

С. В. ДІГТЯР, А. В. ПАСЕНКО, О. В. НОВОХАТЬКО, О. В. МАЗНИЦЬКА, О. О. НИКИФОРОВА

ВИКОРИСТАННЯ МУЛЬТИСУБСТРАТНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ БІОСИНТЕЗУ МЕТАНУ АДАПТОВАНИМ КОМПЛЕКСОМ МІКРООРГАНІЗМІВ З ОТРИМАННЯМ ОРГАНІЧНОГО ДОБРИВА

Через нестабільність ринкових цін на традиційні вуглеводневі енергетичні ресурси та негативний вплив продуктів їх згоряння на навколишнє середовище останнім часом досить стрімко розвиваються технології, що передбачають використання, насамперед, відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямків альтернативної енергетики є біоенергетика – галузь біотехнології, яка розглядає як джерело палива органічні речовини біомаси різного походження (переважно сільськогосподарські відходи). Серед основних переваг енергетичної біотехнології слід відзначити швидкість та відносну легкість відновлення енергетичного субстрату, а також той факт, що він не є чужинним для довкілля, тому навіть у випадку потрапляння до навколишнього середовища у кількостях, що перевищують допустимі, це не призведе до незворотних змін в екосистемі. Надлишок біомаси незабаром буде включений до біогеохімічних циклів, що є запорукою для мінімізації шкоди довкіллю. Процес біоконверсії метану з органічних сполук субстрату (вуглеводів, білків, нуклеїнових кислот, ліпідів, органічних кислот, спиртів), який відбувається у три етапи, називають метаногенезом. У цьому процесі приймає участь специфічна складна ферментна система бактерій, до складу якої входять коферменти: метанофуран, тетрагідро-метанофтерин, коферменти F420 та F430, кофермент M (КоМ), кофермент В. Використання способів переробки та утилізації відходів, що базуються на альтернативних біологічних методах рециклінгу органічних забруднювачів, не завжди дозволяє досягти очікуваного ефекту, зокрема на працюючих у закритому режимі штучно створених екосистемах зооферм. Концентрування на невеликій площі значної кількості відходів життєдіяльності (гною, посліду та стоків технологічних процесів тощо) утримуваної на об'єктах тваринницької галузі худоби, забруднює ґрунти, водойми та атмосферне повітря мікроорганізмами, пилом, шкідливими газами та іншими продуктами розпаду. Часто це є одним з основних чинників, які обмежують зростання потужностей підприємств тваринництва та АПК в цілому, стримуючи економічний розвиток районів, що спеціалізуються на аграрному виробництві. Вперше у регіоні було проведено дослідження з метою визначення найефективнішого способу переробки фітомаси міскантусу для виробництва в якості цільових продуктів метановмісної біогазової суміші та органо-мінерального добрива придатного до використання у сільському та лісовому господарстві. Запропоновано економічно та екологічно привабливий спосіб утилізації відходів фіто- та зоогенного походження, що дозволяє суттєво зменшити антропогенний тиск на довкілля.

Ключові слова: мультисубстратна суміш, анаеробне бродіння мікроорганізмів, метаногенез, біогаз, біодайджестер, сільське господарство, лісове господарство, утилізація відходів, біотестування

С. В. ДЕГТЯРЬ, А. В. ПАСЕНКО, О. В. НОВОХАТЬКО, О. В. МАЗНИЦКАЯ, Е. А. НИКИФОРОВА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИСУБСТРАТНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ БИОСИНТЕЗА МЕТАНА АДАПТИРОВАННЫМ КОМПЛЕКСОМ МИКРООРГАНИЗМОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ОРГАНИЧЕСКОГО УДОБРЕНИЯ

В связи с нестабильностью рыночных цен на традиционные углеводородные энергоресурсы и негативным влиянием продуктов их сгорания на окружающую среду в последнее время достаточно быстро развиваются технологии использованием, прежде всего, возобновляемых источников энергии. Одним из перспективных направлений альтернативной энергетики является биоэнергетика – отрасль биотехнологии, рассматривающая в качестве источника топлива органическое вещество биомассы различного происхождения (в основном сельскохозяйственные отходы). Среди основных преимуществ энергетической биотехнологии следует отметить скорость и относительную лёгкость восстановления энергетического субстрата, а также тот факт, что он не чужероден для окружающей среды, поэтому даже при выбросе в количествах, превышающих допустимые, это не приведёт к необратимым изменениям в экосистеме. Избыточная биомасса быстро будет включена в биогеохимические циклы, что является ключом к минимизации ущерба окружающей среде. Процесс биоконверсии метана из органических соединений субстрата (углеводов, белков, нуклеиновых кислот, липидов, органических кислот, спиртов), который протекает в три этапа, называют метаногенезом. В этом процессе принимает участие специфическая сложная ферментная система бактерий, в состав которой входят коферменты: метанофуран, тетрагідро-метанофтерин, коферменты F420 и F430, кофермент M (КоМ), кофермент В. Использование способов переработки и утилизации отходов, базирующихся на альтернативных биологических методах рециклінга органических поллютантов, не всегда позволяет достичь ожидаемого эффекта, в частности на работающих в закрытом режиме искусственно созданных экосистемах зооферм. Концентрация на небольшой площади значительного количества отходов жизнедеятельности (навоза, помёта, стоков технологических процессов и т.д.) содержащегося на объектах животноводческой отрасли скота, загрязняет почву, водоёмы и атмосферный воздух микроорганизмами, пылью, вредными газами и другими продуктами разложения. Часто это является одним из основных факторов, которые ограничивают рост мощностей предприятий животноводства и АПК в целом, сдерживая экономическое развитие райо-

