоб отримати необхідну для процесу бродіння температуру і за можливості підтримувати її на сталому рівні, варто, перш за все, підігріти до необхідної температури субстрат, який подається в біореактор. Додаткове підведення теплоти необхідне для компенсації теплових втрат. Теплоту можна підводити до субстрату в робочому середовищі біореактора або в пристрої, який його підживлює. Оскільки перепади температури негативно впливають на хід біологічного процесу анаеробного бродіння, необхідно за можливості поєднувати підведення теплоти до біореактора з інтенсивним перемішуванням субстрату [8, 14].

Крім того, в системі підведення теплоти необхідно передбачати, щоб на поверхнях теплопередачі не відкладалися тверді частинки суб-

страту. Тому рекомендовані, наприклад, високі швидкості руху субстрату відносно поверхонь теплопередачі або, щоб ці поверхні легко очищувались. На роботу теплообмінника не повинна впливати присутність в субстраті твердих матеріалів (наприклад, стебел соломи, пір'я, шерсті) [3, 13].

У невеликих біореакторах використовуються теплообмінні нагрівні агрегати (наприклад, гнучкі неметалеві трубопроводи, циліндричні або плоскі теплообмінники), через які проходить гаряча вода і які можна виймати із біореактора при її очищенні. Нагрівачі, вбудовані в стінки біореакторів, доцільно застосовувати з погляду на їх коефіцієнти корисної дії лише в тому випадку, якщо вони можуть передавати теплоту до субстрату з обох сторін стінки так, як це відбувається в двокамерній установці з внутрішньою перегородкою [13]. Крім того, підігрівання субстрату можна здійснювати безпосередньо, подаючи в нього гарячу воду або пару. Оскільки вода служить одночасно для розбавлення і турбулізації субстрату, який при завантаженні містить велику кількість твердих частинок, цей метод може виявитись ефективним [3, 13]. Підігрівання субстрату шляхом введення пари під тиском приводить до підвищення вмісту вологи в біогазі, для усунення якої при підготовці газу до використання необхідні додаткові заходи. У великих установках, особливо в комунальних установках для очищення стічних вод, цим недоліком нехтують, зважаючи на більш високий енергетичний коефіцієнт корисної дії теплопередачі.

Рівномірну передачу теплоти до субстрату можна забезпечити за допомогою теплообмінників, розташованих поза установкою. Проте, їх слід використовувати лише в поєднанні з системою вимушеної циркуляції субстрату, що спричинює відповідне підвищення витрат енергії, але дозволяє надійно регулювати температуру бродіння. Ця система підігрівання має переваги завдяки одночасному підігріванню та перемішуванню свіжого та циркулюючого субстрату. Різниця між температурами субстрату, який надходить в біореактор, та тим, що там знаходиться, буде незначною. До того ж, надійно підтримується швидкість переміщення субстрату, яка є необхідною для запобігання випадіння твердого осаду на поверхнях теплообмінника. Розташування

теплообмінників поза межами біореактора значно полегшує доступ до них для обслуговування та ремонту.

Перемішування субстрату в біореакторі сприяє інтенсивному контакту мікроорганізмів з живильними речовинами, інтенсифікує видалення біогазу і запобігає утворенню кірки на поверхні, що приводить до збільшення утворення біогазу. Перемішування біомаси в даний час здійснюється, як правило, механічними мішалками з електроприводом або зворотним біогазом після підвищення його тиску в компресорі.

У першому випадку витрати електроенергії складають 50 Вт/м^3 об'єму біореактора. В другому випадку при витраті біогазу близько $1 \text{ м}^3/\text{м}^2$ площі поверхні досягається гарний ефект перемішування, але підвищення парціального тиску CO_2 і CH_4 може уповільнити процес утворення біогазу.

Інтенсифікувати процес вивільнення біогазу можливо за рахунок перемішування органічної маси віброактивацією, барботуванням чи механічним способом. Постійне рівномірне розподілення та переміщення рідини і твердих речовин, які містяться в ній та різняться за розміром, формою та щільністю, є передумовою безперешкодного та ефективного протікання процесу бродіння [13].

В бродильних камерах необхідно проводити стрімке перемішування для попередження виникнення у верхній частині біореактора спливаючої речовини. Це значно прискорює процес бродіння і вихід біогазу. Без перемішування для отримання такої ж продуктивності об'єм установки повинен бути значно збільшений.

Перемішування здійснюється [13, 14]:

- механічними мішалками різної форми або насосами з приводом від електродвигуна;
- гідравлічними насадками за рахунок енергії струменя, що перекачується насосом зброджуваного субстрату, або рециркуляцією;
- надмірним тиском біогазу, що пропускається через барботажний пристрій або трубку, розташовану в нижній частині редуктора.

Застосування обертових перемішувальних пристроїв потребує високих вимог до форми біореактора, оскільки вона повинна забезпечувати необхідні умови для зменшення утворення осаду і плаваючої кірки. Швидкість переміщення, що потрібна для інтенсивного перемішу-

вання субстрату, визначається умовами турбулентності в усіх зонах установки. Тому такі мішалки можуть ефективно використовуватись лише в невеликих біореакторах при дії на важкі субстрати. Для субстратів малої в'язкості, що містять мало речовин, схильних до осадження чи утворення плаваючої кірки, механічні перемішувальні пристрої є більш ефективними і у відносно великих біореакторах.

У великих біореакторах, особливо циліндричної форми, субстрат можливо перемішувати гідравлічним способом, тобто за допомогою струменя рідини. В численних біореакторах, збудованих в Федеративній Республіці Німеччині 20 років тому, добре зарекомендувала себе система з рухомих соплом. При горизонтальному напрямленні сопла, яке обертається навколо осі установки та може переміщуватись вздовж неї, струмінь рідини потрапляє в усі зони робочого простору установки. Гідравлічні системи з нерухомих соплом потребують, навпаки, ретельного підбору згідно з розмірами і формою біореакторів для забезпечення достатнього перемішування субстрату в усіх зонах установки [8].

Високу якість перемішування можна отримати, нагнітаючи отриманий в результаті бродіння газ в рідкий субстрат. Проте, при цьому субстрат не повинен мати високу в'язкість та схильність до утворення плаваючої кірки. В іншому випадку, слід безперервно видаляти частинки, які спливають, або відокремлювати крупні частинки твердого матеріалу від субстрату перед завантаженням його в біореактор.

Перспективними шляхами вдосконалення устаткування для інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату в біореакторах з метою збільшення виходу біогазу та зменшення часу перебування субстрату в установці є механічне перемішування. Одним із напрямків інтенсифікації та зменшення енерговитрат на виробництво біогазу є також зменшення тепловитрат через огорожувальні конструкції корпусу установки [13, 28, 43].

1.3 Конструктивні особливості устаткування біоконверсії

Біореактор – основа будь-якої біогазової установки, тому до його конструкції висуваються досить жорсткі вимоги. Корпус біореактора

повинен бути досить міцним при абсолютній герметичності його стінок. Обов'язковими є надійна теплоізоляція стінок та їх властивість протистояти корозії. При цьому необхідно передбачити можливість завантаження та вивантаження біореактора, а також доступ до його внутрішнього простору для обслуговування [13]. Принцип роботи всіх біореакторів однаковий: після закінчення збирання й підготовки сировини, що полягає в доведенні її до необхідної вологості в спеціальній ємності, вона подається в установку, в якій створюються умови для оптимізації процесу анаеробного бродіння [45–51].

Практично досяжний в промисловій установці вихід газу залежить від багатьох факторів, вплив яких обумовлюється конструкцією установки та виробничими умовами. Суттєве значення мають такі фактори [10]:

- завантаження робочого простору (кількість завантаженого субстрату, що припадає на одиницю чистого об'єму біореактора, а також продуктивність його завантаження);

- технологічний час циклу анаеробного бродіння (час перебування в установці органічної маси, яка в нього закладена);

- інтенсивність перемішування субстрату в об'ємі біореактора.

За конструктивними ознаками біореактори бувають одно- та багатореакторні. Більшу продуктивність мають багатореакторні установки, в яких забезпечується безперервний цикл анаеробного бродіння.

Класифікацію біореакторів за конструктивними ознаками наведено на рис. 1.3.

