

УДК 628.35; 621.433; 66.074

КУЧЕРУК П.П.,
МАТВЄЄВ Ю.Б., КУЖЕЛЬ Л.М.

Інститут технічної теплофізики НАН України

КОГЕНЕРАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ БІОГАЗУ СТАНЦІЙ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ВІДХОДІВ

Розглянуто можливість використання біогазу для виробництва електричної та теплової енергії. Представлено результати енергетичної та економічної ефективності впровадження станції енергозабезпечення на біогазі.

Рассмотрена возможность использования биогаза для производства электрической и тепловой энергии. Представлены результаты энергетической и экономической эффективности внедрения станции энергоснабжения на биогазе.

The opportunity of biogas utilization for both electricity and heat production is considered. Both energy and economic feasibilities of biogas utilization at energy-supplying stations are presented.

C_s – питома теплоємність органічного субстрату, кВт·год/(кг·К);

F_{mt} – площа поверхні тепловіддачі біореактора, м²;

q_{bg} – питомий вихід біогазу на кг беззолної сухої речовини субстрату, що розпалась, м³/кг oTS ;

q_s – розрахунковий об'єм органічного субстрату, кг/год;

LHV_{bg} – нижча теплотворна здатність біогазу, МДж/м³;

k_1 – коефіцієнт теплопередачі через ізольовану стінку біореактора, кВт/м²·К;

k_2 – коефіцієнт, що показує частку використання виробленої е/е на власні потреби, %;

oTS – розрахункова доза внесення органічного субстрату, виражена в кг беззолної сухої речовини субстрату за добу;

t_s – розрахункова температура органічного субстрату на вході в біореактор, °С,

t_{in} – розрахункова температура середовища всередині біореактора, °С;

t_{ex} – розрахункова температура зовнішнього повітря в регіоні розташування біогазової установки, °С;

η_e – електричний ККД, %;

η_{th} – тепловий ККД, %.

Вступ

Декларуючи свої наміри про рух до європейської спільноти, Україна тим самим стає на шлях докорінних змін практично у всіх сферах народного господарства. Зокрема, це стосується питань екології виробництва, енергозбереження та використання альтернативних джерел енергії.

Такий сектор економіки, як сільське господарство, є одночасно і продуцентом забруднень навколишнього середовища і потенційним донором альтернативної енергії з біомаси. Найбільше екологічне навантаження створює тваринництво, з відходів якого в атмосферу потрапляють шкідливі гази (метан, аміак, сірководень та інші).

Цим створюється небезпека забруднення підземних водних горизонтів та ґрунтів. Постачальниками ж альтернативної, відновлюваної енергії можуть стати практично всі галузі сільського господарства. При цьому з відходів та продукції сільського господарства можна отримувати як теплову, так і електричну енергію, рідкі, тверді та газоподібні палива. Про це більш ніж переконливо свідчить досвід європейських країн, таких як Німеччина, Швеція, Данія та інших. Німеччина по праву вважається лідером виробництва електричної енергії з біогазу станцій анаеробного зброджування, Швеція – лідером виробництва біометану для заправки двигунів внутрішнього згорання та подачі його в мережу природного газу.

