

В.В. Величко |

С.П. Кундас,
д.т.н., проф.

Белорусский национальный
технический университет

Н.Ф. Капустин,
к.т.н.

Научно-практический центр Национальной академии наук
Беларуси по механизации сельского хозяйства

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



Аннотация

Рассмотрены текущее состояние и перспективы развития биогazовых технологий. Проанализированы основные проблемы, возникающие при проектировании и эксплуатации биогazовых установок, представлены возможные методы их решения, обеспечивающие повышение энергоэффективности практического использования данных установок.

Abstract

Current state and prospects of development of biogas technologies are considered. The main problems arising in the designing and operation of biogas plants are analyzed, the methods of solving these problems and ways to increase the energy efficiency of these plants are described.

Введение

В настоящее время биогazовые технологии являются одним из перспективных направлений возобновляемой энергетики, обеспечивающих решение как энергетических, так и экологических задач. Биогaz образуется в анаэробных условиях путем разложения органического вещества – субстрата – рядом микроорганизмов и представляет собой смесь метана (50–75%) и углекислого газа (25–50%), а также незначительного количества аммиака, водорода, сероводорода и некоторых других веществ в зависимости

от исходного биосырья (субстрата) и технологии получения биогaza [1].

Использование биогazовых установок связано со следующими положительными факторами [2]:

- Биогaz может использоваться в качестве топлива для работы блочной ТЭЦ.
- Полученное тепло используется для нужд самой биогazовой установки, а также в системах теплоснабжения.
- Переработанный субстрат является ценным удобрением, богатым азотом, фосфором, калием и питательными микроэлементами.

• Биогazовые установки могут играть роль очистительных сооружений на фермах, фабриках и заводах, имеющих органические отходы, что улучшает санитарно-гигиенические аспекты.

• Производство биогaza позволяет предотвратить выбросы метана в атмосферу.

• Биогaz после предварительной обработки может применяться в качестве топлива для автомобилей, работающих на газе.

Следует отметить, что практическая реализация биогazовых технологий связана с

решением многих задач как химико-биологического, так и технического профиля, а также вопросов логистики поставок биосырья, использования получаемой энергии. Поэтому от знания существующих проблем и возможных путей их решения во многом зависит эффективность использования биогазовых технологий.

Состояние и развитие биогазовых технологий в мире

Биогазовые технологии уже получили широкое распространение в Европе, США, Китае, Бразилии и некоторых других странах. По данным Европейской биогазовой ассоциации, на начало 2016 года в Европейском союзе насчитывалось 17376 биогазовых установок (рис. 1). Было подсчитано, что за год они производят количество биогаза, за счет которого можно выработать 60,6 ТВт·ч электроэнергии, что достаточно для обеспечения электроэнергией 14 миллионов домашних хозяйств [3].

Согласно исследованиям, проведенным Pike Reseach, мировое производство биогаза к 2022 году составит 407 ТВт·ч в пересчете на тепловую энергию (рис. 2) [4].

Развитие биогазовых технологий в Республике Беларусь

Согласно данным Департамента по энергоэффективности государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, в стране функционирует 18 биогазовых установок общей установленной электрической мощностью более 26 МВт (таблица 1). Как видно из таблицы 1, большинство установок имеют электрическую мощность до 2 МВт, что позволяет более успешно решать задачи их эффективного использования, в частности, обеспечения биосырьем, в качестве которого в основном используются отходы животноводства. Шесть установок работают на свалочном газе.

Особенности и проблемы в использовании биогазовых установок

Для максимально эффективного использования биогазовых установок нужно решить целый ряд проблем различного характера.

1. Биогазовые установки требуют бесперебойной поставки биосырья (субстрата), поэтому уже на первой стадии проектирования следует провести анализ возможностей круглогодичной поставки субстрата. Если затраты на транспортировку сырья будут слишком высокими, то рентабельность биогазовой установки значительно снизится. Наиболее оптимальным является размещение биогазовой установки в непосредственной близости от источника производимого субстрата (например, на животноводческих комплексах, свалках ТБО и т.д.).