Для циліндричного резервуара з конусними верхньою та нижньою частинами, як і для яйцеподібних, характерні невеликий простір для накопичення газу, обмежений об'єм плаваючої кірки, а також зручне вивантаження відпрацьованої маси. Однак, в подібних біореакторах створюються менш сприятливі умови для переміщення рідкого субстрату. В індивідуальних господарствах корпус реактора вищевказаної форми, але меншої місткості, виготовляють із сталі або склопластика. В реакторах із склопластика створюються кращі умови для переміщення субстрату [17, 33].

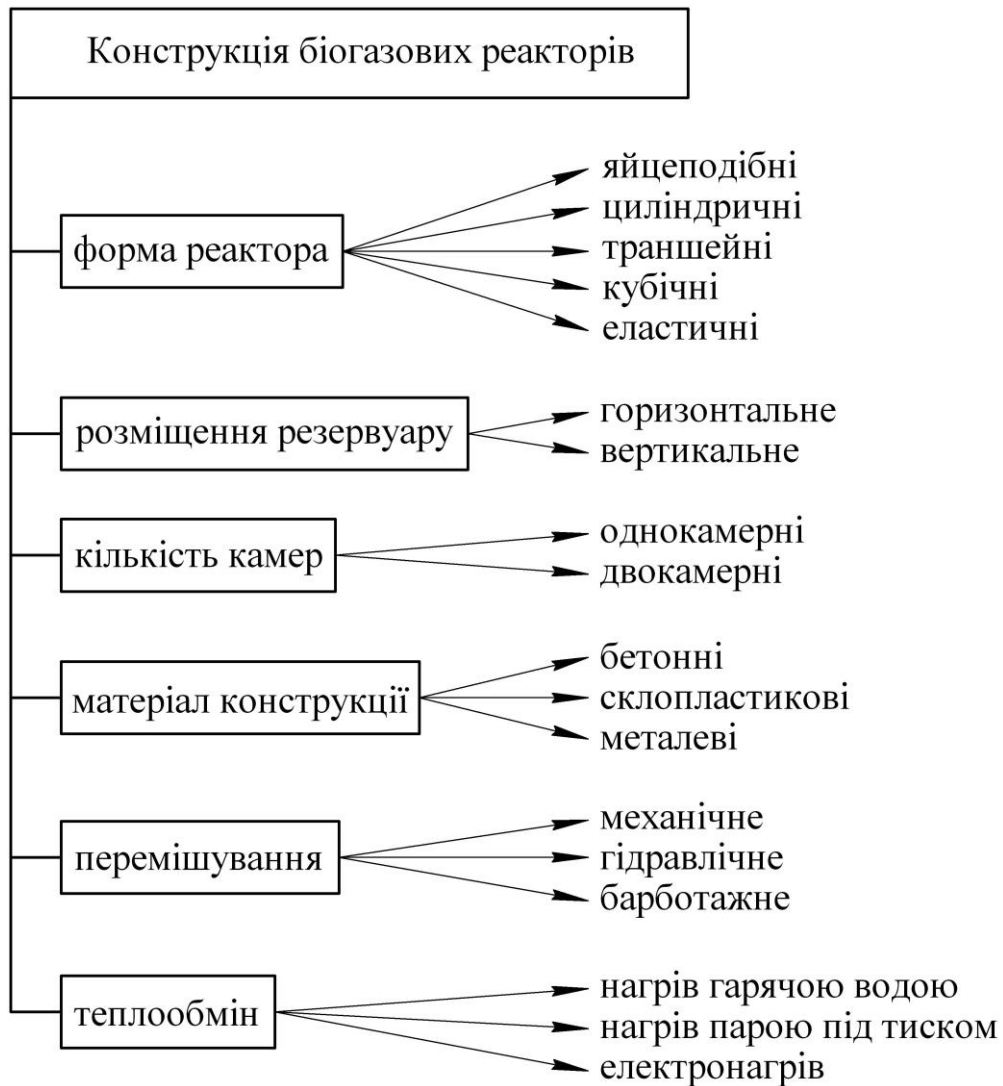


Рисунок 1.3 – Класифікація біореакторів за конструктивними ознаками

З розгляду створення найбільш сприятливих умов для перемішування рідкого субстрату, накопичення газу, видалення відпрацьованих добрив та руйнування кірки, що утворюється на поверхні, доцільно використовувати резервуар, який за формою нагадує яйце (рис. 1.4). Крупні біореактори такої форми зазвичай споруджують із бетону, тому для них характерною є висока вартість виготовлення, що суттєво обмежує їх застосування. Проте установки менших об'ємів зовсім нескладно виконати із склопластика, тобто із армованої поліефірної смоли, до того ж вони мають меншу вартість.

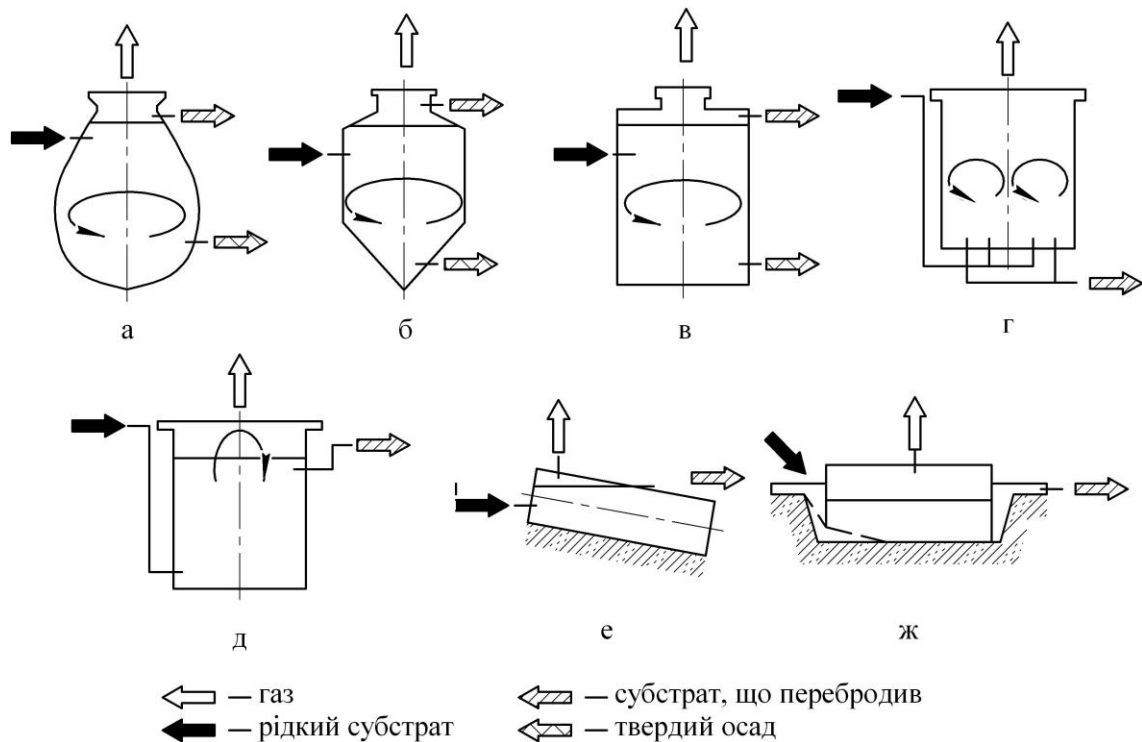


Рисунок 1.4 – Найбільш поширені типи резервуарів біореакторів: а – у вигляді яйця, б – циліндричний з конусними верхньою та нижньою частинами, в – циліндричний, г – циліндричний з перегородкою, д – у вигляді паралелепіпеда (з перегородкою), е – циліндричний (розміщений з нахилом), ж – траншея в ґрунті (із кришкою)

Циліндричні резервуари відносно прості у виготовленні, що пояснюється значним досвідом будівництва ємностей для сільськогосподарських цілей (сталеві, бетонні, склопластикові цистерни-бункери для силосу та інших кормів) [10]. Проте порівняно з резервуарами попередніх форм в циліндричному резервуарі неможливо організувати достатні умови для переміщення субстрату в установці, а тому при цьому доводиться враховувати високі витрати на видалення осаду та руйнування плаваючої кірки, що пов'язано зі збільшенням витрат енергії на перемішування біомаси.