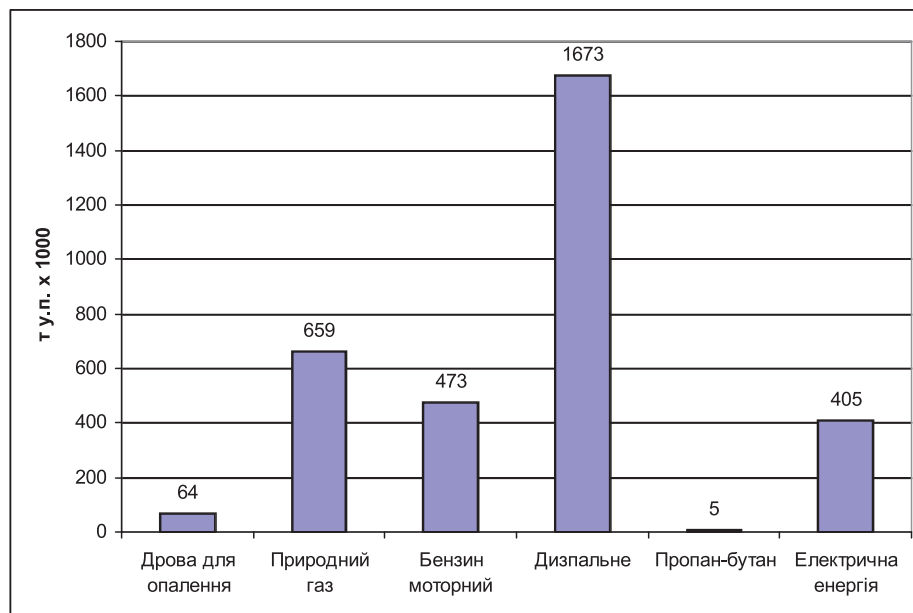


Рис. 1. Споживання основних видів палива та електричної енергії в сільському господарстві, мисливстві та рибальстві України за 2006 р.

Саме біогазові технології займають одне з провідних місць у сільському господарстві, як напрямок, що одночасно вирішує проблеми екології, енергозбереження та відновлення родючості ґрунтів. При використанні біогазових технологій можливо знешкодити практично будь-які органічні відходи. Технологія відтворює природні процеси трансформації органічної речовини у безкисневому середовищі консорціумом адаптованих мікроорганізмів. Основними продуктами біогазової технології є власне біогаз з теплотворною здатністю 20...23 МДж/м³ та стабілізована суспензія, придатна до використання в якості органічного добрива.

Перспективною є біогазова технологія і в сільському господарстві України. З точки зору заміщення паливно-енергетичних ресурсів, біогаз можна утилізувати при виробництві теплової та електричної енергії, очищувати його до якості моторного палива чи природного газу. При цьому найбільш імовірною та доцільною на даний час може бути енергетична утилізація утворюваного біогазу в когенераційних установках з виробництвом електричної та теплової енергії.

Як свідчать статистичні дані, в 2006 році в сільському господарстві, мисливстві та рибальстві всього спожито енергетичних матеріалів та продуктів перероблення нафти в розмірі 3,1 млн т у.п.,

а також 3,3 млрд кВт-год електричної енергії. На рис. 1 наведено споживання основних видів палива та електроенергії в тис. т у.п. [1].

Аналіз рис. 1 фактично визначає пріоритетні напрями розвитку сегментів ринку альтернативних видів енергії для заміщення використовуваних. Як видно, до таких слід віднести насамперед рідкі палива, природний газ та електричну енергію.

Стосовно технологій, що дозволяють безпосередньо замішувати зазначені види енергоресурсу, то найбільш поширеною і відпрацьованою слід вважати саме технологію виробництва електричної енергії шляхом спалювання біогазу в газопоршневих двигунах (ГПД). Очищення біогазу до якості природного газу чи моторного палива є також відпрацьованими технологіями, проте більш складними та дорогими у виконанні.

У даній статті хотілося б зосередитись на енергетичній утилізації біогазу в когенераційних технологіях. З прийняттям Закону України [2], яким фактично запроваджується так званий зелений тариф на електроенергію з альтернативних джерел енергії, підприємства та інвестори, які хочуть впроваджувати біогазові технології, отримали значний фінансовий стимул у вигляді підвищеної ціни за кВт-год згенерованої електричної енергії. Слід відзначити, що така ціна дорівнює под-