© С. В. Дігтяр, А. В. Пасенко, О. В. Новохатько, О. В. Мазницька, О. О. Никифорова, 2021

нов, спеціалізуються на аграрному виробництві. Вперше в регіоні були проведені дослідження з метою визначення найбільш ефективного способу переробки фітомаси мискантуса для виробництва в якості цільових продуктів метаносодержащої біогазової суміші і органо-мінерального добрива придатного до застосування в сільському і лісному господарстві. Предложено економічно і екологічно привлекательний спосіб утилізації відходів фіто- і зоогенного походження, який дозволяє суттєво знизити антропогенний пресинг на оточуюче середовище.

Ключові слова: мультисубстратна суміш, анаеробне бродіння мікроорганізмів, метаногенез, біогаз, біодайджестер, сільське господарство, лісне господарство, утилізація відходів, біотестування.

S. DIGTIAR, A. PASENKO, O. NOVOKHATKO, O. MAZNYTSKA, O. NYKYFOROVA

THE USE OF MULTISUBSTRATE MIXTURES FOR METHANE BIOSYNTHESIS BY AN ADAPTED COMPLEX OF MICROORGANISMS FOR OBTAINING ORGANIC FERTILIZER

Due to the instability of market prices for traditional hydrocarbon energy resources and negative impact of their combustion products on the environment, recently quite rapidly develop technology that provide for, first of all, renewable energy sources. One of the promising areas of alternative energy is bioenergy is a branch of biotechnology that considers organic matter of biomass of various origins (mainly agricultural waste) as a fuel source. Among the main advantages of energy biotechnology, it should be noted the speed and relative ease of recovery of the energy substrate, as well as the fact that it is not alien to the environment, so, even if released in quantities exceeding the permissible ones, this will not lead to irreversible changes in the ecosystem. Excess biomass will quickly be incorporated into biogeochemical cycles, which is the key to minimizing environmental damage. The process of bioconversion of methane from organic substrate compounds (carbohydrates, proteins, nucleic acids, lipids, organic acids, alcohols), which in three stages, is called methanogenesis. This process involves a specific complex bacterial enzyme system, consisting of the following coenzymes: methanofuran, tetrahydro-methanopterin, coenzymes F420 and F430, coenzyme M (CoM), coenzyme B. Using of ways of processing and waste disposal, that based on alternative biological recycling methods of organic pollutants does not always allow to achieve the expected effect, in particular on artificially created ecosystems of animal farms working in a closed mode. Concentration on a small area of a significant amount of biowaste (manure, dung, process runoffs etc.) of the cattle kept in the facilities of live-stock industry, contaminates soils, water bodies and atmospheric air with microorganisms, dust, harmful gases and other decomposition products. Often, it is one of the main factors constraining on the growth of livestock enterprises and agro-industrial complex (AIC) capacities in general, restraining the economic development of regions specializing in agricultural production. For the first time in the region, study was carried out in order to determine the most efficient way to process miscanthus phytomass for the production as target products of methane-containing biogas mixture and organo-mineral fertilizer suitable for use in agriculture and forestry. An economically and ecologically attractive way of utilization of wastes of phyto- and zoogenic origin, which makes it possible significantly reduce anthropogenic pressure on the environment, has been proposed.

Keywords: multisubstrate mixture, anaerobic fermentation of microorganisms methanogenesis, biogas, bio-digester, agriculture, forestry, waste disposal, biotesting.

Вступ.

Внаслідок нестабільності ринкових цін на традиційні вуглеводневі енергоресурси [1] та негативний вплив продуктів їх горіння на довкілля [2] останнім часом досить стрімко розвиваються технології, які передбачають використання, в першу чергу, відновлюваних джерел енергії. Одним з перспективних напрямків альтернативної енергетики є біоенергетика – галузь біотехнології, що розглядає в якості джерела для отримання палива органічну речовину біомаси різноманітного походження (здебільшого відходів сільськогосподарського виробництва). Серед головних переваг енергетичної біотехнології слід зазначити швидкість та відносну простоту відновлення енергетичного субстрату, а також те, що він не є чужинним для довкілля, отже навіть у випадку потрапляння до навколишнього середовища у кількостях вищих за допустимі, це не призведе до незворотних змін в екосистемі. Надлишки біомаси досить швидко будуть включені до біогеохімічних циклів, що є запорукою мінімізації шкоди природному середовищу.