В простих, зокрема, в невеликих біореакторах, які споруджуються власними силами, бродильна камера має форму паралелепіпеда (басейн або яма з кришкою). Для підвищення ефективності такої установки перегороджують вертикальною стінкою, створюючи головну бродильну камеру та камеру для остаточного зброджування та осадження шлам. Проте установки такого типу не дозволяють досягти високого

ступеню розкладення субстрату, оскільки в них практично неможливо забезпечити рівномірне перемішування біомаси, управління завантаженням робочого об'єму камери та дотримання часу перебування маси в установці, що є необхідним для отримання максимальної кількості газу. Руйнування плаваючої кірки та осаду пов'язано зі значними витратами [52–54].

Для збільшення виходу біогазу в результаті анаеробного бродіння субстрату в біореакторі широко застосовується процес перемішування суміші [8, 10, 13, 14, 55–60]. Перемішування інтенсифікує процеси всередині біореактора та запобігає утворенню осаду і плаваючої кірки на поверхні біомаси, що приводить до збільшення утворення біогазу із органічних відходів, а отже, до зростання ефективності біореактора. Відомо механічне, гідравлічне і аеродинамічне перемішування сумішей. Найбільш перспективним устаткуванням для інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату є біореактори із механічним перемішуванням.

Механічне перемішування сумішей здійснюється лопатевими, пропелерними, турбінними та спеціальними мішалками. Класифікацію перемішувальних пристроїв для біореакторів наведено на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Класифікація механічних перемішувальних пристроїв для біореакторів

Турбінні мішалки оснащено лопатями і вони мають чітко окреслений ротор. Залежно від способу кріплення лопатей і їх конфігурації в анаеробній біоконверсії зустрічаються різні типи турбінних мішалок.

Найбільш простою та одночасно високоефективною є мішалка з прямими радіально розташованими лопатями. Плоскі лопаті можуть бути нахилені під певним кутом відносно площини обертання мішалки для кращого перемішування субстрату.

Пропелерні мішалки вважаються найбільш ефективними в тих випадках, коли необхідно створити значну циркуляцію субстрату в біореакторі при мінімальній витраті механічної енергії. Вони якісніше перемішують субстрат, ніж мішалки іншого типу, наприклад, турбінні. Пропелерні мішалки створюють осьову циркуляцію органічних відходів всередині біореактора за рахунок насосного ефекту, тому вони легко піднімають тверді частинки з його дна.

Лопатеві мішалки почали вперше використовуватись в системах біоконверсії та в хімічній промисловості взагалі. На сьогодні вони використовуються у тих випадках, коли немає необхідності в інтенсивній радіально-осьовій циркуляції органічної суміші в біореакторі. Основною перевагою лопатевих мішалок є їх простота та низька вартість.

Якірні та рамні мішалки вирізняються виключно низьким числом обертів. Діаметр таких мішалок наближається до діаметра біореактора, а зазор між лопаттю та стінкою реактора є незначним. Таким чином, у випадку застосування цих мішалок можна уникнути місцевого перегрівання субстрату чи виникнення осаду на дні установки.

Шнекові мішалки працюють за тим принципом, що і пропелерні, але при меншій кількості обертів. Вони застосовуються для перемішування сумішей значної в'язкості, зокрема для органічного субстрату всередині біореактора. В цьому випадку для створення однакової циркуляції субстрату в біореакторі вони затрачають менше енергії, ніж пропелерні мішалки.

Використання дискових та скребкових мішалок в процесах біоконверсії є неефективним, тому майже не застосовується.

Як субстрат доцільно використовувати відходи тваринного походження. Джерело постачання таких відходів наведено на рис. 1.6.

Відомі біореактори, в яких для інтенсифікації процесу бродіння органічної маси використовуються перемішувачі різних видів [61–73]. Для перемішування субстрату застосовуються шнекові або лопатеві

мішалки, які розміщені горизонтально, вертикально, збоку або під кутом. При горизонтальному лопатовому перемішуванні [61–63] лопати рівномірно розподіляють тверду і рідку фазу субстрату по всьому об'єму біореактора. Для термостабілізації процесу анаеробного бродіння використовуються теплообмінники, нагрівальні прилади, а також теплоізоляція стінок біореактора з метою зменшення тепловтрат [74–84].

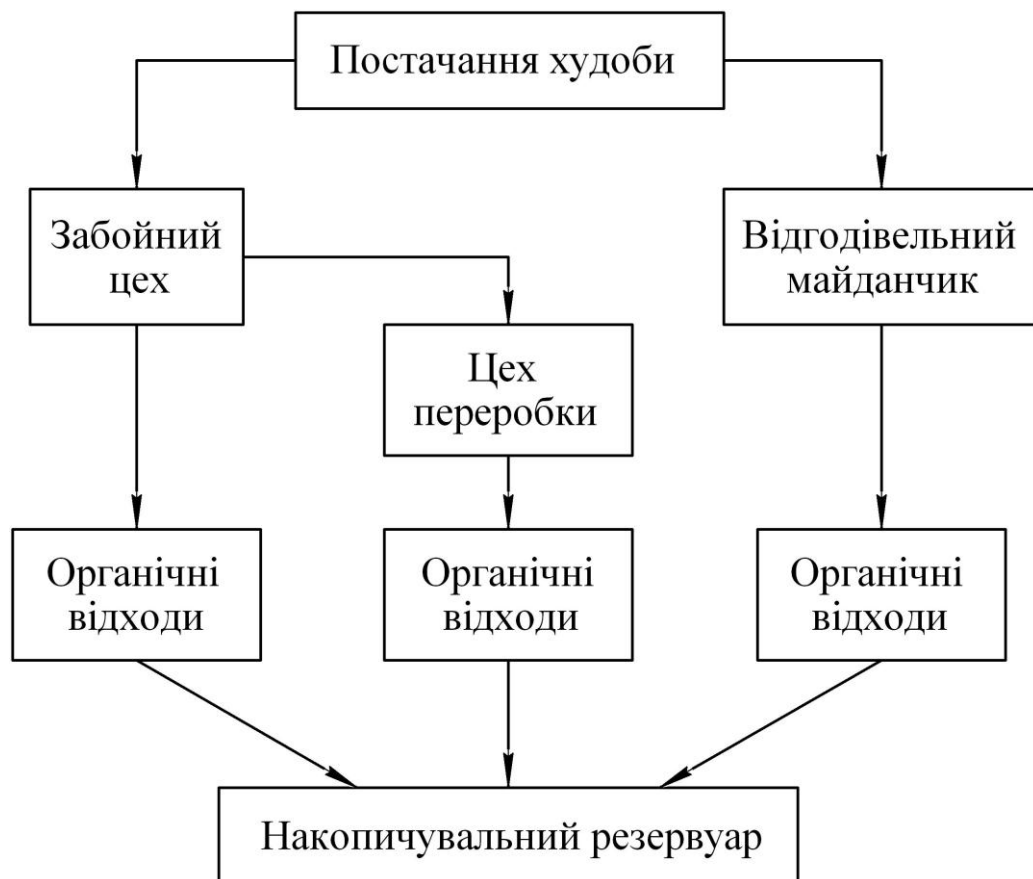


Рисунок 1.6 – Технологічна схема отримання відходів тваринного походження

Для утилізації органічних відходів сільськогосподарського виробництва методом біоконверсії Г. С. Ратушняком та В. В. Джеджулою запропоновано конструктивно-технологічні рішення біореакторів з використанням коливальних полів для підвищення ефективності тепловіддачі від стінки нагрівача до двофазного середовища субстрату [61]. Коливальний рух активуючої пластини здійснюється за допомогою віброприводу на базі гідроциліндра, кривошипно-шатунного механізму чи іншого збурювача, які активізують процес перемішування

субстрату з метою термостабілізації процесу анаеробного бродіння. Розроблено математичну модель процесу турбулізації біогазової установки пластиною-активатором з кривошипно-шатунним механізмом. Експериментально доведено, що коливання середовища пластиною-активатором інтенсифікує вільноконвективну тепловіддачу в субстраті в 1,5–2,5 рази. Авторами також запропоновано раціональні технологічні схеми роботи біогазових установок з рекуперацією тепла шламу та з тепловим насосом, а також структурно-логічні схеми вибору способу та технології очищення біогазу від домішок для використання його в теплотехнічному обладнанні [14].