Табл. 1. Склад та властивості газів з різних джерел

Параметр	Одиниця виміру	Біогаз з полігонів ТПВ	Біогаз з гною	Природний газ з Північного моря	Природний газ з Голандії
Нижча теплотворна здатність	МДж/нм ³	16	23	40	31,6
	кВт·год/нм ³	4,4	6,5	11	8,8
	МДж/кг	12,3	20,2	47	38
Об'ємна маса	кг/нм ³	1,3	1,2	0,84	0,8
Число Уобба	МДж/нм ³	18	27	55	43,7
Метанове число		> 130	> 135	70	—
Метан	об. %	45	63	87	81
Метан, варіація	об. %	35...65	53...70	—	—
Вищі гідрокарбонати	об. %	0	0	12	3,5
Водень	об. %	0...3	0	0	—
Оксид вуглецю	об. %	0	0	0	0
Діоксид вуглецю	об. %	40	47	1,2	1
Діоксид вуглецю, варіація	об. %	15...50	30...47	—	—
Азот	об. %	15	0,2	0,3	14
Азот, варіація	об. %	5...40	—	—	—
Кисень	об. %	1	0	0	0
Кисень, варіація	об. %	0...5	—	—	—
Сірководень	ppm	< 100	< 1000	1,5	—
Сірководень, варіація	ppm	0...100	0...10000	12	—
Аміак	ppm	5	< 100	0	—
Загальний хлор (в перерахунку на Cl ⁻)	мг/нм ³	20...200	0...5	0	—

воєному середньозваженому тарифу на електричну енергію і діє для кожного суб'єкта господарювання протягом 10 років з початку реалізації проекту.

Оцінений авторами потенціал виробництва електричної енергії з біогазу станцій анаеробного зброджування гнойових відходів тваринницьких комплексів та птахофабрик України складає 2,8 млрд кВт·год за рік (344 тис. т у.п./рік) при встановленій потужності енергогенеруючого обладнання 350 МВт_{ел} + 550 МВт_{тепл}. Це становить фактично 85 % усіх потреб сільського господарства.

Очистка біогазу

Які ж проблеми можуть виникнути при енергетичній утилізації біогазу в газопоршневих двигунах? Як відомо, біогаз є продуктом життєдіяльності сукупності мікроорганізмів, що трансформують складні органічні сполуки до простих речовин. Власне організація процесу трансформації органічної речовини, його хід бу-

дуть визначати склад та властивості продукovanого біогазу і обумовлювати можливості та обмеження його використання в ГПД. Основними компонентами біогазу є метан, двоокис вуглецю та насичені водяні пари. В табл. 2 наведено порівняльну характеристику деяких горючих газів з різних джерел, у т.ч. біогазу [3].

Слід зауважити, що в біогазі може також міститись незначна кількість сполук кремнію, так званих силосанів, проте зустрічаються вони переважно в біогазі з полігонів ТПВ.

Багато виробників ГПД, враховуючи тенденції сучасного ринку енергоносіїв, вже адаптували двигуни для використання в них біогазу. При цьому лімітується ряд показників біогазу, що буде спалюватись в двигунах. В табл. 2 наведено вимоги до складу біогазу трьох основних європейських виробників ГПД.

Порівняльний аналіз табл. 1 та табл. 2 показує, що в більшості випадків виникає необхідність очищення біогазу станцій анаеробного зброджування від сполук сірководню та водяних парів, рідше – від сполук аміаку.