Використання на підприємствах АПК методів переробки відходів та технологій їх утилізації, заснованих на інших біологічних способах переробки органічних забруднювачів не завжди виявляється досить ефективним, особливо в умовах штучно створених зооекосистем, які функціонують в закритому режимі. Накопичення на незначних територіях великої кількості відходів тваринницьких підприємств, а саме гною, гнойових та технологічних стоків, посліду забруднює ґрунти, водні об'єкти та повітряний басейн шкідливими газами, мікроорганізмами, пилом та іншими продуктами розщеплення органічних речовин відходів, що є головною проблемою на шляху створення великих комплексів з виробництва продукції тваринництва [3].

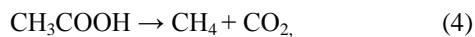
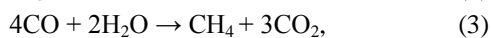
Розвиток тваринництва у сільському господарстві в наш час потребує запровадження новітніх технологій виробництва продукції, що, крім економічної вигоди, поглиблює екологічні проблеми, пов'язані із концентрацією поголів'я та накопиченням значної кількості екскрементів і технологічних стоків на обмежених територіях [4–6].

Аналіз стану питання. Процес біоконверсії метану з органічних сполук субстрату (вуглеводів, білків, нуклеїнових кислот, ліпідів, вуглеводнів, органічних кислот, спиртів) називають метаногенезом, який відбувається у три етапи.

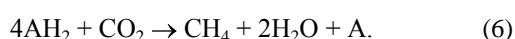
На першому етапі за участю ферментів гідролаз, що синтезують грам-негативні неспороутворюючі анаеробні мікроорганізми, здійснюється розкладання високомолекулярних біополімерних сполук (вуглеводів, білків, нуклеїнових кислот), вуглеводнів та ліпідів до низькомолекулярних органічних речовин (моно- і олігосахаридів, амінокислот і пептидів різного ступеня складності, пуринових і піримідинових азотистих основ, гліцерину і різних карбонових кислот), а також CO_2 й H_2 .

На другому етапі метаногенезу з отриманих на першому етапі продуктів (за винятком оцтової кислоти, CO_2 й H_2) під дією кислотоутворюючих мікроорганізмів утворюються різні органічні кислоти, які потім окислюються, головним чином, до ацетату і CO_2 . На цій стадії також утворюються водень, аміак і сірководень.

На третьому етапі за участю ферментів, що продукують анаеробні споро- і неспороутворюючі метаногенні бактерії, відбувається остаточне перетворення органічних речовин на метан і вуглекислий газ. Біологічна роль утворення CH_4 метаногенними бактеріями полягає в одержанні клітинами енергії (утворення молекул АТФ) для процесів життєдіяльності. Метаногенні бактерії здатні використовувати для отримання енергії форміат, метанол, CO , ацетат, а також метильовані аміни:



Наприкінці метаногенезу зі складових CO_2 й H_2 утворюється деяка кількість метану і води. Енергію бактерії отримують за рахунок окислення H_2 як донора електронів за умов спряженого відновлення CO_2 – акцептора електронів:



Вважається, що близько 70 % метану утворюється у результаті реакцій (2, 4), 25 % – в реакції (6), інші 5 % – в реакціях (1, 3, 5).

У процесі метаногенезу приймає участь специфічна складна ферментна система бактерій, до складу якої входять коферменти метанофуран, тетрагідро-метанофтерин, коферменти F420 та F430, кофермент M (КоМ), кофермент B [7].

До складу природного угруповання мікроорганізмів, що здійснюють процес метаногенезу, входять різноманітні види анаеробних бактерій, що розкладають клітковину, вуглеводи, білки, пептиди, амінокислоти, ліпіди та ін. сполуки. Завдяки їх діяльності органічні рештки, відмерла біомаса різного походження може слугувати вихідною сировиною для одержання біогазу в процесі біодеструкції. Оскільки біогаз отримують з органічного субстрату різного генезису, то для ефективного метаноутворення використовують переважно багатокомпонентні мікробні асоціації. До їх складу окрім метаногенів входять мікроорганізми, що перетворюють органічні субстрати на метанол, мурашину та оцтові кислоти, водень, CO_2 тощо. Це симбіотичне угруповання здатне змінювати шляхи ферментації вихідної речовини і функціонує як саморегулююча система, що підтримує у середовищі оптимальні значення рН, окислювально-відновного потенціалу та термодинамічну рівновагу для свого росту й розвитку і забезпечує стабільність процесу метаногенезу.

Аналіз основних досягнень і літератури.

За біохімічною активністю бактерії, що здійснюють метаногенез, поділяють на 4 групи:

- гідролітичні бактерії;
- кислотоутворюючі бактерії;
- гетероацетогенні, гомоацетогенні бактерії;
- метаноутворюючі бактерії.