Рис. 1. Количество биогазовых установок в странах ЕС

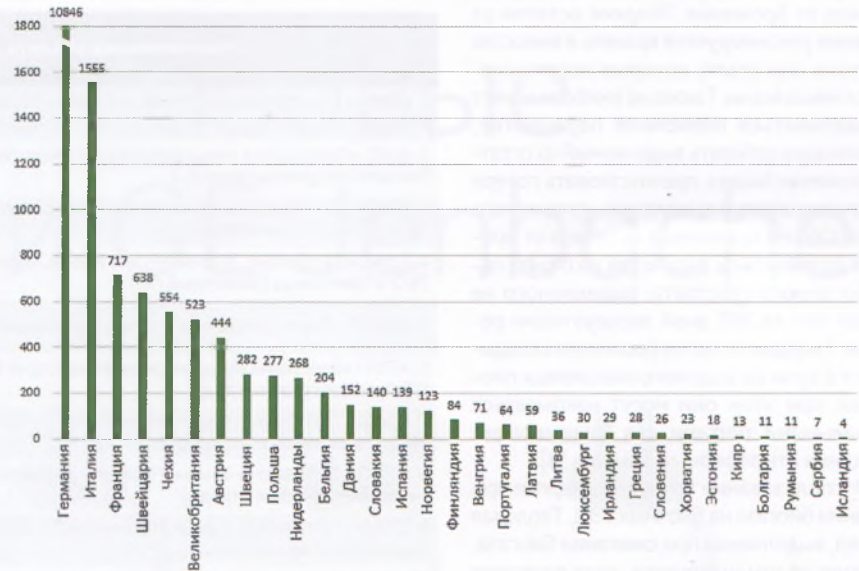
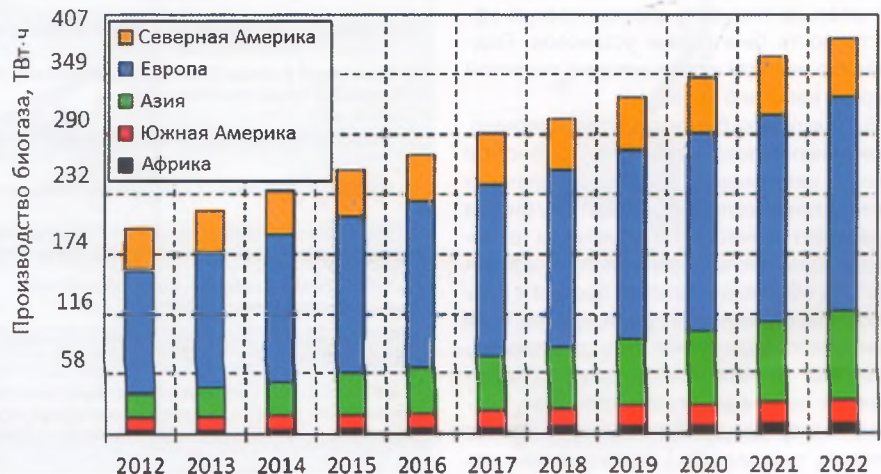


Рис. 2. Прогноз развития биогазовой отрасли в мире



2. Бактерии, участвующие в процессе ферментации и производства биогаза, требуют определенных условий жизнедеятельности, в противном случае процесс производства биогаза может замедлиться или вовсе прекратиться. Для большинства метанообразующих бактерий оптимальной является температура окружающей среды от 37 до 42°C [5]. Показатель кислотности должен лежать в диапазоне от 6,5 до 8 [6]. Различные микроорганизмы нуждаются в определенных питательных веществах, микроэлементах и витаминах. Наличие и доступность данных компонентов оказывают большое влияние на рост популяции бактерий. Наиболее важными питательными веществами являются углерод С, азот N, фосфор P и сера S. На практике соотношение С:N:P:S в реакторе составляет 600:20:5:3 [7]. Также некоторые вредные вещества, называемые ингибиторами, мешают жизнедеятельности микроорганизмов и негативно сказываются на производстве биогаза (таблица 2) [7].

