

УПРАВЛЕНИЕ ОСАДКОМ МЕТАНОВОГО БРОЖЕНИЯ БИОМАССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГУМУСА

Ю. В. Кляусова¹, А. А. Цыганова², Г. В. Бельская³

¹ К. с.-х. н., доцент Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: yuliya-klaus@mail.ru

² К. с.-х. н., доцент, заведующий кафедрой «Инженерная экология» Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: appa-1981-81@mail.ru

³ К. с.-х. н., доцент, доцент Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: gbelskaja@mail.ru

Реферат

В новых условиях функционирования энергосистемы Республики Беларусь следует переориентировать функционирование биогазовых комплексов на выработку преимущественно тепловой энергии для локальных целей и производство биогумуса – органического удобрения из осадка метанового брожения. С точки зрения производства биогумуса, главная проблема заключается в низком содержании в дигестате сухого вещества (обычно не более 8 %) и, соответственно, воды – до 90–92 %. Основными приемами доработки является обезвоживание и сгущение, что позволяет сократить объемы складирования отходов, улучшить качество окружающей среды, получить дополнительный продукт с добавочной стоимостью, который можно использовать в качестве ценного органического удобрения. Рациональное использование органического осадка является существенным направлением повышения эффективности биогазовых технологий.

Ключевые слова: метановое брожение биомассы, органический осадок, управление, обезвоживание, сгущение, биогумус.

MANAGEMENT OF SLUDGE PRODUCED BY BIOMASS METHANE FERMENTATION TO OBTAIN BIOHUMUS

Y. V. Kliausava, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya

Abstract

In new conditions of the energy system functioning in Republic of Belarus, biogas plants should be reoriented to the production of mainly heat energy for local purposes and production of biohumus – organic fertilizer from methane fermentation sludge. From the point of view of biohumus production, the main problem is the low content of dry matter in digestate (usually not more than 8 %) and, accordingly, water content – up to 90–92 %. The main methods to refine are its dewatering and thickening. The processing of organic sludge allows to reduce the volume of waste storage, improve the quality of environment, obtain an additional product with added value, which can be used as a valuable organic fertilizer. Rational use of organic sludge is a significant area of increasing the efficiency of biogas technologies.

Keywords: methane fermentation of biomass, organic sludge, digestate, management, dewatering, thickening, biohumus.

Введение

Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года (НСУР-30) определяет направление по декарбонизации энергетического сектора за счет использования атомной энергии и возобновляемых источников энергии [1]. Существенным направлением является производство биогаза и его целевое использование, в частности в качестве автомобильного топлива для общественного транспорта и газификации жилищного сектора сельских регионов [2]. Биогаз имеет неоспоримые технологические преимущества, в сравнении с энергией солнца и ветра, а именно, его можно последовательно производить и поэтапно накапливать без существенных потерь.

Развитие альтернативной энергетики происходит с учетом конкретных условий – экономических, экологических, социальных. В Республике Беларусь сложилась необходимость частичной переориентации производственной деятельности биогазовых заводов, в первую очередь, по причине завершения строительства в 2022 году и начала производства атомной энергии на Белорусской АЭС. Поэтому в новых условиях следует переориентировать функционирование биогазовых комплексов на производство преимущественно тепловой энергии для местных нужд (например, тепличных комплексов, отопления производственных помещений), энергетическое обслуживание самих биогазовых установок, а также организовать производство сертифицированного органического удобрения (биогумуса) из осадка метанового брожения [3]. Эту деятельность следует реализовывать на основе отдельных проектов.

Влияние условий метанового брожения на качество дигестата

Биогазовые технологии состоят в сбраживании любых органических субстратов (биомассы) в специальном оборудовании (реакторах) при анаэробных условиях. Сбраживание органического сырья происходит в четыре этапа – гидролиз, ацидогенез, ацетогенез и

метаногенез. Эти стадии протекают одновременно. Консорциум микроорганизмов метанового сбраживания для своего функционирования требует строго определенных условий по температуре, pH, соотношению биогенных элементов в биомассе, содержанию влаги в субстрате. Метанобразующие бактерии предъявляют к условиям своего существования значительно более жесткие требования, чем кислотообразующие. Они нуждаются в строго анаэробных условиях и требуют более длительного времени для воспроизводства. Разложение органики на отдельные компоненты и преобразование их в метан происходит только во влажной среде.