Перша стадія деструкції складних органічних полімерів – гідроліз – здійснюється бактеріями родів *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyrivibrio* та ін. Цей процес позаклітинний і відбувається за участю комплексу бактеріальних екзоферментів. Від набору й кількості цих ензимів, рН, часу контакту з субстратом залежить ефективність та швидкість перебігу гідролізу. Основними продуктами гідролізу є амінокислоти, цукри, жирні кислоти. На першому етапі другої стадії біодеструкції кислотоутворюючі бактерії родів *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas* та *Desulfovibrio* окислюють ці продукти до ацетату, пропіонату, сукцинату, спиртів, альдегідів, NH_3 , H_2S , H_2 і CO_2 .

Бактерії другого етапу цієї стадії біодеструкції (родів *Acetobacterium*, *Acetogenium*, *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas* та ін.) викликають розклад пропіонату, бутирату, лактату й пірувату до ацетату, H_2 і CO_2 .

На останній третій стадії метаногенезу працюють безпосередньо метаноутворюючі бактерії.

Метаноутворюючі бактерії відносять до типу *Euryarchaeota* родів *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanothrix*, *Methanocalculus*, *Methanococcoides*, *Methanosphaera*, *Methanococcus*, *Methanocorpusculum*, *Methanoculleus*, *Methanofollis*, *Methanogenium*, *Methanomicrobium*, *Methanopyrus*, *Methanoregula*, *Methanosaeta*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum*, *Methanothermobacter*.

Інгібування процесу метаногенезу викликають підвищені у живильному середовищі концентрації йонів амонію, натрію, калію, кальцію, магнію, важких металів, нітратів, сульфідів, а також різноманітних ксенобіотиків. Шляхи подолання інгібування:

- видалення токсичної рідкої фази;
- розведення водою субстрату;
- додавання антагоніста виявленого токсину;
- осадження токсинів;
- утворення хелатних комплексів з токсинами;
- адсорбція токсинів.

Біоконверсію органічного субстрату з утворенням CH_4 здійснює асоціація мікроорганізмів (змішана культура), тому зменшення кількості різних видів метаногенних бактерій у змішаній культурі веде до зниження інтенсивності утворення метану. Через відносно низьку швидкість біодеструкції субстрату необхідно застосовувати значну кількість інокуляту біоагента – не менш 30–50 % відносно до об'єму субстрату. Інфікування субстрату, який ферментують, виключено, тому що процес ведеться змішаними культурами і не потребує дотримання умов стерильності. Інокулят, як правило, природньо присутній у вихідному субстраті. За необхідності проводять попереднє культивування культур групи метаногенів на комбінованих поживних середовищах, до складу яких входять ростові фактори (напр., кофермент М (КоМ), фактор F420), що підвищує продуктивність монокультури метаногенів. Отримання високопродуктивного інокуляту забезпечує високу за виходом біогазу продуктивність ферментації.

Сприятливим для життєдіяльності угруповання метаноутворюючих мікроорганізмів вважається середовище, у якому концентрація сухої речовини знаходиться на рівні 10–12 % (уміст води 60–80 % за масою). У цьому випадку в'язкість субстрату забезпечує вільний рух рідини із суспендованими у ній твердими частками органічної речовини та мікробними клітинами, а також пухирцями газу, що у свою чергу прискорює процеси гідролізу, ацетогенезу і метаногенезу в

результаті зростання рухливості бактеріальних клітин.

Для збільшення площі поверхні субстрату, що контактує з бактеріальними клітинами, здійснюють контроль такого параметру, як довжина органічних решток, що входять до складу біомаси, відходів. Цей показник не повинний перевищувати 10–30 мм. При використанні біомаси ціанобактерій це питання стає неактуальним.

Процес ферментації здійснюють за умов двох температурних режимів. Мезофільний режим метаногенезу реалізують при температурі 30–35 °С. Термофільний процес передбачає підтримання температури 50–55 °С. Вважається, що в інтервалі температур від 36 до 48 °С процес метаногенезу загасає. Переваги термофільного режиму: висока інтенсивність біоконверсії органічної речовини, короткий термін метаногенезу (у 2 рази коротше мезофільного), супроводжується більш високим газовиділенням, санітарна безпека дигестату (при високих температурах гинуть патогенні бактерії й яйця гельмінтів). Недолік вищевказаного режиму – його енергоємність (збільшені витрати тепла).

Згідно експертної оцінки REN21 біоенергетика належить до видів поновлюваних джерел енергії (ПДЕ), що найбільш динамічно розвиваються останнім часом [8]. При цьому використання ресурсів біомаси відіграє домінуючу роль серед інших видів ПДЕ, формуючи біля 46% ринку поновлюваних джерел енергії. З різних видів біомаси виробляють газоподібне (біогаз), рідке (біоетанол, біодизель) та тверде біопаливо. На основі біопалива зростають обсяги виробництва тепло- та електроенергії [9].

Виробництво біогазу з гною великої рогатої худоби (ВРХ) дозволяє запобігти викиду метану в атмосферу, а його уловлювання – найкращий спосіб запобігання глобального потепління. Біогаз може використовуватися як і звичайний природний газ для обігріву, вироблення електроенергії, завдяки чому ферма самостійно може себе забезпечувати тепловою та електричною енергією. Споживання біогазу в технічних цілях може сприяти зменшенню емісії метану. Цінність гною ВРХ, свиней та птиці, що використовується з метою отримання енергетичного джерела – біогазу – залежить від вмісту у ньому органічної складової, сирих рослинних залишків та води. Оптимальною вважається вологість субстрату 86–90 % [10].