3. Выбор оптимального оборудования и размера реактора. Реактор должен проектироваться таким образом, чтобы он был способен вместить необходимое количество субстрата. При этом в ходе постоянной замены содержимого реактора не должно вымываться больше микроорганизмов, чем может дорасти за это время [1]. В зависимости от используемого субстрата реактор может снабжаться следующим оборудованием: мельницами и шредерами для измельчения субстрата, насосами и загрузчиками для подачи субстрата в реактор, емкостью для гигиенизации, различными видами мешалок для перемешивания субстрата в реакторе, системами удаления перебродившего субстрата и осадка, газгольдерами для хранения полученного биогаза и т.д. Все указанное оборудование должно потреблять минимальное количество электрической энергии, быть износостойким, простым в обслуживании и эксплуатации. Также реактор должен обладать хорошей теплоизоляцией для минимизации тепловых потерь. ▶

4. Проблемы, связанные с хранением остатков от брожения. Жидкие остатки от брожения рекомендуется хранить в емкостях из бетона или стали, которые могут оснащаться мешалками. Также на емкости может устанавливаться пленочное перекрытие, позволяющее собирать выделяемый из остатков брожения биогаз, препятствовать потере аммиачного азота и выделению неприятного запаха. Объем хранилища остатков от брожения должен быть рассчитан на объем переработанного субстрата, выделяемого не меньше чем за 180 дней эксплуатации реактора. Твердые остатки брожения складировуются в кучи на водонепроницаемых площадках, при этом они могут накрываться специальными тентами для минимизации попадания атмосферных осадков [8].

5. Использование тепловой энергии при сжигании биогаза на блочных ТЭЦ. Тепловая энергия, выделяемая при сжигании биогаза, зачастую не утилизируется, хотя полезное использование этой энергии позволило бы значительно повысить экономическую эффективность биогазовых установок. Подробнее о методах использования тепловой энергии написано ниже.

6. Подготовка биогаза к использованию. Прямое использование полученного биогаза обычно невозможно в связи с наличием в нем различных примесей, поэтому биогаз подвергается очистке по различным технологиям. Для использования биогаза на блочных ТЭЦ обычно достаточно провести процессы обессеривания и сушки, однако, если планируется подача биогаза в сети природного газа, то выполняется еще ряд мероприятий: сепарация углекислого газа, удаление кислорода, удаление остаточных газов (бензола, толуола и др.), одорирование, изменение калорийности и создание избыточного давления.

Способы повышения эффективности работы биогазовых установок

Подбор оптимального состава субстрата. На стадии проектирования биогазовой установки должен быть подобран оптимальный состав смеси субстратов, благодаря которому достигается максимальная и бесперебойная выработка биогаза. Так, например, использование только растительного субстрата проблематично ввиду нехватки в субстрате необходимых микроэлементов. Животноводческие отходы в свою очередь содержат нужные для метанообразующих бактерий микроэлементы и питательные вещества, однако при их разложении выделяется большое количество аммиака, который оказывает ингибирующее воздействие на микроорганизмы. Поэтому очень важно определить наиболее оптимальный состав субстратов

Таблица 1. Биогазовые установки, функционирующие на территории Республики Беларусь

Наименование объекта	Год запуска установки	Эл. мощность, МВт
1. ОАО «СГЦ «Западный», Брестский район (животноводческие отходы)	2008	0,54
2. ОАО «Гомельская птицефабрика», Гомельский район (животноводческие отходы)	2009	0,33
3. КСУП «Племптице завод «Белорусский», г.Заславль (животноводческие отходы)	2008	0,33
4. СЗАО «ТелДаФакс Экотех МН», г. Минск, полигон ТКО «Тростенец» (свалочный газ)	2011, 2015	0,97+1,063+1,413
5. ИООО «Вирео Энерджи», г. Орша (свалочный газ)	2012	0,171
6. КПУП «Брестский мусороперерабатывающий завод», г. Брест (ТБО, осадки сточных вод)	2010, 2011	2,1+1,05
7. СЗАО «ТДФ Экотех-Снов», Несвижский район (животноводческие отходы)	2012	2
8. СЗАО «ТДФ Экотех-Снов», Несвижский район (животноводческие отходы)	2016	0,835
9. СЗАО «ТДФ Экотех-Лань», Несвижский район (животноводческие отходы)	2012	1,4
10. СПК «Рассвет» им. К.П. Орловского, Кировский район (животноводческие отходы)	2012	4,8
11. ИООО «Вирео Энерджи», г. Витебск (свалочный газ)	2013	1,163
12. Вилейский филиал ОАО «Молодечненский молочный комбинат», г. Вилейка (отходы производства)	2013	0,32
13. ИООО «Вирео Энерджи», г. Гомель (свалочный газ)	2013	1,063
14. СЗАО «ТДФ Экотех – Северный», г. Минск (свалочный газ)	2013, 2014, 2016	2,8+1,4+1,4
15. Филиал агрофирма «Лебедево» РУП «Минскэнерго», Молодечненский район (животноводческие отходы)	2013	0,5
16. ОАО «Беларуськалий», Солигорский район (животноводческие отходы)	2014	0,34
17. ИООО «Вирео Энерджи», Витебский район, г. Новополоцк (свалочный газ)	2015	0,635
18. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», Пуховичский район, «Зазерье» (животноводческие отходы)	2016	0,25
Суммарная электрическая мощность		26,8