Табл. 2. Вимоги виробників ГПД стосовно складу біогазу

Виробник Параметр	GE Jenbacher	MAN B&W	Caterpillar	Deutz
Лінійка потужностей	0,25...3 МВт	0,03...0,3 МВт	0,28...6 МВт	0,3...4 МВт
Нижча теплота горіння	> 12,5 МДж/нм ³	> 5 кВт год/нм ³	15,7... 23,6 МДж/нм ³	4 кВт год /нм ³
Вміст сірки	< 1150 мг/нм ³ CH ₄ (без каталізатора) < 2000 мг/нм ³ CH ₄ (з каталізатором)	< 2000 мг/нм ³ CH ₄	< 2140 мг/нм ³ CH ₄	< 2200 мг/нм ³ CH ₄
Сірководень	—	< 200 ppm	—	< 0,15 об.%
Вміст хлору	—	< 100 мг/нм ³ CH ₄	—	< 100 мг/нм ³ CH ₄
Вміст фтору	—	< 50 мг/нм ³ CH ₄	—	< 50 мг/нм ³ CH ₄
Сума хлор + фтор	< 100 мг/нм ³ CH ₄ (без каталізатора) 0 мг/нм ³ CH ₄ (з каталізатором)	< 100 мг/нм ³ CH ₄	< 713 мгCl/нм ³ CH ₄	< 100 мг/нм ³ CH ₄
Вміст аміаку	< 55 мг/нм ³ CH ₄	< 50 ppm	< 105 мг NH ₃ /нм ³	< 30 мг/нм ³ CH ₄
Вміст кремнію	< 20 мг/нм ³ CH ₄ (без каталізатора) 0 мг/нм ³ CH ₄ (з каталізатором)	< 5 мг/нм ³ CH ₄	< 21 мг/нм ³ CH ₄	< 10 мг/нм ³ CH ₄
Вміст пилу	< 50 мг/нм ³ CH ₄	< 10 мг/нм ³ CH ₄	< 30 мг/нм ³ CH ₄	< 10 мг/нм ³ CH ₄
Величина зерен пилу	< 3 мкм	—	< 1 мкм	3...10 мкм
Пари масла	< 5 мг/нм ³ CH ₄	< 250 мг/нм ³ CH ₄	< 45 мг/нм ³ CH ₄	< 400 мг/нм ³ CH ₄
Вміст конденсату	0	0	—	0
Відносна вологість	< 80 %	< 60 %	< 80 %	< 60...80 %
Температура газу	< 40 °С	10...30 °С	—	10...50 °С
Мінімальний тиск на вході	80...200 мбар	—	—	20...2000 мбар
Коливання тиску газу	10 мбар/с	—	—	± 10 %

Існує ряд методів очищення біогазу від сірководню. Основними слід вважати метод біохімічного окислення, що базується на властивості сульфід окислюючих бактерій сімейства *Theobacillus* в присутності невеликої кількості кисню відновлювати сірководень до елементарної сірки, та метод хімічної взаємодії зі сполуками заліза, в результаті чого утворюється сульфід заліза, що випадає в осад.

Практика біогазових технологій в Німеччині показує, що в більшості випадків (88 %) використовують саме метод біохімічного осадження. Обумовлено це насамперед простотою методу, при якому в газове середовище реактора подають деяку кількість повітря за допомогою компресора. Ефективність видалення сірководню таким методом може сягати 95 %, а його концентрація в очи-

щеному біогазі – нижче 50 ppm. Кількість введеного повітря повинна строго контролюватись, виходячи з наступних міркувань: з метою уникнення передозування вмісту кисню в об'ємі біореактора та пригнічення метаболізму метанутворюючих бактерій; для уникнення утворення вибухонебезпечної суміші з метаном. Зазвичай, до об'єму утворюваного біогазу підмішують 2...6 % повітря.

Виробники ГПД вимагають застосування спеціальних мастил типу Energas BG 11 та Regasus 610 у випадку, коли не вдається досягти очистки біогазу до значень нижче: хлору (Cl) ≤ 30 мг/м³CH₄, фтору (F) ≤ 15 мг/м³CH₄, сірки (S) ≤ 300 мг/м³CH₄. Такі мастила забезпечують високу хімічну стійкість до окисації та нітрації. Використання таких мастил вимагає збільшених експлуатаційних витрат на обслуго-