Крім того підстилковий гній ВРХ можна розглядати як екологічно безпечне органічне добриво, що містить ряд мікроелементів, важливих для живлення

рослин. Це необхідно для підтримання родючості ґрунту і утворення гумусу.

Гнойові відходи тваринництва (гній ВРХ), особливо безпідстилкові, завдяки високому вмісту води, є придатними для розбавлення інших, більш концентрованих субстратів, що дозволяє перекачувати їх насосами. Технології виробництва та енергетичного використання біогазу набули поширення в світі, а загальне виробництво енергії з біогазу, зокрема в країнах ЄС, має тенденцію до постійного зростання. Інтенсивне нарощування виробництва біогазу має місце в країнах, де широко використовуються спеціально вирощені для енергетичних потреб види рослинної сировини, серед яких кукурудза на силос є найбільш ефективною, а відтак і найбільш поширеною сировиною. При цьому, визначальним фактором, що обумовлює напрям використання енергії виробленого біогазу, є види стимулювання, серед яких встановлення фіксованого «зеленого» тарифу на електричну енергію з біогазу є найбільш поширеним та дієвим засобом стимулювання. В Україні біогазові проекти, попри значний потенціал виробництва біогазу як у використанні відходів та побічної продукції, так і в енергетичному використанні земельних ресурсів, розвиваються досить повільно. Як показує досвід, без широкого використання рослинної сировини, а також без дієвих механізмів стимулювання, досягти таких планів буде складно.

Для переробки гною ВРХ широко використовують метанове бродіння відходів з утворенням біогазу, який на 60 – 80 % складається з метану і на 15 – 20 % – вуглекислого газу. Метанове зброджування – це процес, який здатний дати величезну користь в знезараженні вихідної сировини. Виробництво біогазу шляхом метанового бродіння відходів – одне з можливих вирішень енергетичних і екологічних проблем. Щоб забезпечити великомасштабний розвиток і економічну ефективність установок з виробництва біогазу, необхідно вирішити ряд біохімічних, мікробіологічних, соціальних та технічних проблем.

Одночасно з гноем ВРХ значну увагу як джерело для контрольованого метаногенного процесу привертає і пташиний послід, що накопичується в процесі роботи птахокомплексів та діяльності фермерських господарств. Даний тип відходів також є досить небезпечним для навколишнього середовища та несе загрозу для населення як в епідеміологічному так і у екологічному плані. Хімічна агресивність пташиного посліду зумовлена високим вмістом у ньому азотистих сполук, зокрема таких, що ведуть до утворення у субстраті вільного аміаку. Все це загрожує передчас-

ним вичерпанням ресурсу обладнання, яке застосовується у біогазовому виробництві.

Удосконалення стосуються таких моментів:

- скорочення числа сталевих елементів в обладнанні;
- створення обладнання з оптимізованою конструкцією;
- розробка ефективних нагрівачів;
- нагрівання біогазової уставновки сонячною енергією;
- об'єднання систем виробництва біогазу з іншими нетрадиційними джерелами енергії;
- конструювання великомасштабних виробничих одиниць для сільського господарства і міст;
- оптимальне використання відходів;
- удосконалення процесів бродіння і початкової деградації відходів шляхом створення активних метаногенних штамів бактерій з використанням методів генної інженерії;
- підбір компонентного складу субстратних сумішей для виробництва біогазу на основі органічної речовини фіто- та зоогенного походження, а також визначення оптимального співвідношення складових мультисубстрату.

Наукове обґрунтування компонентного складу комбінованих мульти- чи моносубстратних сумішей з метою підвищення ефективності виходу біогазу як цільового продукту безвідходної біотехнології, зазвичай залишається поза увагою вітчизняних дослідників з огляду на недостатній рівень розвитку біоенергетичних технологій у державі. Головною задачею переважно є утилізація конкретного виду органічних відходів АПК залежно від спеціалізації сільськогосподарського виробництва в регіоні.

Мета роботи. Метою досліджень стала розробка компонентного складу мультисубстратних сумішей на основі органічної речовини відходів АПК.

Завдання дослідження:

- визначення оптимального співвідношення основних компонентів органічних мультисубстратних сумішей для виробництва біогазу;
- обґрунтування вибору сировинних інгредієнтів при формуванні мультисубстратних сумішей;
- експериментальне отримання біогазу в лабораторних умовах із мультисубстратних та моносубстратних сумішей;
- порівняльний аналіз отриманих результатів.

Переваги отримання біогазу очевидні, оскільки процес метаногенезу задовольняє потребу в енергії, цінному органічному добриві і сприяє охороні навколишнього середовища.