Таблица 2. Вредная концентрация различных ингибиторов

Ингибитор	Вредная концентрация
Кислород	> 0,1 мг/л
Сероводород	> 50 мг/л
Летучие жирные кислоты	> 2000 мг/л при pH = 7
Аммонийный азот	> 3500 мг/л при pH = 7
Тяжелые металлы (только в растворенной форме)	Cu > 50 мг/л Zn > 150 мг/л Cr > 100 мг/л
Антибиотики	Ингибирующее воздействие зависит от типа антибиотика

исходя из типа местных ресурсов, что чаще всего осуществляется в лабораторных условиях. Также в некоторых случаях может быть целесообразным добавление незначительного количества вспомогательных субстратов (ферментов); таким ферментом, например, является глицерин.

Предварительная обработка субстрата. Предварительная обработка субстрата поз-

воляет увеличить площадь контактной поверхности между субстратом и микроорганизмами, разрушить кристаллическую структуру субстрата и в некоторых случаях препятствует образованию пены и плавающей корки [9]. За счет предварительной обработки можно значительно (на 20–30%) увеличить удельный выход биогаза и повысить скорость разложения суб-

страта [9]. Характеристика наиболее распространенных методов предварительной обработки приведена ниже.

Механическая обработка. Этот самый простой вид обработки осуществляется при помощи различных дробилок и shredders, которые измельчают субстрат, что увеличивает контактную поверхность для бактерий, образующих биогаз. При этом выход биогаза увеличивается на 15–25% [10], значительно сокращается время ферментации. Основным недостатком механической обработки является большое количество электрической энергии, потребляемой для привода дробилок.

Химическая обработка. Данный тип обработки позволяет разрушить связи между целлюлозой и гемицеллюлозой, растворять лигнин, связывающий волокна растительных субстратов, и т.д. Обычно для этого

используются растворы кислот различной концентрации, щелочи и оксиды. Химическая обработка увеличивает выход биогаза до 20% [9]. Недостатком химической обработки является высокая стоимость кислот и щелочей.

Биологическая обработка. Основными этапами образования биогаза являются гидролиз и кислотогенез. При этом гидролитические и кислотообразующие бактерии требуют различных условий окружающей среды. Если эти этапы отделить друг от друга и проводить их в отдельных реакторах, то можно добиться увеличения выхода биогаза на 21% [11]. Однако это приведет к увеличению стоимости оборудования. Также к биологической обработке относится добавление в реактор специальных грибков и энзим бактерий, которые увеличивают скорость разложения субстрата.

Термическая обработка. Осуществляется нагрев субстрата до температуры 125–190°C при давлении от 20 до 30 атмосфер [9]. В таких условиях субстрат удерживается некоторое время (обычно до одного часа). При этом нарушается клеточная целостность субстрата, что позволяет увеличить выход биогаза на 20–30% [9]. Недостатком этого вида обработки является большое потребление энергии для нагрева субстрата до высоких температур.

Комбинированная обработка. Представляет собой комбинацию из некоторых вышеописанных типов обработок. Например, растительный субстрат может измельчаться (механическая обработка),

затем подвергаться воздействию раствора кислоты (химическая обработка) и помещаться в автоклав (термическая обработка).

Также существуют некоторые технологии предварительной обработки, которые используются для субстратов не растительного типа. Например, отходы жизнедеятельности животных и птичий помет широко используются для производства биогаза, но иногда не соответствуют санитарным нормам. В таком случае их предварительно стерилизуют или гигиенизируют. Отходы сточных вод могут обрабатываться ультразвуком.