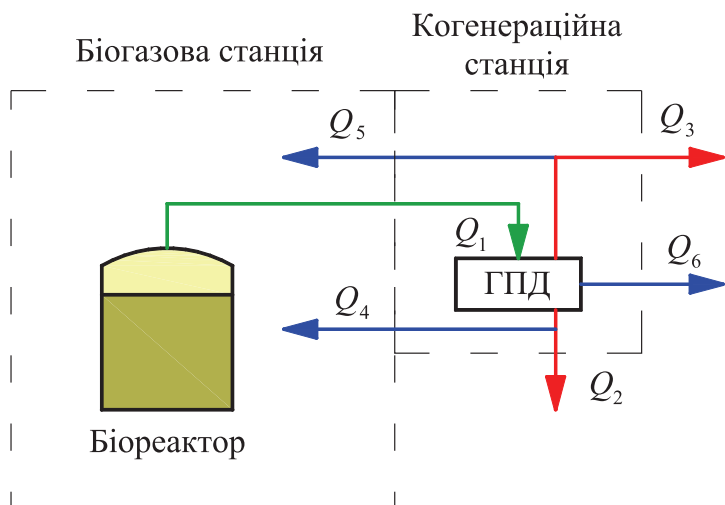


Рис. 2. Схема енергетичних потоків в системі "біогазова станція-КГУ":

Q_1 – енергетичний потенціал продукованого біогазу (брутто); Q_2 – товарний залишок виробленої теплової енергії; Q_3 – товарний залишок виробленої е/е; Q_4 – вироблена теплова енергія на власні потреби біогазової станції; Q_5 – вироблена е/е на власні потреби біогазової станції; Q_6 – загальні втрати енергії біогазу в КГУ.

вування ГПД і буде виправданим у випадку техніко-економічної доцільності при порівняльному аналізі з більш ефективними методами очистки біогазу.

Для видалення з біогазу водяних парів досить ефективно застосовується метод конденсації у водяних трапах. Більш ефективного видалення вологи при спалюванні біогазу в ГПД зазвичай не вимагається.

Енергетичний баланс

Використання когенераційних установок (КГУ) на основі ГПД в біогазових технологіях виправдане ще й тим, що для функціонування власне біогазової станції необхідна як електрична, так і теплова енергія. Електрична енергія витрачається на привід насосів, мішалок, компресорів тощо. Теплова енергія необхідна для підтримання процесу деструкції органічної речовини в біореакторі. Якщо споживання електроенергії біогазовою станцією протягом року практично рівномірне, то споживання теплової

енергії має циклічний характер: максимум в холодну пору року та мінімум – влітку. Біореактори станцій анаеробного зброджування зазвичай працюють в двох стаціонарних температурних режимах – мезофільному (38...42 °С) та термофільному – 50...53 °С.

На рис. 2 показано основні енергетичні потоки в системі "біогазова станція – КГУ":

Енергетичні потоки в системі "біогазова установка-КГУ" можна записати у вигляді такої системи рівнянь:

$$Q_1 = oTSq_{bg}LHV_{bg}; \quad (1)$$

$$Q_2 = Q_1\eta_{th} - Q_4; \quad (2)$$

$$Q_3 = Q_1\eta_e - Q_5; \quad (3)$$

$$Q_4 = k_1(t_{in} - t_{ex})F_{mt} + q_s C_s(t_{in} - t_s); \quad (4)$$

$$Q_5 = k_2 Q_3; \quad (5)$$

$$Q_6 = Q_1(1 - (\eta_e + \eta_{th})). \quad (6)$$

На рис. 3 показано структуру енергетичного балансу функціонування системи "біогазова станція-КГУ" для станції, що буде переробляти 100 т/добу відходів з енергетичним потенціалом, рівним 0,19 МВт·год/т. Розрахунки проведено з використанням наведеної системи рівнянь для кліматичних умов Києва. В розрахунках втратами енергії у розподільчих мережах знехтувано.

Споживання теплової енергії на власні потреби біогазової станції у наведеному прикладі складе від 12 % (літом) до 24 % (в зимовий період) від енергетичного потенціалу виробленого біогазу та 19 % в цілому за рік. Сумарні потреби в електричній та тепловій енергіях складуть 23 %. Таким чином, енергетична ефективність виробництва електричної та теплової енергії з біогазу станцій анаеробного зброджування в природно-кліматичних умовах України буде становити не менше 65...67 %.