Синтез біогазу відбувається за рахунок життєдіяльності комплексу мікроорганізмів, який формується всередині біореактора після завантаження органічного субстрату. Переробка сировини на метан відбувається в ході складних взаємодій у змішаних популяціях бактерій, що належать до групи археїв, відомих під загальною назвою метаногенів. Утворення метану з органічних сполук відбувається у чотири стадії, основною з яких є власне метаногенна стадія. Головні біохімічні шляхи синтезу метану – біосинтез з оцтової кислоти та біосинтез з Гідрогену та діоксиду Карбону [11].

Розроблено технологічну та апаратурну схему виробництва з отримання біогазу із гною ВРХ по обраній технології. Технологічна схема включає підготовку сировини – подрібнення, гомогенізація, змішування та доведення до необхідної вологості, отримання біогазу в метантенку з подальшою його очисткою та подачею до газгольдера чи безпосередньо до спалюючого пристрою, а також переробку відходів на біодобрива. Розроблено креслення апаратурної та технологічної схем.

Зброджування гною дає змогу вирішити економічні, екологічні та санітарно-епідеміологічні проблеми, що виникають внаслідок накопичення великої кількості відходів тваринництва. Виробництво біогазу є однією з безвідходних технологій, яка виконує природоохоронну і ресурсозберігаючу функцію, адже воно не лише не призводить до утворення будь яких відходів, а і утилізує відходи сільськогосподарського, спиртового, харчового та інших виробництв. І разом з тим, частково дозволяє вирішувати проблему збереження традиційних енергоносіїв, що є надзвичайно важливим у сучасних умовах.

Враховуючи вичерпність традиційних джерел енергії та їх негативний вплив на природні екосистеми, тема використання альтернативних джерел палива стає дедалі все більш актуальною. Зокрема звертає на себе увагу широкое впровадження в культуру так званих енергетичних рослин. Одним з перспективних для біоенергетичної галузі видів є *miscanthus giganteus* [12].

Міскантус – це рід багаторічних трав, який має С4 шлях фотосинтезу та походить із Азії та Африки. Давно визнана його декоративна цінність, через що він активно культивується, але як біоенергетичну культуру його стали розглядати відносно недавно.

Діапазон врожайності міскантусу становить від 5 до 55 т/га [13], що робить його однією із найбільш продуктивних культур помірному клімату.

Важливою властивістю міскантусу є його невибагливість до ґрунтів. Він не потребує додаткових добрив. Головною ознакою ґрунту, яка для цієї культури

переважає значення показників кислотності чи його типу, є його розпушеність [14].

Результати і методи дослідження. З метою отримання фітомаси міскантусу в квітні 2019 року на дослідній ділянці площею 20 м² у два ряди були висаджені 15 куртинок цієї рослини. Саджанці успішно перенесли зими 2020 та 2021 років. На даний час за ними триває спостереження. Отже акліматизацію даних зразків міскантусу в умовах Полтавської області можна вважати успішною.

Результати хімічного аналізу відповідних субстратів за складовими компонентами (високий вміст Нітрогену та низький вміст Карбону для пташиного посліду та протилежна ситуація для міскантусу) дозволили запропонувати їх використання у вигляді комбінованих сумішей. Завдяки комбінуванию можна досягати оптимального співвідношення Карбону до Нітрогену (30:1), і, як наслідок, отримати більший вихід біогазу. Програма досліджень передбачала проведення трьох експериментів, в ході яких із субстратів органічного походження на основі чистої вегетативної маси міскантусу, пташиного посліду та їх суміші у співвідношенні 1:1 були отримані зразки біогазу.

Експериментальний видобуток метановмісної біогазової суміші здійснювався у спеціально змонтованій лабораторній установці, яка являла собою ємність, наполовину заповнену субстратом. За допомогою трубки вона сполучалася з такою самою ємністю, заповненою водою, в результаті чого утворився так званий водяний затвор. Дослід відбувався у термостаті ТС-8014У4.2, де було розміщено установку, за температури 25 °С (рис. 1).

Виділення газової суміші почалося вже наступної доби після монтажу та завантаження дослідної установки. Добуток біогазу відзначався щодоби.



Рисунок 1 – Дослідна біогазова установка

Результати досліджень дозволили побудувати діаграму (рис. 2), яка підтверджує припущення щодо більшого виходу біогазу за умов поєднання у мультисубстратній суміші компонентів рослинного та тваринного походження, що допомагає отримати співвідношення Карбону до Нітрогену дорівнює 30:1 в органічному середовищі, яке піддається біоферментації.