По состоянию на 31.07.2023 г. [4], на территории республики функционирует достаточно развитая инфраструктура из 37 биогазовых комплексов, общая установленная мощность которых составляет 53,682 МВт.

Крупнейшими по мощности установками являются:

- ОАО «Рассвет» им. К.П. Орловского, Могилевская область (мощность 4,8 МВт);
- ЗАО «ТДФ Экотех-Снов», Минская область, Несвижский район, д. Грусково (мощность 2,126 МВт);
- КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод», г. Брест (мощность 3,192 МВт);
- СЗАО «ТелДаФакс Экотех МН», Минская область, полигон ТБО «Тростенецкий» (мощность 2,997 МВт);
- ЗАО «ТелДаФакс Экотех-Северный» Минская область, Минский район, д. Дубовляны (мощность 2,816 МВт).

На биогазовых комплексах используют две основные технологии. Первая состоит в анаэробной переработке органических отходов животноводства (с добавлением других компонентов, в первую очередь зеленой биомассы) в биореакторах с последующим улучшением качества получаемого биогаза. По такой технологии работают 16 биогазовых заводов, общей установленной мощностью 21,219 МВт.

Вторая технология состоит в получении биогаза (свалочного газа) из твердых отходов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), содержащих органическую фракцию, с использованием газопоршневых агрегатов. Такие комплексы размещены на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО), вблизи крупных и средних городов. В настоящее время на территории страны функционирует 21 газопоршневая установка, общей установленной мощностью 31,76 МВт.

Эффективное функционирование биогазовых комплексов на животноводческих фермах определяется следующими зонами: 1. Управление субстратами. 2. Состав сырья, его предварительная обработка. 3. Процесс анаэробной ферментации. 4. Очистка, хранение и использование биогаза. 5. Хранение (размещение) и улучшение органического осадка [5]. Первые четыре зоны в литературе хорошо изучены. Пятой зоне – хранению (размещению) и доработке образующегося после брожения органического осадка – уделяется недостаточно внимания. Однако, технологии получения биогаза в количественном и качественном аспектах совершенствуются. Тенденция производства биогаза остается стабильной благодаря качественным инженерным решениям в рамках стратегии развития «зеленой энергетики».

Сухая и влажная ферментация

Можно констатировать, что дигестат (от англ. digestate – «ферментированный осадок») – это стабилизированный материал, содержащий неразложившиеся в процессе сбраживания биомассы органические вещества (в том числе целлюлозные волокна), некротические микроорганизмы и водную фракцию. С точки зрения производства биогаза, главная проблема заключается в больших объемах дигестата, из-за высокого содержания воды – до 90–92 %. Соответственно, содержание сухого вещества низкое, обычно не превышает 8 %. Это создает серьезные трудности в доработке и использовании этого ресурса.

Анаэробные процессы в биореакторах происходят двумя путями, которые определяются содержанием твердого вещества и воды в исходной биомассе. Эти процессы называются сухой и влажной ферментацией. Сухая ферментация требует меньших энергетических и материальных затрат (на транспортировку органической массы и нагрев жидкой фракции), однако микробиологический процесс в этих условиях протекает нестабильно, что приводит к неравномерному образованию биогаза и возможной остановке микробиологического процесса. Влажное сбраживание (с добавлением воды в бродящую биомассу) требует дополнительных затрат на транспортировку и нагрев воды, что сопровождается неизбежными потерями тепла и достаточно высоким потреблением электроэнергии. Несмотря на то, что метод сухого сбраживания дешевле, процесс влажного брожения используют чаще, так как производство биогаза стабильно и гарантировано.

Количество добавляемой в бродящую массу воды зависит от исходной влажности субстратов. Для жидкого (мокрого) метода лучше, чтобы содержание сухого вещества было 5–15 %. Если содержание сухого вещества меньше 5 %, то процессы брожения тоже происходят, но возникает «бесполезный» объем воды, что существенно снижает рентабельность технологических процессов и приводит к высоким объемам образования дигестата. С другой стороны, содержание 15 % сухого вещества является верхней границей (лимитирующим фактором), при которой субстрат еще можно перекачивать насосом, перемешивать либо смешивать [6] в реакторах. Примерами использования технологии влажной ферментации биомассы является производственная деятельность биогазовых комплексов ОАО «Рассвет» им. К. П. Орловского Могилёвской области, ЗАО «ТДФ Экотех-Снов» Минской области.