Авторами С. Й. Ткаченком, Н. В. Резидент, Н. В. Пішеніною, М. С. Гуменюком запропоновано установку для отримання біогазу, що призначена для генерації біогазу та отримання органічних добрив з побутового сміття, листя, відходів тваринництва тощо внаслідок анаеробного розкладу біомаси мікроорганізмами, і використання кінцевих продуктів для побутових потреб. В такій установці [63] за рахунок використання вбудованого теплообмінника і організації механічного перемішування в об'ємі реактора та повної утилізації теплоти збродженого субстрату з'являється можливість створення оптимального температурного режиму для анаеробного зброджування. Це приводить до підвищення виходу біогазу і зменшення енерговитрат при експлуатації установки. Установку для отримання біогазу оснащено перемішувальним пристроєм у вигляді вала із закріпленими на ньому гнучкими лопатками для очищення теплообмінної поверхні, яка вбудована в реактор. Таким чином за рахунок перемішування відбувається вирівнювання температур по об'єму установки.

Біогазову установку [64] запропоновано А. А. Мучаком для отримання добрив і біогазу, а також зменшення забруднення навколишнього середовища. За допомогою перемішувального пристрою у вигляді поздовжніх і поперечних лопаток з відносно незначними затратами енергії ефективно перемішується субстрат з часткою твердих частинок в ньому більше 12 %, що дозволяє ліквідувати такі негативні явища як осад і плаваюча кірка. Циліндричний корпус реактора може обертатися навколо осі циліндра і поздовжніми лопатками шар за ша-

ром перемішати весь об'єм субстрату, який додатково перемішують поперечні лопатки.

Установка для перероблення твердих та рідких органічних відходів з одержанням біогазу і добрива [67] може використовуватись в сільському та комунальному господарствах. В ній завдяки встановленню завантажувально-вивантажувального гвинтового конвеєра з приводом реверсивного обертання і пристроєм для перемішування, що розміщений на кінці вала гвинтового конвеєра за межами контейнера, забезпечується комплексне виконання процесів завантажування-вивантажування та перемішування в контейнері. Це відповідно покращує при цьому умови масообміну та зброджування твердих відходів в контейнері та рідини взагалі в реакторі. Відповідно підвищується продуктивність за виходом біогазу та переробленню сировини твердих відходів, реалізується конструктивно-технологічна компактність, ефективність використання робочого об'єму реактора, герметичність реактора. Значно підвищуються механізація перенавантаження субстратів, зростає продуктивність із перероблення сировини твердих відходів, знижуються трудомісткість експлуатаційно-технологічних робіт та загальна металомісткість.

В біогазових установках [70–73] використовується шнековий перемішувач, що розташований горизонтально. Авторами Г. Є. Мовсесовим, О. О. Ляшенко, Т. В. Сюркаловою запропоновано установку для зброджування твердих та рідких органічних відходів з одержанням біогазу і добрива [70], що виконана із шнеком. Таким чином забезпечується безперервність технологічного процесу анаеробної переробки різнофазних органічних відходів та регламентні умови метанового зброджування, що відповідно підвищує ефективність метанового зброджування субстратів та загальну і питому продуктивності установки із виробництва біогазу, добрив та об'єму перероблення відходів.

Установку для виробництва біогазу [74] представлено В. О. Коваленко, В. О. Дубровіним, М. Я. Кривенком, В. М. Поляковським, Л. В. Шевченко. Як теплоізоляційний матеріал використовується акумулювальна речовина, а саме органічна маса, придатна до компостування. Завдяки використанню як джерела тепла і акумулювальної речовини органічної маси, придатної до компостування, яка періодично

завантажується і вивантажується, забезпечується стабільність роботи, підвищується експлуатаційна надійність установки для виробництва біогазу. Застосування такої установки дозволяє стабільно вести процес зброджування, на 25–30 % підвищує ефективність процесу отримання біогазу.

В біогазовій установці [77] вмонтовано електронагрівач, шарнірно з'єднаний з нижньою частиною труби з можливістю обертання навколо осі. Біогазова установка оснащена системою автоматичного регулювання температури теплоносія і субстрату з трьома терморегуляторами. Сенсор першого терморегулятора встановлений у першій ємності, а сенсори другого і третього терморегуляторів – по вертикалі на корпусі, з автоматичними і ручними виконавчими механізмами і схемами регулювання електронагрівача і приводу змішувача. Енергоефективність цієї установки досягається тим, що перший терморегулятор підтримує задану температуру теплоносія. Другий і третій терморегулятори включають датчики температури, які встановлені у нижній і верхній частині корпусу реактора для контролю температури субстрату на периферії (біля стінки корпусу), де вона знижується в першу чергу. Таким чином підвищується продуктивність біогазової установки виробництва біогазу, підтримується оптимальний температурний режим зброджування субстрату в реакторі в будь-яку пору року, а також зменшуються втрати теплоти із реактора через огороження завдяки використанню тришарової стінки з повітряним середнім шаром.

Незважаючи на наявність значних конструктивних особливостей біогазових реакторів є необхідність їх подальшого вдосконалення з метою пошуку напрямків оптимізації анаеробного процесу бродіння субстрату для підвищення їх продуктивності та зменшення енергозатрат на термостабілізацію процесу виробництва біогазу.

Перспективним напрямком підвищення енергоефективності біоконверсії є зменшення додаткових витрат теплової енергії з біореактора та інтенсифікація ферментації біомаси механічним перемішуванням субстрату залежно від кількісних та якісних параметрів впливу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України «Про енергозбереження» : за станом на 1 липня 1994 р. / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К. : Відомості Верховної Ради, 1994. – 283 с. Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=74%2F94-%E2%F0>.
2. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» : за станом на 20 лютого 2003 р. / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К. : Відомості Верховної Ради, 2003. – 155 с. Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=555-15>.
3. Калетнік Г. М. Розвиток ринку біопалив в Україні : автореф. дис. доктора екон. наук : 08.00.03 / Г. М. Калетнік. – К., 2009. – 34 с.
4. Біоенергія в Україні – розвиток сільських територій та можливості для окремих громад / [В. О. Дубровін, М. Д. Мельничук, Ю. Ф. Мельник та ін.]. – К., 2009. – 111 с.
5. Забарний Г. М. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г. М. Забарний, А. В. Шурчков. – Київ, 2002 – 211 с.
6. Кудря С. О. Потенціал і структура використання нетрадиційних поновлюваних джерел енергії / С. О. Кудря // «Енергетичні ресурси та потоки». – К., 2003. – 468 с.
7. Перегінець В. Сучасне виробництво біодизельного палива з рослинної біомаси / В. Перегінець– К., 2001. – 74 с.
8. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 132 с.
9. Бойлс Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки / Бойлс Д. ; пер. с англ. М. Ф. Пушкарева. – М. : Агропромиздат, 1987. – 152 с.
10. Баадер Б. Биогаз: Теория и практика / Б. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер; пер. М. И. Серебряного. – М. : Колос, 1982. –148 с.
11. Соуфер С. Биомасса как источник энергии / С. Соуфер, О. Заборски; пер. с англ. А. П. Чочиа. – М. : Мир, 1985. – 368 с.
12. Гелетуха Г. Г. Перспективы развития современных технологий анаэробного сбраживания биомассы в Украине (Обзор) / Г. Г. Гелету-

ха, С. Г. Кобзарь // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 5 – С. 3–9.

13. Ратушняк Г. С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела тепlopостачання : навч. посібник / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 170 с.

14. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 117 с.

15. Ratushnyak G.S. Intensification of Biogas Production By Means Of Mechanical Mixing of The Substrate / G. S. Ratushnyak, K. V. Anokhina // Tap Chi Khoa hoc & Cong nghe. – 2012. – № 8 (57). – С. 177–179.