Обработка сырья в высоковольтном электрическом поле. Данный тип обработки осуществляется за счет использования коротких импульсов электрического поля напряжением свыше 10 кВ. При этом достигаются следующие эффекты [12, 13]:

- нарушается целостность клеточной мембраны, и разрушаются до более простых форм органические соединения;
- увеличивается количество растворимого органического вещества, тем самым повышается доступность питательных веществ для бактерий, вследствие чего они вырабатывают больше биогаза;

- разрушаются ингибирующие вещества; происходит пастеризация субстрата, при этом не уничтожаются метанообразующие бактерии;

- снижается вязкость субстрата, что в значительной степени экономит электроэнергию на его транспортировку и перемешивание.

Каждый вид предварительной обработки имеет свои достоинства и недостатки. Не существует универсального метода, подходящего для всех субстратов. Необходимо для каждого конкретного субстрата проводить дополнительные исследования. Однако очевидно, что предварительная обработка значительно улучшает выход биогаза и ее использование может быть экономически целесообразно.

Конструктивные особенности. Правильно выбранные и должным образом установленные конструктивные элементы биогазовых установок в значительной степени влияют на эффективную выработку биогаза.

Биогазовая установка состоит из устройств для подачи субстрата (насосы, шнеки, поршни и т.д.), емкостей для брожения субстрата (реакторы), перемешивающих устройств и систем удаления переродившего субстрата. В некоторых случаях может использоваться дополнительное оборудование.

Насосы, используемые для перекачки жидкого субстрата, должны снабжаться заслонками, изолирующими их от трубопровода; также необходимо обеспечить к ним свободный доступ. Это позволит выполнять работы по техобслуживанию без прерывания работы биогазовой установки. Мощность, тип и характеристики насоса выбираются в зависимости от используемых субстратов и их объема.

Твердый субстрат подается в реактор при помощи нагнетающего поршня или шнека, при этом подача должна осуществляться ниже уровня жидкости в реакторе, что предотвращает утечку биогаза. Емкость для брожения может быть выполнена из нержавеющей стали или железобетона, при этом она должна быть герметичной и соответствовать всем необходимым стандартам. Для поддержания постоянной температуры в реакторе устанавливаются встроенные отопительные элементы либо наружные теплообменники. При этом реактор, как уже упоминалось выше, должен быть обеспечен должной теплоизоляцией.

Чтобы улучшить доступ бактерий к субстрату и обеспечить его равномерную ферментацию, субстрат необходимо постоянно перемешивать. Для этого используют различные виды механических мешалок. Использование мешалок позволяет увеличить скорость разложения субстрата, что ведет к более совершенной работе биогазовой установки. Более того, перемешивание субстрата позволяет избежать образования так называемой плавающей корки.

Также в некоторых случаях применяют гидравлическое либо пневматическое перемешивание. Преимущества таких систем заключается в том, что необходимые для перемешивания насосы и компрессоры расположены за пределами реактора, и вследствие этого их износ уменьшается [8]. Данные технологии годятся только для перемешивания субстратов с небольшой вязкостью и легким пенообразованием. Главным плюсом этих систем является обеспечение перемешивания субстрата в удаленных частях реактора. Поэтому системы данного типа иногда используются в дополнение к механическим мешалкам.

Важным также является своевременное удаление осадка (песка, шлама, извести) со дна реактора, в противном случае полезный объем реактора будет сильно уменьшаться.

Соблюдение оптимальных температурных режимов. Для бактерий, участвующих в процессе образования биогаза, существуют различные температурные оптимумы. В случае, когда данные температурные режимы не соблюдаются, возможно замедление и даже полное прекращение производства биогаза. По температурному оптимуму все бактерии делятся на три категории: психрофильные, мезофильные и термофильные [8].

Психрофильные микроорганизмы существуют при температурах ниже 25°C. Преимуществом использования данных типов бактерий является то, что нет необходимости в предварительном подогреве субстрата или обогреве реактора. Однако выход производимого биогаза является незначительным, ввиду чего при данном температурном режиме эксплуатации биогазовых установок является экономически нецелесообразной.