В некоторых конфигурациях биогазовых установок получают дигестат с меньшим содержанием воды. При этом, жидкую фазу выжимают из водного остатка ферментации и используют для первоначального разминания субстрата, то есть получают частично замкнутый технологический цикл. Твердая фаза отделенного дигестата больше подходит для транспортировки, что расширяет возможности его применения. Сухой метод (без добавления воды) считается на сыпучие материалы с содержанием сухого вещества свыше 25 %. Содержание сухого вещества в субстрате от 40 до 60 % делает его пригодным только к компостированию.

Технологии сухой ферментации используют в газопоршневых агрегатах на полигонах ТКО, где получают твердый дигестат, но неопределенного состава. Примерами использования таких технологий является производственная деятельность КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод», полигон ТБО «Тростенецкий» Минский район, полигон ТБО «Северный» Минский район и некоторые другие. Биологическая переработка органических отходов на полигонах позволяет уменьшить объемы их складирования и захоронения, получить свалочный газ и производить из него электрическую энергию для нужд ЖКХ. С точки зрения использования полученного дигестата для производства удобрений, эти технологии представляются неперспективными вследствие неконтролируемого состава и высокой загрязненности целым рядом токсикантов, содержащихся в отходах ЖКХ.

Характеристика сырья

Состав получаемого в биореакторах дигестата напрямую зависит от исходных характеристик сырья – его элементного и химического состава. При выборе субстратов учитывают, что только из сухой органической массы можно произвести метан. Выход метана и состав осадка можно оценить по степени разлагаемости органического субстрата, то есть доле субстрата, которая преобразуется в биогаз. Чем более доступный для разложения (усвоения) органический материал, тем выше выход биогаза из системы и более доступный для питания растений органический осадок.

В органических субстратах, происходящих в результате производственной деятельности агропромышленного комплекса и предприятий пищевой промышленности, могут содержаться токсичные вещества – остаточные количества пестицидов, удобрений, антибиотиков, гормональных средств [7]. Поэтому необходимо проводить соответствующие (регулярные) анализы химического состава используемых субстратов с целью получения экологически чистого гумуса. Оптимизацию состава используемых субстратов также следует проводить с учетом возможного содержания загрязнений типа песка, минеральной фракции, аммиака и других компонентов. По нашему мнению, требования к характеристикам перерабатываемых отходов, определяющие эффективность работы биогазовой установки, должны быть приведены в технологических регламентах и эксплуатационных документах на биогазовые установки конкретного типа.

Состав получаемого дигестата

Состав дигестата делает пригодным его для использования в качестве удобрения, поскольку в ферментере высвобождается до 50 % органического азота в виде поглощаемых растениями ионов аммония NH_4^+ . Приблизительный состав дигестата (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав органического осадка

Показатель	После перебраживания первичной биомассы	После перебраживания вторичной биомассы
Сухое вещество, %	7,0	6,1
pH	8,3	8,5
Органическое вещество, кг/т	51,0	42,0
Азот общий, кг/т	4,7	4,8
Аммоний, кг/т	2,7	2,9
Фосфор, кг/т	1,8	1,8
Калий, кг/т	5,0	3,9

Большая часть твердого дигестата представляет собой связанный азот в нестабильной форме, который доступен для питания растений. С другой стороны, твердый дигестат содержит большое количество относительно стабилизированного непереброженного органического материала (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина), поскольку быстро разлагаемые органические вещества преобразуются в биогаз. Кроме азота, органический осадок содержит значительное количество фосфора, калия, серы и некоторых микроэлементов. Питательный состав дигестата незначительно варьирует в зависимости от используемых для брожения субстратов.

Как видно из приведенных данных, дигестат, полученный из первичной и вторичной биомассы, имеет достаточно схожие показатели по содержанию сухого вещества, pH, объему органической фракции, содержанию азота, в том числе аммонийного, фосфора и калия [8]. Поскольку из субстрата уходит лишь небольшое количество аммиака, большая часть азота остается в дигестате. Процессы разложения уменьшают количество связанного азота в органическом веществе, в то время как количество аммиака, который присутствует в дигестате в виде аммония нитрата NH_4NO_3 , увеличивается с 45 % до 76 %. Поскольку значение pH во время ферментации смещается от нейтрального к слегка щелочному (pH от 8,0 до 8,5), равновесие также смещается от легкорастворимого аммония NH_4^+ к аммиаку NH_3 . Поэтому, при хранении и применении дигестата, существует достаточно высокий риск выделения аммиака в атмосферу. Положительно в этом процессе то, что в аммонийной форме азот доступен для питания растений. Однако, если потребности возделываемых растений низкие, то происходит процесс денитрификации и аммиак уходит в атмосферу. Это вещество является парниковым газом, который ускоряет процесс глобального потепления климата.