16. Екобіотехнологія та біоенергетика : проблеми становлення і розвитку / В. Кухар, Є. Кузьмінський, О. Ігнатюк, Н. Голуб// Вісник НАН України. – 2005. – № 9. – С. 3–18. Режим доступу: <http://www.nbuv.gov.ua/Portal/all/herald/2005-09/art1-vis9-05.pdf>.

17. Веденеев А. Г. Биогазовые технологии в Кыргызской республике / А. Г. Веденеев, Т. А. Веденева. – Б. : Евро, 2006. – 90 с.

18. Noyola A. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/recourse recovery / A. Noyola, J. Morgan-Sagastume, J. Lopez-Hernandez // Environmental Science and Biotechnology. – 2006. – р. 93–114. – DOI 10.1007. Режим доступу: http://www.springerlink.com/content/632346413_v5366k3.

19. Альтернативне паливо – біогаз із відходів переробних підприємств агропромислового комплексу / М. І. Кошель, Д. А. Каранов, М. Б. Чабан [та ін.] // Енергетика та електрифікація. – 2006. – № 10. – С. 22-26.

20. Дубровін В. О. Забезпечення якості біопалива / В. О. Дубровін, М. Д. Мельничук, С. В. Драгнєв // Вісник ВПІ. – 2007. – № 4. – С. 98–102.

21. Гусаков С. О. Малая механизация в приусадебном и фермерском хозяйствах / С. О. Гусаков, С. М. Козирев. – К. : Техника, 1996. – 74 с.

22. Basri M. F. Improved biogas production from palm oil mill effluent by a scaled-down anaerobic treatment process / M. F. Basri, S. Ya-

cob, M. A. Hassan etc // World of Microbiol Biotechnol. – 2009. – DOI 10.1007. – s 11274-009-1-0197-x. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/content/cl08r15312207081>.

23. Колобродов В. Г. Анаэробная переработка отходов и проблемы утилизации биогаза / В. Г. Колобродов, М. А. Хажмурадов, Л. В. Карнацевич // Екологічний вісник. – 2004. – № 6. – С. 20–23.

24. Дудюк Д. Л. Нетрадиційна енергетика : навч. посіб. / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа, Я. М. Гнатишин – Львів : Магнолія 2006, 2008. – 188 с.

25. Сербін В. А. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії в системах ТГП / В. А. Сербін – Макіївка : ДонДАБА, 2003. – 153 с.

26. Удосконалення технологій спалювання біогазу отриманого при процесах біоконверсії / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, Ю. В. Куріс, А. В. Несторенко // Новини енергетики. – 2007. – № 2. – С. 36–42.

27. A new and sound technology for biogas from solid waste and biomass / G. Busch, J. Grobmann, M. Sieber, M. Burkhardt // Water Air Solid Pollut. – 2009. – p. 89–97. – DOI 10.1007. – s 11267-008-9195-5. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/content/453065053u895166>.

28. Ткаченко С. Й. Залежності для оцінки значень коефіцієнтів тепловіддачі в системах термостабілізації біогазового реактора / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, Н. В. Резидент // Вісник ВПІ. – 2004. – № 2. – С. 65–70.

29. Бушин М. А. Интенсификация процесса производства этилового спирта на основе целенаправленного использования протеолитического ферментного препарата : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.07 / М. А. Бушин. – Воронеж, 2006. – 23 с.

30. Таргоня В. С. Обґрунтування основних параметрів метанового зброджування безпідстилкового гною великої рогатої худоби : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 03.00.20 / В. С. Таргоня. – Біла Церква, 1999. – 19 с.

31. Rivard Ch. Aerobic and anaerobic digestion of processes municipal solid waste using a novel high solids reactor: maximum solids levels and mixing requirements / Ch. Rivard, M. Himmel, T. Vinzant // Biotech-

nology Letters. – 1990. – № 3 (12). – p. 235–240. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/cotent/b8q6l6457 q5u628l>.

32. Shin H. Conversion of food waste into hydrogen by thermophilic acidogenesis / H. Shin, J. Youn // *Biodegradation*. – 2005. – № 16. – p. 33–44. Режим доступу: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16646087>.

33. Шомин А. А. Биогаз на сельском подворье / А. А. Шомин. – Балаклея : Балаклійщина, 2002. – 68 с.

34. Hong Ch. ATP content and biomass activity in sequential anaerobic / aerobic reactors / Ch. Hong // *Zhejiang Univ SCI*. – 2004. – № 5 (6). – p. 727–732. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/content/531474668 2633138>.

35. High-rate thermophilic methane fermentation on short-chain fatty acids in a down-flow anaerobic packed-bed reactor / M. Tatara, A. Yamazawa, Y. Ueno, H. Fukui // *Bioprocess Biosyst Eng*. – 2005. – № 27. Режим доступу: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15565281>.

36. Капустин В. П. Обоснование способов и средств переработки безподстилочного навоза / Капустин В. П. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – 80 с.

37. Войтович І. Г. Анаеробне перероблення курячого посліду в біогаз / І. Г. Войтович // *Науковий вісник : збірник науково-технічних праць*. – Львів : УкрДЛТУ. – 2003. – Вип. 13.2. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/nvnltsu/13_2/116_Wojtowycz_13_2.pdf.

38. Джеджула В. В. Обґрунтування параметрів для виробництва біогазу при утилізації органічних відходів сільськогосподарських підприємств : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / В. В. Джеджула. – Вінниця, 2007. – 17 с.

39. Ткаченко С. Й. Ідентифікація закономірностей теплообміну за умов невизначеності вхідних даних / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // *Вісник ВПІ*. – 2006. – № 6. – С. 187–192.

40. Гармаш С. М. Біоконверсія рослинних відходів агропромислового комплексу та агроекологічна оцінка застосування біодобрив у північному степу України : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 03.00.16 / С. М. Гармаш. – Дніпропетровськ, 2007. – 25 с.

41. Rongping Li. Biogas production from anaerobic codigestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system / Rongping Li, Shulin Chen, Xiujiu Li // *Appl biochem Biotechnol.* – 2009. – DOI 10.1007. – s 12010-009-8533-z. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/content/h7517082u8064855>].
42. Боровська Т. М. Моделювання й оптимізація систем виробництва біогазу / Т. М. Боровська, П. В. Северілов // *Наукові праці ВНТУ.* – 2009. – № 2. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2009-2/2009-2.files/uk/09tmbgps_ua.pdf.
43. Оцінка енергетичної ефективності біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Є. П. Ларюшкін, Г. О. Нудель, В. С. Таргоня // *Вісник ВПІ.* – 1998. – № 2. – С. 48–55.
44. Нестеренко Е. В. Применение биогазовых технологий при утилизации органических отходов / Е. В. Нестеренко // *Науковий Вісник будівництва.* – 2009. – № 52. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Nvb/2009_52/nesterenko.pdf.
45. Демчак І. М. Розвиток біоенергетики в Україні / І. М. Демчак // *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України.* – 2009. – № 141. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/Portal/chem_biol/nvnau/2009_141/09dim.pdf.
46. Виробництво біогазу з органічних відходів в умовах окремого господарства / В. О. Дубровін, В. Г. Мироненко [та ін.] // *Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України.* – 2009. – № 134. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/nvnau/2009_134_2/09dvo.pdf.
47. Землянка О. О. Вибір раціональних режимів роботи реактора біогазової установки / О. О. Землянка, М. В. Губінський // *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.* – 2009. – № 1. – С. 112–120.
48. Мовсесов Г. Є. Установка для дослідження метанового зброджування органічних відходів сільського господарства / Г. Є. Мовсесов, Т. В. Сюркалова // *Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві : збірник наукових праць ІМТ УААН.* – 2009. – № 1 (3, 4). – С. 151–155. Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/mekb/2009_1/21\(3,4\).pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/mekb/2009_1/21(3,4).pdf).

49. Рожко А. Розвиток відновлювальної енергетики у ФРН як запорука сталого економічного розвитку / А. Рожко // Українська наука: минуле, сучасне, майбутнє. – 2007. – № 12 – С. 261–268. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/soc_gum/Un_msm/2007_12/Rozko.pdf.

50. Энергосберегающие технологии в проектах свиноводческих предприятий / И. А. Шевченко, В. В. Шацких, В. В. Тверденко [та ін.] // Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві. – 2008. – № 2. – С. 3–8. Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/mekb/2008_2/1\(2\).pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/mekb/2008_2/1(2).pdf).