Економічні показники

Ступінь корисної утилізації виробленої електричної та теплової енергії (нетто) буде визначати

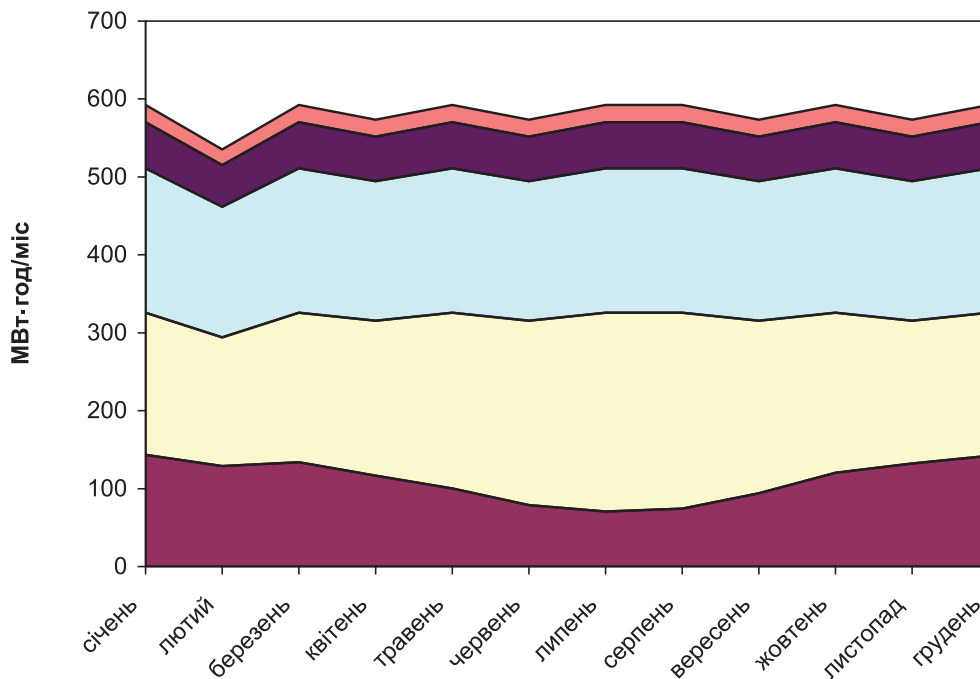


Рис. 3. Структура річного енергобалансу функціонування системи “біогазова установка-КГУ”. Знизу вверх: $Q_4 - Q_2 - Q_3 - Q_6 - Q_5$.

економічну доцільність проекту біогазової станції. Питання утилізації електричної енергії може розглядатися з двох позицій – споживання власними встановленими потужностями підприємства, відходи якого використовуються для вироблення біогазу, і як наслідок – економії споживання е/е з мережі, або ж підключення КГУ до загальної електричної мережі з отриманням доходу від продажу. Останній варіант з набуттям чинності згаданого Закону України ”про зелені тарифи” стає найбільш привабливим для інвестора. Таким чином працює більшість КГУ на біогазі в країнах, де діють аналогічні закони.

Проаналізуємо доцільність будівництва біогазової станції з КГУ, що переробляє 100 т/добу відходів з енергетичним потенціалом 0,19 МВт·год/т. Об’єм біореакторів при цьому складе 3000 м³, встановлена потужність ГПД – 276 кВт_е + 440 кВт_т. Річний об’єм виробленої е/е може становити близько 2200 МВт·год, теплової – 3000 Гкал.

Сумарні інвестиції в такий проект, з урахуванням будівництва систем енергетичної утилізації біогазу в когенераційних установках та зневоднювання зброджених відходів, будуть складати не менше 1,1...1,3 млн €. Можливостей значного скорочення інвестиційних затрат наразі не існує,

оскільки основне обладнання та технології необхідно купувати за кордоном через відсутність українського виробника біогазових установок “під ключ”. А це додаткові витрати на транспортування, розмитнення та ПДВ.