Содержание доступного для растений фосфора в дигестате составляет от 1,8 до 3,5 кг/т, причем его содержание достаточно стабильно для двух основных типов сырья. Другие макро- и микроэлементы – калий, магний, кальций также остаются в дигестате. Особо следует отметить содержание серы. В зависимости от метода, используемого для удаления следов сероводорода из биогаза, большая часть серы также может быть возвращена в дигестат.

Установлено, что внесение дигестата в почву улучшает ее структуру и функционирование вследствие повышения микробиологической активности на период до трех месяцев. Положительно оценивается низкая влажность дигестата в сравнении, например с жидким навозом, что приводит к быстрому его проникновению в почву и эффективному повышению плодородия. В качестве удобрения в растениеводстве остатки ферментации могут в значительной степени заменить основное внесение и внекорневые подкормки, в зависимости от возделываемой культуры. Отмечен высокий эффект с точки зрения доступности азота – обычно намного превышающий 70 % от количества внесенных минеральных удобрений [9]. Все перечисленные данные подтверждают ценность использования дигестата для производства органических удобрений.

Методы управления органическим осадком

Образовавшийся в реакторе дигестат закачивают в специальные лагуны (при больших объемах образования), либо собирают в контейнеры для хранения. Инновационные методы управления дигестатом предполагают использование газонепроницаемой крышки для его хранения, чтобы избежать выбросов метана и аммиака, обладающих высоким парниковым эффектом. Жидкий дигестат распределяют в резервуары для жидкого навоза, а твердый дигестат можно вносить на сельскохозяйственные угодья с помощью разбрасывателей навоза. Иногда остатки ферментации рекомендуется вносить на площади для выращивания кормов для сельскохозяйственных животных. Этот возврат обеспечивает частично замкнутый цикл биогенных элементов [10, 11], что соответствует принципам «зеленой экономики».

Некоторые авторы рекомендуют высушивать дигестат перед внесением в почву, с использованием тепловой энергии от конверсии биогаза. Эта технология позволяет транспортировать высушенный дигестат на достаточно большие расстояния, что значительно расширяет сферу его применения.

Поэтому одним из направлений улучшения дигестата является его первичное обезвоживание и сгущение. Методы, применяемые для этих процессов, следующие:

- 1) использование гравитационных и/или центробежных сил;
- 2) использование давления.

После обезвоживания можно получить твердую фракцию дигестата с содержанием твердых частиц 18 % и выше. Для этих целей используют ленточные прессы или центрифуги, также процесс можно интенсифицировать за счет добавления полимера. Отделенная твердая фаза содержит, в основном, клетчатку, состоящую из неразложившихся целлюлозных волокон. Суспензия дигестата или твердый дигестат, полученный в результате «сухого» анаэробного сбраживания с высоким содержанием твердых веществ, часто содержит от 18 % до 25 %, а некоторые технологии позволяют получать еще более сухой дигестат.

Следующая схема (рисунок 1) содержит теоретически возможные методы доработки и использования твердой фракции дигестата [12].