51. Weiland P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany / P. Weiland // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2003. – № 109 – р. 263–274. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/content/p01720g04122n251>.

52. Рожко А. Економічні аспекти використання відновлювальних джерел енергії в умовах Євроінтеграції / А. Рожко. Режим доступу: http://www.library.tane.edu.ua/images/nauk_vydannya/SWFoCT.pdf.

53. Топілін Г. Е. Принцип одержання біогазу і добрив з органічних відходів з агровиробництва / Г. Е. Топілін, С. М. Умінський, С. В. Інютін // Аграрний вісник Причорномор'я. – 2009. – № 49. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/avpch/Tn/2009_48/Topilin_Uminsky_Injutin.pdf.

54. Imomov Sh. Engineering design calculation of a biogas unit recuperator / Sh. Imomov // Gelioteknika. – 2007. – № 3. – р. 196–197. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/content/e0x701q228548w35>.

55. Турук Ю. Г. Переваги та недоліки переробки гною в біогаз / Ю. Г. Турук // Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2009. – № 141. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/Portal/chem_biol/nvnau/2009_141/09tyg.pdf.

56. Челядин Л. І. Техногенна сировина, її утилізація та вплив на екологічну безпеку об'єктів / Л. І. Челядин, Л. І. Григорчук, В. Л. Челядин // Науковий вісник НЛТ України. – 1999. – № 1. – С. 203–205. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/nvnltu/9_9/76_Czeliadyn_19_9.pdf.

57. Cui R. Enhanced methane production from anaerobic digestion of disintegrated and deproteinized excess sludge / R. Cui, D. Jahng// *Biotechnology letters*. – 2006. – DOI 10.1007 – pp. 531-538. – s 10529-006-10012-g. Режим доступу: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16614889>.

58. Землянка О. О. Дослідження впливу флотаційних процесів на продуктивність біогазової установки / О. О. Землянка, М. В. Губінський// *Вісник ВПІ*. – 2010. – № 3. – С. 75–80.

59. Weiland P. Biogas production current state and perspectives / P. Weiland // *Appl Microbiol*. – 2009. – DOI 10.1007 – s 00253-009-2246-7. Режим доступу: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19777226>.

60. Diversity of the resident microbiota in a thermophilic municipal biogas plant [Електронний ресурс] / A. Weiss, V. Jerome, R. Freitag, H. Mayer // *Appl. Microbiol Biotechnol*. – 2008. – pp. 163-173. – DOI 10.1007. – s 00253-008-1717-6. Режим доступу: <http://www.springerlink.com/content/67001868u32041m7>.

61. Пат. 7184 Україна, МПК. С 02F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u 20041008416 ; заявл. 18.10.2004 ; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.

62. Пат. 48731 Україна, МПК. С 02F 11/04. Установка для виробництва біогазу та органічних добрив при зброджуванні багатокомпонентного субстрату / М. Д. Мельничук, Ф. А. Бауер, В. О. Дубровін, О. В. Дубровіна, Державний департамент інтелектуальної власності. – № u 200911813 ; заявл. 19.11.2009 ; опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6.

63. Пат. 15905 Україна, МПК. С 02F 11/04. Установка для отримання біогазу / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, Н. В. Пішеніна, М. С.Гуменюк; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u 200601131; заявл. 06.02.2006 ; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.

64. Пат. 18101 Україна, МПК. С 02F 11/04. Біогазова установка/ А. А. Мучак; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u 200605752; заявл. 26.05.2006 ; опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10.

65. Пат. 86387 Україна, МПК. С 02F 11/04, F 16F 9/02. Перемішувач-активатор біогазової установки / А. Л. Пархоменко, О. В. Гвоз-

девич, О. В. Муха, Б. С. Шабель ; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200604887 ; заявл. 03.05.2006 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

66. Пат. 18182 Україна, МПК. С 12М 1/107, С 02F 11/04. Реактор біогазової установки / О. Л. Климов, Г. Ф. Нескородов, І. Г. Голікова; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 94042736; заявл. 25.04.1994 ; опубл. 01.07.1997, Бюл. № 0.

67. Пат. 30652 Україна, МПК. С 02F 11/04, С 02F 3/28. Установа для переробки твердих та рідких органічних відходів з одержанням біогазу і добрива / Г. Є. Мовсесов, О. О. Ляшенко, В. К. Полішко; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200710604; заявл. 24.09.2007 ; опубл. 11.03.2008.

68. Пат. 27445 Україна, МПК. С 02F 11/04. Установа для одержання біогазу і біодобрива з органічних відходів / І. О. Аксюттов, Я. В. Бабкін; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200708488 ; заявл. 24.07.2007 ; опубл. 25.10.2007.

69. Пат. 63530 Україна, МПК. С 02F 3/28, С 02F 11/04. Біогазова установка / В. О. Гужва, В. О. Підгайний, Л. Ю. Алексеева, Є. Г. Масур; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 2003043891; заявл. 25.04.2003 ; опубл. 15.01.2004, Бюл. № 1.

70. Пат. 48079 Україна, МПК. С 02F 11/04, С 02F 3/28. Установа для зброджування твердих та рідких органічних відходів з одержанням біогазу та добрива / Г. Є. Мовсесов, О. О. Ляшенко, Т. В. Сюркалова; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200908171 ; заявл. 03.08.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.

71. Пат. 51083 Україна, МПК. С 12Р 5/00. Установа для отримання біогазу / В. В. Горупа, Л. І. Павлюх, Л. А. Зозуля; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 201002170 ; заявл. 26.02.2010 ; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.

72. Пат. 50357 Україна, МПК. С 02F 11/04, С 02F 3/28. Установа для одержання біогазу / В. І. Юрченко, І. В. Юрченко, А. В. Юрченко; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 2001129093 ; заявл. 27.12.2001 ; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.

73. Пат. 19666 Україна, МПК. С 02F 11/04. Біогазова установка для сільської садиби / М. Я. Федусь; Державний департамент інтелек-

туальної власності. – № у 200608252 ; заявл. 24.07.2006 ; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.

74. Пат. 6810 Україна, МПК. С 02F 11/04. Установа для виробництва біогазу / В. О. Коваленко, В. О. Дубровін, М. Я. Кривенко, В. М. Поляковський, Л. В. Шевченко; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 20041109727 ; заявл. 26.11.2004 ; опубл. 16.05.2005, Бюл. № 5.

75. Пат. 20193 Україна, МПК. С 02F 11/04. Біогазова установка / П. М. Горлей, В. І. Микитюк, В. В. Шлемкевич; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200607716 ; заявл. 10.07.2006 ; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

76. Пат. 46807 Україна, МПК. С 02F 11/04. Установка для отримання біогазу / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, Н. Д. Степанова, Н. В. Пішеніна; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200906401 ; заявл. 19.06.2009 ; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1.

77. Пат. 44141 Україна, МПК. С 02F 3/00. Біогазова установка / А. М. Божок, Ю. А. Бобильов, Г. М. Параєвський, В. Ф. Понеділок, Г. Ф. Синюк, В. Ф. Рибалкін, М. І. Свіргоцький, В. В. Жуковський; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 2001053422 ; заявл. 22.05.2001 ; опубл. 15.01.2002, Бюл. № 1.

78. Пат. 51129 Україна, МПК. С 02F 11/04, F 24J 2/32. Спосіб термостатування біореактора при виробництві біогазу і добрива / В. В. Притула, Є. Х. Русов, І. Д. Глазирін, М. І. Гоголь, Ф. П. Ржепішевський; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200909931 ; заявл. 29.09.2009 ; опубл. 12.07.2010, Бюл. № 13.

79. Пат. 29887 Україна, МПК. С 12M 1/107, С 12M 1/18. Двостадійна установка для добування біогазу / І. Г. Войтович, М. У. Сокальський; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 9710492 ; заявл. 06.10.1997 ; опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6.

80. Пат. 37959 Україна, МПК. С 02F 11/04, С 05F 3/03, С 05F 9/02. Біогазова установка / О. В. Гвоздевич, Д. М. Грінченко, Д. В. Брик, О. В. Муха, О. З. Бутін, І. М. Лоїк; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 2000052646 ; заявл. 11.05.2000 ; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4.