Основними окупними продуктами біогазової станції є електроенергія, тепло та стабілізована суспензія з покращеними агрономічними властивостями. Розглянемо варіант, коли весь товарний залишок виробленої е/е продається в мережу по “зеленому тарифу” (згідно з [2], такий тариф на 2009 рік очікується в розмірі не нижче 0,77 грн/кВт·год); 50 % товарного залишку виробленої теплової енергії споживається підприємством, де власне утворюються відходи, і таким чином економляться витрати на тепло в холодний період з розрахунку 200 грн/Гкал. Щодо органічного добрива, то можливість отримання додаткового доходу на його основі може бути реалізована за умови існування організованого ринку таких добрив з відповідною нормативно-правовою базою до їх застосування. Чого наразі в Україні немає. Тому в кожному конкретному випадку власник сільськогосподарського підприємства буде сам визначати, який потенційний дохід він зможе отримати від утилі-

Табл. 3. Розрахункові показники економічної ефективності роботи біогазової станції з утилізацією біогазу в КГУ

Показник економічної ефективності	Од. вим.	Вартість органічного добрива, €/т				
		0	2	4	6	8
Чиста приведена вартість проекту (NPV)	€	62 980	525 997	972 584	1 405 608	1 838 632
Внутрішня норма рентабельності (IRR)	%	11,4%	21,8%	32,7%	44,5%	58,6%
Простий термін окупності	років	6,53	4,05	2,85	2,13	1,64

зації стабілізованих відходів. Так, ціна вилежаного протягом року гною ВРХ, що реалізується на потреби господарників, складає сьогодні не менше 8 €/т.

В табл. 3 показано основні економічні показники роботи такої біогазової станції.

В приведених розрахунках не врахована можливість уникнення частини обов'язкових за внутрішнім законодавством екологічних платежів та штрафів. Повертаючись до органічних добрив – вони можуть набути цінності в межах господарської діяльності конкретного агрогосподарства, якщо врахувати ефект від додаткового приросту врожайності культур при застосуванні таких добрив. Зі слів власників однієї з таких біогазових станцій (с. Єленівка, Магдалинівського р-ну, Дніпропетровської обл.), що переробляє гній 15000 свиней, врожайність зернових підвищилась вдвічі при застосуванні зброженого гною. Про підвищення врожайності свідчать також результати цілого ряду наукових польових досліджень. Отже, з усього видно, що окупність біогазових проектів утилізації біогазу в КГУ з підвищенням тарифів на енергоносії за певних обставин може бути в межах економічної доцільності.

ВИСНОВКИ

1. Біогазова технологія на основі відходів агропромислового комплексу найбільш оптимально вирішує одночасно проблеми екології, альтернативної енергії та відновлення родючості ґрунтів.

2. Широке застосування технології виробництва біогазу з відходів агропромислового комплексу з утилізацією в КГУ може щорічно замінювати до 85 % потреб в електричній енергії сільського господарства України.

3. Біогазова технологія є технологічно розвинутою і сумісною з використанням ГПД за умови очищення біогазу відомими і достатньо простими методами.

4. Енергетичний баланс системи “біогазова станція-КГУ” в природно-кліматичних умовах України є позитивним.

5. Функціонування біогазової установки з утилізацією біогазу в ГПД може бути економічно доцільним за умов продажу е/е в мережу за “зеленим тарифом” і врахування вартості зброжених відходів не нижче 1 €/т.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Статистичний щорічник України за 2006 рік*. Державний комітет статистики України. – К.: Консультант, 2007. – 92 с.
2. *Закон України N 601-VI “Про внесення змін до деяких законів України щодо встановлення «зеленого» тарифу”* від 25 вересня 2008 року.
3. *M. Persson, O. Jönsson, A. Wellinger. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection.* – IEA Bioenergy. Task 37 – Energy from biogas and landfill gas. – December 2006.

Отримано 21.11.2008 р.