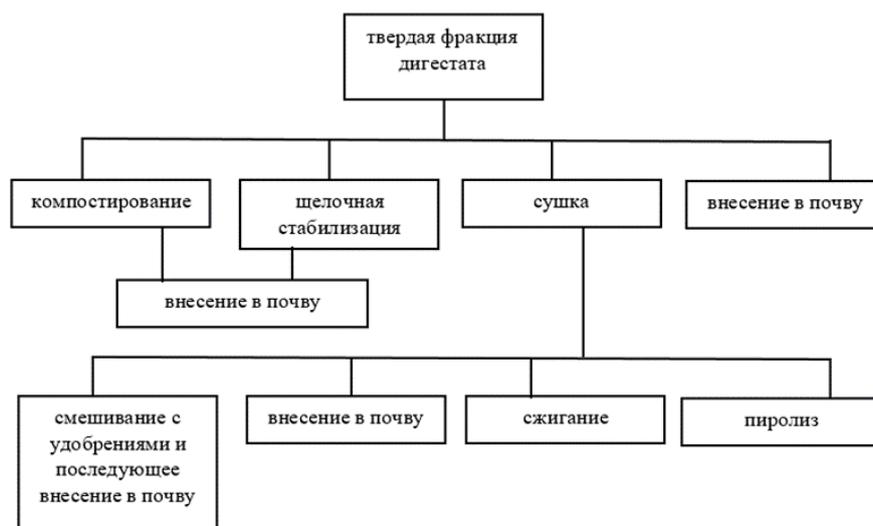


Рисунок 1 – Методы использования твердой фракции дигестата

Методы доработки включают в себя компостирование целлюлозного волокна и стабилизацию его известью. Это приводит к гибели патогенных микроорганизмов и одновременно к повышению pH (подщелачиванию), которое почти всегда сопровождается дополнительным выделением аммиака, что может быть проблемой для рас-

тениеводства. Наиболее часто используемым вариантом является непосредственное внесение целлюлозных волокон в почву, без известкования.

В Республике Беларусь начато производство твердых органических удобрений из осадка метанового брожения. Положительные

результаты достигнуты в хозяйствах ОАО «Рассвет» им. К. П. Орловского Могилевской области и ЗАО «ТДФ Экотех-Снов» Минской области. На этих предприятиях производят для реализации экологически чистые твердые удобрения (биогумус) типа "Экоплант" 20.15.80.000, с содержанием твердой фракции до 20 %. Производимый биогумус не содержит нитратов, семян сорной растительности, отсутствует патогенная микрофлора, без специфических запахов. Потенциал увеличения урожайности при использовании биогумуса составляет порядка 40–50 %.

Наконец, можно также высушивать неразложившуюся клетчатку и обогащать ее питательными элементами для внесения в почву. Этот прием эффективно улучшает аэрацию почв и повышает ее плодородие. Эффективный доступ воздуха к корням улучшает водно-воздушный баланс и приводит к повышению урожайности растений.

Поскольку органический осадок может содержать определенное количество трудно-разлагаемых углеводов, он может представлять интерес в производстве композитного топлива после сушки. Высушенное целлюлозное волокно дигестата может быть использовано в качестве топлива для сжигания или производства топлива, методами пиролиза и газификации. Однако высокое содержание в них соединений серы и азота приводят к относительно быстрому накоплению шлаков, которые вызывают коррозию металлических поверхностей оборудования. Кроме того, процесс сжигания неочищенного композитного топлива сопровождается высокими выбросами сернистых и азотистых соединений.

Жидкая фракция называется щелоком дигестата. На схеме (рисунок 2) представлены возможные варианты доработки и использования жидкой фракции дигестата [12].

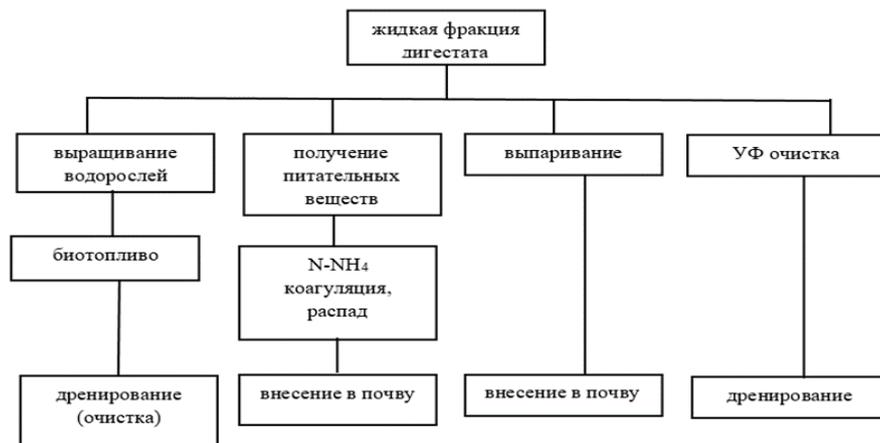


Рисунок 2 – Способы управления жидкой фракцией дигестата

Жидкая фракция может быть использована для выращивания водорослей и других энергетических растений, в качестве эффективного субстрата для производства биотоплива, в соответствии с разработанными технологиями. Щелок содержит ценные питательные элементы. В частности, аммонийный азот можно вносить непосредственно в почву, но другой теоретической возможностью является его осаждение.