81. Пат. 41855 Україна, МПК. С 02F 11/00, С 02F 11/04. Установа для отримання біогазу / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, Н. В. Пішеніна; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200900482 ; заявл. 23.01.2009 ; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.

82. Пат. 51209 Україна, МПК. С 02F 11/04, С 02F 3/28. Біогазова установка / Г. Є. Мовсесов; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 2002010796 ; заявл. 31.01.2002 ; опубл. 15.11.2002.

Бюл. № 11.

83. Пат. 19219 Україна, МПК. F 26B 9/00. Установка для використання та утилізації енергії біогазу / О. Ю. Співак, Н. В. Резидент, Н. В. Колесник; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200605262 ; заявл. 15.05.2006 ; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.

84. Пат. 15681 Україна, МПК. С 02F 11/04, С 02F 3/28. Установка для переробки сільськогосподарських відходів з одержанням біогазу і добрива / Г. Є. Мовсесов, О. О. Ляшенко; Державний департамент інтелектуальної власності. – № у 200600051 ; заявл. 03.01.2006 ; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.

85. Ратушняк Г. С. Шляхи вдосконалення енергоощадних технологій при утилізації органічних відходів в системах біоконверсії / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – 2009. – № 659. – С. 151–153.

86. Ратушняк Г. С. Моделювання тепломасообмінних процесів в біогазових установках / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2008. – № 12. – С. 53–58.

87. Апарати для переробки олії в біодизель / М. Ф. Друкований, В. М. Бандура, В. І. Паламарчук, О. М. Друкований // Збірник наукових праць ВДАУ. – 2009. – № 2. – С. 88–91.

88. Гарькавий А. Д. Використання сонячних теплогенераторів для сушіння сільськогосподарської продукції / А. Д. Гарькавий, П. Г. Завальнюк // Вісник ВПІ. – 2010. – № 3. – С. 38–41. Режим доступу: <http://visnyk.vstu.vinnica.ua/2010/3/pdf/10gadoap.pdf>.

89. Теплообмінні процеси та обладнання переробних та харчових виробництв / І. П. Паламарчук, В. С. Берник [та ін.] – Львів : Бескид Біт, 2006. – 368 с.

90. Цуркан О. В. Комбінований вібраційний змішувач / О. В. Цуркан, І. М. Кесарчук // Вібрації в техніці і технологіях. – 2009. – № 1 (53). – С. 114–115.

91. Ковальчук О. В. Дослідження розкладу органічних відходів з одержанням біогазу та добрив / О. В. Ковальчук, Г. М. Зінченко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2009. – № 2. – С. 155–159.

92. Малкін Е. С. Фізичне моделювання процесів тепломасообміну в енергетичному роздільнику / Е. С. Малкін, О. О. Савченко, І. С. Белінський // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2010. – № 662. – С. 304–308.

93. Малкін Е. С. Експериментальні дослідження теплообміну горизонтального циліндричного нагрівача в опалювальному конвекторі з термогравітаційною конвекцією / Е. С. Малкін, О. О. Вишегородська, О. М. Скляренко, Я. В. Вишгородська // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2008. – № 12. – С. 46–52.

94. Росковшенко Ю. К. Теплогазопостачання і вентиляція / Ю. К. Росковшенко, М. В. Степанов. – К. : ІВНВКП Укреліотех, 2008. – 256 с.

95. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / В. А. Федорец, М. Н. Педченко, А. Ф. Пичко [и др.] ; под ред. В. А. Федорца. – К. : Вища школа, Головное изд-во, 1987. – 375 с.

96. Ратушняк Г. С. Тепловтрати в біогазових установках при різних температурних режимах анаеробного бродіння / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вісник ВПІ. – 2009. – № 5. – С. 20–24.

97. Ратушняк Г. С. Аналіз методів математичного моделювання для визначення тепловологої передачі через багат шарові захисні конструкції / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2007. – № 4. – С. 137–141.

98. Пат. 17230 Україна, МПК Е 04 В 2/02, Е 04 В 2/14. Теплоізоляційна панель / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, О. Г. Чухряєва; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200603243 ; заявл. 27.03.2006 ; опубл. 15.09.2006, Бюл. № 9.

99. Теплотехника / [Архаров А. М., Исаев С. И., Кожин И. А. и др.] ; под общ. ред. В. И. Крутова. – М. : Машиностроение, 1986. – 432 с.

100. Пат. 26811 Україна, МПК Е 04 В 2/02, Е 04 В 2/14. Теплогідро-ізоляційна покрівля / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, О. Г. Ратушняк; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200704953 ; заявл. 03.05.2007 ; опубл. 10.10.2007.

101. Ратушняк Г. С. Моделювання теплового режиму на початковій фазі бродіння в біогазовій установці з пропелерною мішалкою / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вісник ХНУ. – 2010. – № 4. – С. 19–22.

102. Хабибуллин С. С. Биоэнергетическая конверсия органических отходов / С. С. Хабибуллин // Социально-экономические и технические системы. – 2008. – № 4.

103. Пат. 49746 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200911674 ; заявл. 16.11.2009 ; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.

104. Пат. 43263 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200902331; заявл. 16.03.2009; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

105. Пат. 43253 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200902265 ; заявл. 16.03.2009 ; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

106. Пат. 34016 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазовий реактор / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, В. В. Джеджула; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200801976 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14.

107. Пат. 31173 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазовий реактор / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, В. В. Джеджула; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200714164 ; заявл. 17.12.2007 ; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6.

108. Пат. 36453 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200806844 ; заявл. 19.05.2008 ; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20.

109. Ратушняк Г. С. Багатошарові захисні конструкції від тепловтрат з герметичним повітряним прошарком / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 1. – С. 38–42.

110. Ротштейн О. П. Soft Computing в біотехнології: багатофакторний аналіз і діагностика : монографія / О. П. Ротштейн, Є. П. Ларюшкін, Ю. І. Мітюшкін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 144 с.

111. Саати Т. Л. Взаимодействие в иерархических системах / Т. Л. Саати // Техническая кибернетика. – 1979. – № 1. – С. 68-84.

112. Rotshtein A. P. Modification of Saaty Method for the Construction of Fuzzy Set Membership Functions : proc. of the International Conference "Fuzzy Logic and its Applications". – Zichron, Israel, 1997. – P. 125–130.

113. Борисов А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с.

114. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / Орловский С. А. – М. : Радио и связь, 1981. – 286 с.

115. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под. ред. Д. А. Поспелова. – М. : Наука, 1986. – 312 с.

116. Ротштейн О. П. Багатофакторний аналіз технологічного процесу біоконверсії на основі лінгвістичної інформації / О. П. Ротштейн, Є. П. Ларюшкін, Д. І. Кательніков // Вісник ВПІ . – 1997. – № 3. – С. 38-45.

117. Ларюшкін Є. П. Експертна система для інтелектуальної підтримки енергозберігаючого управління технологічним процесом біоконверсії / Є. П. Ларюшкін та ін. // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2008. – № 1. – С. 144–150.

118. Варіантний аналіз на базі нечітких парних порівнянь: методика та застосування на прикладі порівняння семіотичних систем / О. П. Ротштейн, А. М. Петух, М. І. Петренко, В. В. Войтко // Вимірювальна обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 2. – С. 17–24.

119. Ротштейн А. П. Нечетко-алгоритмический анализ надежности технологических систем / А. П. Ротштейн, Е. П. Ларюшкин, Д. И. Кательников // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 1. – С. 129–139.

120. Анохіна К. В. Моделювання технологічного процесу біоконверсії з використанням нейро-нечіткої мережі / К. В. Анохіна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2011. – № 2 – С. 67–71.

121. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.

122. Rotshtein A. Design and Tuning of Fuzzy Rule - Based Systems for Medical Diagnosis. In “Fuzzy and Neuro - Fuzzy Systems in Medicine” (Eds.: H. Teodorescu and A. Kandel). — CRC Press, 1998. — P. 243–289.

123. Zimmerman H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. 3rd ed. – Kluwer Academic Publishers, 1996. – 435 p.

124. Pratar R. Getting started with Matlab 5. A quick introduction for scientists and engineers. Oxford university press, 1999. – 230 p.