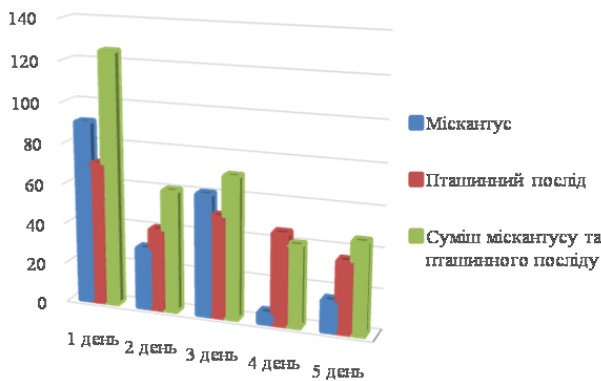


Рисунок 2 – Графік добутку біогазу на основі різних субстратів

Висновки. Пташиний послід в якості одного з компонентів органічного мультисубстрату був обраний, виходячи зі ступеню екологічної загрози навколишньому середовищу, яка виникає з боку підприємств АПК внаслідок недосконалої технології утилізації відходів птахівництва. В той же час переробка пташиного посліду на біогаз дозволяє не лише суттєво зменшити антропогенний пресинг на довкілля, а й отримати цінний з енергетичної точки зору продукт – біогаз. Все це робить даний метод більш привабливим у порівнянні з традиційними. Крім того відпрацьований в ході метаногенезу залишковий субстрат (дигестат) може бути успішно використаний в якості органо-мінерального добрива у сільському та лісовому господарстві. Для цього було визначено його токсичність із застосуванням фізичних, хімічних та біологічних методів. Серед останніх варто зазначити метод біотестування та ростового тесту [15].

Таким чином вперше в регіоні проведено комплексні дослідження, які дозволили визначити найбільш ефективні шляхи застосування органічної маси міскантусу. Запропоновано екологічно та економічно привабливий спосіб утилізації відходів тваринного походження.

Список літератури

1. Алхасов А. В. Возобновляемая энергетика. М.: ФИЗМАЛИТ, 2012. – 256 с.
2. Синельникова Д. А., Козлова Г. В. Экология. – Симферополь, СОНАТ, 2007. – 208 с.

3. Гігієна та біоферментація побічних продуктів тваринництва / Захаренко М. О. та ін. – К.: – «Центр учбової літератури», 2017. – 536 с.
4. Вербицький П. І. Утилізація відходів тваринного походження в Україні / П. І. Вербицький // Тваринництво України. – 2008. – №5. С. 2–4.
5. Гончарова Н. П. Інноваційні технології реконверсії відновлювальних ресурсів як умова модернізації виробництва / Н. П. Гончарова, Б. Б. Коциньський // Формування ринкових відносин в Україні: 36. Наукових праць науково-дослідного економічного ін-ту, 2009. – №8(99). С. 89 – 93.
6. Грищенко О. В. Екологізація сільськогосподарського виробництва в нових умовах господарювання. / О. В. Грищенко, Т. С. Ріпіна, О. О. Артеменко // Вісн. Аграр. Науки Причорномор'я: 36 наук. зїзд, Миколаїв, Держ. Аграр. Ун-т. – Миколаїв, 2001. – спец. вип. 3(11–12). Т.1. – Соц. економ. пробл. природокористування та екології. – С.336 – 342.
7. Пасенко А. В., Козловська Т. Ф., Новохатько О. В., Дігтяр С. В., Никифорова О. О. / Основні підходи до математичного моделювання біологічної продуктивності ціаней як сировинної бази біоконверсії // А. В. Пасенко, Т. Ф. Козловська, О. В. Новохатько, С. В. Дігтяр, О. О. Никифорова. – Науковий журнал «Екологічна безпека». – Кременчук, 2016. – Вип. 2(22). – С. 118–127.
8. REN21 глобальний звіт «Стан поновлюваної енергетики 2017» («Renewables 2017 Global Status Report»)
9. Зарубіжний досвід електро- та теплопостачання на основі впровадження екологічно ефективних біопаливних технологій. // Мінерговузівська Україна ДП «НЕК «УКРЕНЕРГО» відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку об'єднаної енергетичної системи України» Державного підприємства «Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО» (НПЦР ОЕС України). – 2017.
10. Тюрин В. Ветеринарно-санитарная оценка помёта / В. Тюрин // Птицеводство. – 2009. – №7 – С. 46.
11. Сассон А. Биотехнология: свершения и надежды: пер. с англ. / Под ред., с предисл. и дополн. В.Г. Дебабова. – Москва: Мир, 1987. – 411 с., ил.
12. Сергієнко Н. С., Дігтяр С. В., Леднева Н. Ю. Перспективи отримання біопалива з фітомаси міскантусу гігантського. Перспективу отримання біопалива з фитомассы мискантусу гігантського XXII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Київ, Інститут відновлювальної енергетики НАН України, НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 20 – 21 травня 2021, С. 1002 – 1006
13. Heaton et al. 2010. Miscanthus: A Promising Biomass Crop Section II, p. 86–89.
14. Christian D. G. and Haase E. (2001). Agronomy of Miscanthus. In Miscanthus for Energy and Fibre, (M. B. Jones and M. Walsh, eds.), pp. 21–45. James & James, London.
15. Губачов О. І., Сливка Г. В. Біотестування – Кривий Ріг: Мінерал. – 2011. – 192 с.