Выпаривание всего дигестата может быть осуществлено с помощью оборудования, работающего по принципу теплообменника с мокрой поверхностью. После выпаривания материал можно повторно смешивать с непереваренной клетчаткой и использовать в качестве удобрения. Эта система широко используется в европейских странах. Она уменьшает объем дигестатной воды до 15 % от первоначального объема, в то время как отработанное тепло поступает от когенерационной установки. В литературе обсуждаются методы очистки дигестатной жидкой фракции с использованием ультрафильтрации и обратного осмоса. Авторы считают нецелесообразным использование этих инновационных методов очистки по причине высокой стоимости и быстрого загрязнения мембранных фильтров.

Заключение

В новых условиях функционирования энергосистемы Республики Беларусь следует переориентировать производственную деятельность биогазовых комплексов преимущественно на выработку тепловой энергии и производство высококачественного биогумуса.

В настоящее время биогаз в республике производят по двум основным технологиям. Первая состоит в анаэробной переработке органических отходов животноводства (с добавлением других компонентов) в биореакторах. Технология влажной ферментации позволяет получить осадок контролируемого состава, который требует специальной доработки – обезвоживания и сгущения. Такая система доработки позволяет получать биогумус с содержанием твердой фракции до 20 % и оптимальным составом биогенных элементов.

Биогумус лишен семян сорной растительности и патогенных микроорганизмов.

Вторая технология состоит в получении биогаза (свалочного газа) из твердых отходов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), содержащих органическую фракцию. Сухая ферментация состоит в получении свалочного газа с использованием газопоршневых агрегатов. В процессе сухой ферментации получают твердый дигестат, но неопределенного состава. С точки зрения использования получаемого дигестата для производства биогумуса, эта технология представляется неперспективной вследствие непостоянного состава и высокой загрязненности исходных субстратов целым рядом токсиантов, содержащихся в отходах ЖКХ. Возможно содержание патогенных микроорганизмов.

Высококачественный биогумус является дополнительным ценным продуктом с добавочной стоимостью, который позволяет повысить эффективность биогазовых технологий, повышать плодородие почв, улучшать состояние окружающей среды. Переориентацию производственной деятельности биогазовых заводов следует осуществлять только в рамках отдельных проектов.

Список цитированных источников

1. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2030 года / Нац. комис. по устойчивому развитию Респ. Беларусь ; редкол.: Л. М. Александрович [и др.]. – Минск : Юнипак, 2017. – 149 с.
2. Национальный доклад Республики Беларусь об осуществлении повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года / Совет Республики Национального собрания Республики Беларусь. – Минск : 2017. – 40 с.
3. Бельская, Г. В. Биогазовые технологии для успешной работы установок / Г. В. Бельская, Н. Г. Малькевич // XXII МНПК «Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов» : тез. док. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 124–125.