125. Козик О. М. Аналіз можливостей нечіткої логіки для формального опису технологічного процесу / О. М. Козик // Моделювання та інформаційні технології. – 2010. – № 152. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Mtit/2010_52/15.p

126. Кравець О. П. Системи прийняття рішень з нечіткою логікою / О. П. Кравець, Р. А. Киркало / Теплоенергетика. Інженерія довокілля. Автоматизація. – 2009. – № 650. – С. 115–123. Режим доступу: <http://vlp.com.ua/node/3965>.

127. Корченко О. Г. Нечітке моделювання лінгвістичної змінної «інформація» за змістом відомостей та видом операцій, що використовуються над нею / О. Г. Корченко, Ю. О. Дрейс // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформа-

тивних систем. – 2009. – № 2. – С. 102–108. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Psvz/2009_2/PDF/Dreys.pdf.

128. Моргун А. С. Ідентифікація несучої здатності паль методою нечіткої логіки й методом граничних елементів / А. С. Моргун, Д. І. Кательніков, І. А. Моргун // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 2. – С. 1-7. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-2/2008-2.files/uk/08masmbe_uk.pdf.

129. Кравець О. П. Прийняття оптимальних рішень методом навчання з нечіткою логікою / О. П. Кравець, О. М. Проданюк // Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – 2009. – № 653. – С. 129–147. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Vnulp/ISM/2009_653/13.pdf.

130. Ратушняк Г. С. Моделювання з використанням лінгвістичних змінних процесу біоконверсії перемішуванням субстрату / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вібрації в техніці та технологіях – 2010. – № 4 (60). – С. 130–137.

131. Борисов А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей : Примеры использования / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с.

132. Ратушняк Г. С. Експертна система на базі нечіткої логіки прогнозування продуктивності біогазової установки з механічним перемішувальним пристроєм / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2010. – № 3 (19). – С. 20–25.

133. Загвойська Л. Д. Застосування технологій штучного інтелекту для вирішення еколого-економічних проблем / Л. Д. Загвойська, О. І. Пастернак // Науковий вісник НЛТУ України. – 2005. – № 15.7. – С. 13–20. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/nvnltu/15_7/13_Zagwojska_15_7.pdf.

134. Кондратенко Ю. П. Системи підтримки прийняття рішень на основі нечіткого логічного виводу / Ю. П. Кондратенко, С. А. Сидоренко, Г. В. Кондратенко, І. Я. М. Аль Зубі // Наукові праці ЧДУ. – 2004. – № 22. – С. 71–80. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/Soc_Gum/Npchdu/Computer_technology/2004_22/22-9.pdf.

135. Квасніков В. П. Особливості реалізації системи управління на нечіткій логіці / В. П. Квасніков, М. А. Тимофієва // Вісник двигунобудування. – 2009. – № 3. – С. 172–175. Режим доступу: http://www.nbuuv.gov.ua/portal/Natural/vds/2009_3/32.pdf.
136. Ратушняк Г. С. Дослідження параметрів процесу перемішування органічної маси в біогазовій установці з вертикальним пропелерним перемішувачем / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, В. В. Джеджула // Збірник наукових праць ВНАУ. – 2010 – № 5. – С. 139–144.
137. Биркгоф Г. Гидродинамика / Г. Биркгоф ; пер. с англ. И. В. Погребисского. – М. : Изд. Иностранной Лит-ры, 1963. – 244 с.
138. Гончаров Ф. І. Вплив гідравлічної крупності завислих частинок на Coli-index води / Ф. І. Гончаров, В. М. Штепа // Наукові доповіді НУБіП. – 2009. – № 2 (14). Режим доступу: <http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/nd/2009-2/09gf1wci1.p>
139. Пилов П. И. Гравитационная сепарация полезных ископаемых : учебн. пособие / П. И. Пилов. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2003. – 123 с. Режим доступу: <http://pererabotaem.org/wiki/index.php>.
140. Ратушняк Г. С. Седиментаційний аналіз перемішування полідисперсного субстрату в біогазовій установці вертикальною пропелерною мішалкою / Г. С. Ратушняк, І. В. Коц, К. В. Анохіна // Збірник наукових праць ВНАУ. – 2011. – № 8. – С. 37–42.
141. Ратушняк Г. С. Моделювання нестационарних режимів теплообміну в біогазових реакторах / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна // Вісник ХНУ. – 2010. – № 2 – С. 142–145.
142. Исаченко В. П. Теплопередача : Учебник для вузов. / В. П. Исаченко – Изд. 3е перераб. и доп. – М. : Энергия, – 1975. – 488 с.
143. Веденяпин В. Г. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / В. Г. Веденяпин – М. : Колос, 1973. – 199 с.
144. Ратушняк Г. С. Експериментальна біогазова установка з вертикальним лопатевим перемішувачем та методика дослідження її енергоефективності / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2011. – № 1. – С. 91–96.

145. Машины и аппараты пищевых производств. Кн. 1: Учеб. для вузов / [С. Т. Антипов, И. Т. Кретон, А. Н. Остриков и др.] ; под ред. В. А. Панфилова. – М. : Высшая школа, 2001.
146. Жерновая И. М. Процессы перемешивания в жидких средах / И. М. Жерновая, В. В. Копиров // Процессы и аппараты хим. технологии (Итоги науки и техники). – М. : ВИНТИ, 1975. – Т. 3. – С. 5–99.
147. Михеев М. А. Теплопередача. / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
148. Ратушняк Г. С. Управління технологічним процесом біоконверсії при перемішуванні субстрату / Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк, К. В. Анохіна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2010. – № 2 – С. 117–122.
149. Пат. 54116 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u201005458 ; заявл. 05.05.2010 ; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
150. Пат. 52714 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, В. В. Джеджула; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u201001300 ; заявл. 08.02.2010 ; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17.
151. Ратушняк Г. С. Еколого-економічна оцінка інноваційних енергозберігаючих проектів біоконверсії / Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк, К. В. Анохіна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2009. – № 2 – С. 152–154.
152. Ратушняк Г. С. Інноваційні методики підготовки фахівців з управління енергозберігаючими проектами в біоконверсії / Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк, К. В. Анохіна // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. – 2010. – № 24 – С. 460–464.
153. Друкований М. Ф. Вибір технологічного комплексу переробки біомаси в біогаз та органічних біологічних добрив / М. Ф. Друкований, О. С. Яремчик, В. В. Бранський // Збірник наукових праць ВНАУ. – 2011. – № 8. – С. 48–53.

154. Якушко С. І. Установка комплексної переробки органічних відходів за енергозберігаючою технологією / С. І. Якушко, С. М. Яхненко // Вісник СумДУ. – 2006. – № 12 (96). – С. 81–84.

155. Зуєв О. О. Економічні аспекти впровадження сучасних біогазових установок [Електронний ресурс] / О. О. Зуєв // Праці ТДАТУ. – 2009. – Вип. 9. Т. 5. – С. 88–92. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/Chem_Biol/Ptdau/2009_9_5/5/13.pdf.

156. Офіційний сайт об'єднання Альтернативна енергія. Режим доступу : <http://biogas.in.ua/>.

157. Степанов И. С. Экономика строительства : учебник для вузов / И. С. Степанов – М. : Юрайт, 2000. – 416 с.

158. Ратушняк Г. С. Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи на тему «Обґрунтування технологічних параметрів біогазових установок» з дисципліни «Енергозбереження та експлуатація систем теплогазопостачання і вентиляції» для студентів підготовки «Будівництво» / Г. С. Ратушняк, К.В. Анохіна. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 24 с.

159. Пат. 63825 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, К. В. Анохіна, І. А. Кощєєв; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u201102656 ; заявл. 09.03.2011 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.

160. Пат. 63826 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, К. В. Анохіна, І. А. Кощєєв; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u201102659 ; заявл. 09.03.2011 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. №20.

Наукове видання

**Ратушняк Георгій Сергійович
Анохіна Катерина Володимирівна**

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
ТА ОБЛАДНАННЯ БІОКОНВЕРСІЇ**

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет підготовлено К. Анохіною

Підписано до друку
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний. Ум. др. арк.
Наклад 100 прим. Зам №

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.