References (transliterated)

1. Alkhasov A. B. Vozobnovlyayemaya energetika. M.: PHYSMATLIT, 2012. – 256 p.
2. Sinelnikova D. A., Kozlova G. V. Ekologiya. – Symferopol, SONAT, 2007. – 208 p.
3. Gigiena ta biofermentaciya pobichnyh productive tvarynnyctva / Zakharenko M. O. at all – K.: – «Centr uchbovoyi literatury», 2017. – 536 p.
4. Verbytskyi P. Utylizatsiya vidkhodiv tvarynnygo pohodzhenn'a v

- Ukrayini / P. Verbytskyi // Tvarynnyctvo Ukrainy. – 2008. – №5. P. 2 – 4.
5. Goncharova N. P. Innovatsiyni tekhnologii reconversii vidnovluyanykh resursiv yak umova modernizatsii vyrobnyctva / N. P. Goncharova, B. B. Kocyns'kyi // Formuvann'a rynkovykh vidnosyn v Ukraini: Zb. naukovykh prac' naukovo-doslidnogo ekonomichnogo instytutu, 2009. – №8(99). P. 89 – 93.
 6. Gryshchenko O. V. Ecologizaciya sil's'kogospodars'kogo vyrobnyctva v novykh umovakh gospodaryuvann'a / O. V. Gryshchenko, T. Y. Pipina, O. O. Artemenko // Visn. Agrar. Nauky Prychornomorya: 36 nauk. Zyizd, Mykolaiv, Derzh. Agrar. Un-t. – Mykolaiv, 2001. – spec. vyp. 3(11–12). T.1. – Soc. Econom. Probl. Pryrodokorystuvann'a ta ecologii. – P.336 – 342.
 7. Pasenko A. V., Kozlovska T. F., Novokhatko O. V., Digtar S. V., Nykyforova O. O. / Основні підходи до математичного моделювання біологічної продуктивності ціаней як сировинної бази біоконверсії // А. В. Пасенко, Т. Ф. Козловська, О. В. Новохатько, С. В. Дігтар, О. О. Никифорова. – Науковий журнал «Екологічна безпека». – Кременчук, 2016. – Вип. 2(22). – С. 118–127.
 8. REN21 глобальний звіт «Стан поновлюваної енергетики 2017» («Renewables 2017 Global Status Report»)
 9. Zarubizhnyi dosvid elektro- ta teplopostachann'a ba osnovi vprovadzhenn'a ecologoeffektivnykh biopalyvnykh technology. // Minenergovugill'a Ukrainy DP «NEK «UKRENERGO» vidokremlenny pidrozdil «Naukovo-proectniy tsentr rozvytku ob'yednanoyi energetychnoyi systemy Ukrainy» Derzhavnogo pidpryemstva «Natsionalna energetychna kompaniya «UKRENERGO» (NPCR OES Ukrainy). – 2017.
 10. Tyurin V. Veterinarno-sanitarnaya otsenka pomyota / V. Tyurin // Ptitsevodstvo. – 2009. – #7 – P. 46.
 11. Sasson A. Biotehnologiya: sversheniya i nadezhdy: per. s angl. / Pod red., s predisl. i dopoln. V.G. Debabova. – Moskva: Mir, 1987. – 411p., il.
 12. Sergienko N. S., Digtar S. V., Ledneva N. J. Perspektyvy otrymannya biopalyva z phitomassy miskantusu gigants'kogo XXII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferenciya «Vidnovlualna energetyka ta ergoefektyvnist' u XXI stolitti», Kiyv, Instytut vidnovlualnoyi energetyky NAN Ukrainy, NTU Ukrainy «Kyivskiy polytehnichnyi instytut imeni Ihor'a Sykors'ko», 20 – 21 travnya 2021, P. 1002 – 1006
 13. Heaton et al. 2010. Miscanthus: A Promising Biomass Crop Section II, p. 86–89.
 14. Christian D. G. and Haase E. (2001). Agronomy of Miscanthus. In Miscanthus for Energy and Fibre, (M. B. Jones and M. Walsh, eds.), pp. 21–45. James & James, London.
 15. Gubachov O. I., Slyvka G. V. Biotestuvann'a. – Kryvyi Rih: Mineral. – 2011. – 192 p.

Надійшла (received) 28.09.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дігтар Сергій Вікторович (Digtar Sergii Viktorovich) – кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри екології та біотехнологій; м. Кременчук; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6872-2865>; e-mail: sergiusvictor@gmail.com.

Пасенко Альона Вікторівна (Pasenko Alyona Victorivna) – кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри екології та біотехнологій; м. Кременчук; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-0408>; e-mail: pasenko2000@ukr.net.

Новохатько Ольга Володимирівна (Novokhatko Olha Volodymyrivna) – кандидат хімічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, завідувач кафедри екології та біотехнологій; м. Кременчук; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0604-3362>; e-mail: olga.novohatko2015@gmail.com.

Мазницька Оксана Вікторівна (Maznytska Oksana Victorivna) – кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри екології та біотехнологій; м. Кременчук; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7550-9061>; e-mail: oksana.maznitskaya68@gmail.com.

Никифорова Олена Олексіївна (Nikiforova Elena Alekseevna, Nykyforova Olena Oleksiyivna) – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, старший викладач кафедри екології та біотехнологій; м. Кременчук; Україна; e-mail: nikiforovaelena777@gmail.com.