4. Реестр выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии на 31.07.2023 г. : утв. М-вом природы Респ. Беларусь по состоянию на 31.07.2023 г. – Минск : Государственный кадастр возобновляемых источников энергии Минприроды Республики Беларусь, 2023. – 81 с.
5. Величко, В. В. Проблемы использования биогазовых технологий / В. В. Величко, С. П. Кундас // Сахаровские чтения 2015 года : экологические проблемы XXI века : материалы 16-й Междунар. науч. конф., Минск, 19–20 мая 2016 г. / МГЭУ им. А. Д. Сахарова ; редкол.: С. А. Маскевича, (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 266.
6. Сайганов, А. С. Инновационное развитие АПК / А. С. Сайганов, В. В. Чабаткуль // 25 лет созидания и свершений, Минск, 2020 г. : в 7 т. / Агрпромышленный комплекс. Архитектура и градостроительство. Беларусь на мировой арене; редкол.: В. П. Андрейченко. – Минск, 2020. – Т. 4. – С. 133–144.
7. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge / L. Appels [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2008. – № 34 (6). – S. 75–78.
8. Kliausava, Y. V. Using of organic sludge to improve the efficiency of biogas technologies / Y. V. Kliausava, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya // Vestnik of Brest State Technical University. – № 3 (132). – 2023. – S. 75–77.
9. Дигестат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://deru.abcdef.wiki/wiki/Gärrest>. – Дата доступа: 20.04.2023.
10. Интерактивная карта Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь «Установки по использованию ВИЭ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://195.50.7.239/Cadastre/Map/>. – Дата доступа: 10.05.2023.
11. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов – общие технические требования к биогазовым установкам. Издание официальное = Нетрадыцыйныя тэхналогіі. Энергетыка біяадходаў-Агульныя тэхнічныя патрабаванні да біягазавых устаноў. Выданне афіцыйнае : ГОСТ РФ 53790. – Москва : ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ», Лаборатория возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 2019. – 5 с. – (Стандартинформ).
12. Heviánková, S. Study and Research of the Cleaning Procedures of Anaerobic Digestion Products / S. Heviánková, M. Kyncl, J. Kodymová. – Czech Republic : Geo-Science Engineering, 2014. – S. 39–50.
3. Bel'skaya, G. V. Biogazovye tekhnologii dlya uspeшной raboty ustanovok / G. V. Bel'skaya, N. G. Mal'kevich // XXII MNPК «Modernizaciya hozyajstvennogo mekhanizma skvoz' prizmu ekonomicheskikh, pravovykh, social'nykh i inzhenernykh podhodov» : tez. dok. – Minsk : BNTU, 2023. – S. 124–125.
4. Reestr vydannykh sertifikatov o podtverzhenii proiskhozhdeniya energii na 31.07.2023 g. : utv. M-vom prirody Resp. Belarus' po sostoyaniyu na 31.07.2023 g. – Minsk : Gosudarstvennyj kadastr vozobnovlyaemykh istochnikov energii Minprirody Respubliki Belarus', 2023. – 81 s.
5. Velichko, V. V. Problemy ispol'zovaniya biogazovykh tekhnologii / V. V. Velichko, S. P. Kundas // Saharovskie chteniya 2015 goda : ekologicheskie problemy XXI veka : materialy 16-j Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 19–20 maya 2016 g. / MGEU im. A. D. Saharova ; redkol.: S. A. Maskevicha, (gl. red.) [i dr.]. – Minsk, 2016. – S. 266.
6. Sajganov, A. S. Innovacionnoe razvitie APK / A. S. Sajganov, V. V. CHabatul' // 25 let sozdaniya i svershenij, Minsk, 2020 g. : v 7 t. / Agropromyshlennyj kompleks. Arhitektura i gradostroitel'stvo. Belarus' na mirovoj arene; redkol.: V. P. Andrejchenko. – Minsk, 2020. – T. 4. – S. 133–144.
7. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge / L. Appels [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2008. – № 34 (6). – S. 75–78.
8. Kliausava, Y. V. Using of organic sludge to improve the efficiency of biogas technologies / Y. V. Kliausava, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya // Vestnik of Brest State Technical University. – № 3 (132). – 2023. – S. 75–77.
9. Digestat [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://deru.abcdef.wiki/wiki/Gärrest>. – Data dostupa: 20.04.2023.
10. Interaktivnaya karta Ministerstva prirodnykh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus' «Ustanovki po ispol'zovaniyu VIE» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://195.50.7.239/Cadastre/Map/>. – Data dostupa: 10.05.2023.
11. Netradicionnye tekhnologii. Energetika biootvodov – obshchie tekhnicheskie trebovaniya k biogazovym ustanovkam. Izdanie oficial'noe = Netradycyjnyya tekhnologii. Energetyka biyaadhodaў-Agul'nyya tekhnichnyya patrabavanni da biyagazavykh ustanovak. Vydanne aficyjnae : GOST RF 53790. – Moskva : FGUP «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij centr standartizacii, informacii i sertifikacii syr'ya, materialov i veshchestv», Laboratoriya vozobnovlyaemykh istochnikov energii geograficheskogo fakul'teta MGU im. M. V. Lomonosova, 2019. – 5 s. – (Standartinform).
12. Heviánková, S. Study and Research of the Cleaning Procedures of Anaerobic Digestion Products / S. Heviánková, M. Kyncl, J. Kodymová. – Czech Republic : Geo-Science Engineering, 2014. – S. 39–50.

References

1. Nacional'naya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period 2030 goda / Nac. komis. po ustojchivomu razvitiyu Resp. Belarus' ; redkol.: L. M. Aleksandrovich [i dr.]. – Minsk : YUnipak, 2017. – 149 s.
2. Nacional'nyj doklad Respubliki Belarus' ob osushchestvenii povestki dnya v oblasti ustojchivogo razvitiya na period do 2030 goda / Sovet Respubliki Nacional'nogo sobraniya Respubliki Belarus'. – Minsk : 2017. – 40 s.

Материал поступил 02.02.2024, одобрен 13.02.2024, принят к публикации 13.02.2024