Большинство метанообразующих бактерий – мезофильные. Оптимальной температурой для них является температура в диапазоне от 37 до 42°C. По этой причине биогазовые установки преимущественно работают именно в данном температурном режиме; при этом обеспечивается относительно хороший выход биогаза и стабильность процесса.

Температурный оптимум психрофильных микроорганизмов лежит в диапазоне от 50 до 60°C. Преимущество этого температур-

ного режима – большая скорость протекания реакции образования биогаза. Существенным недостатком являются значительные энергетические затраты на подогрев субстрата и обогрев реактора. Также психрофильные бактерии наиболее чувствительны к изменениям окружающей среды, вследствие чего процесс выработки биогаза сильно зависит от возможных неполадок. Данный температурный режим обычно используют в случае, когда субстратом служит биосырье, которое предварительно необходимо термически обработать, либо сырье, изначально имеющее высокую температуру (например, технологическая вода [8]).

На практике бактерии хорошо приспосабливаются к плавному изменению температуры, однако резкое изменение сказывается на них крайне негативно и может привести к гибели микроорганизмов.

Использование отработанного субстрата. В процессе ферментации по большей части разлагается углеродная составляющая субстрата, при этом питательные вещества, содержащиеся в субстрате, полностью сохраняются, более того, их доступность для растений увеличивается. Поэтому перебродивший субстрат может быть использован в качестве эффективного удобрения. Если сравнивать использование в качестве удобрения жидкого навоза до и после ферментации, то последний вариант будет иметь следующие преимущества [8]:

- более низкое выделение неприятных запахов;
- меньшее содержание органических кислот, а, следовательно, сведение к минимуму химического ожога листьев растений;
- лучшая доступность азота;
- отсутствие в удобрении болезнетворных микроорганизмов и сорняков.

По этим причинам продажа отработанного субстрата близлежащим сельским хозяйствам будет экономически целесообразной и принесет дополнительную выгоду от использования биогазовой установки.

Эффективное использование биогаза. Выработанный биогаз чаще всего используется в качестве топлива на блочных ТЭЦ, которые обычно располагаются вблизи биогазовых установок, либо в качестве автомобильного топлива, или поставляется в сети природного газа.

Электрический КПД блочных ТЭЦ обычно составляет от 30 до 44% [14] в зависимости от мощности станции и типа двигателя, использующего биогаз в качестве топлива. При этом вырабатывается большое количество тепловой энергии, за счет которой происходит нагрев воды, охлаждающей двигатель, и подогрев воды отходящими газами. Для повышения эффективности биогазовых установок целесообразно использовать вырабатываемую тепловую энергию, т.е. обеспечи-



вать работу блочной ТЭЦ в когенерационном режиме.

Общий коэффициент полезного действия блочной ТЭЦ состоит из электрического и термического КПД и обычно составляет от 80 до 90% [15]. Принято считать, что для газовых двигателей Отто и газожидкостных двигателей тепловой и электрический КПД приблизительно равны друг другу. В зимнее время года тепло может использоваться для собственных нужд биогазовой установки, таких как подогрев субстрата и поддержание необходимой температуры в реакторе, а также для поставок потребителям (только на небольшие расстояния). Возможно использование тепла для обогрева теплиц и сушильных комплексов, которые должны быть расположены в непосредственной близости от биогазовой установки, а также организация сушки твердой фракции отработанного субстрата с последующим его пеллетированием и применением для сжигания в твердотопливных котлах или в качестве подстилочного материала. Но в летнее время наиболее эффективным является использование режима тригенерации, при котором излишки тепловой энергии отводятся в абсорбционную холодильную машину с целью создания холода для последующего кондиционирования помещений (при условии наличия потребителей).

Для поставки биогаза в сети природного газа проводят целый комплекс дорогостоящих очистительных мероприятий, однако это позволяет транспортировать газ на любые расстояния. Экономическая целесообразность такого мероприятия очень сильно зависит от методов очистки и стоимости природного газа [8].

Заключение

Биогазовые установки являются современным, экологически безопасным источником энергии, получившим широкое распространение по всему миру. Беларусь обладает хорошим потенциалом для развития биогазовых технологий, а комплексное применение методов повышения их эффективности наряду с организацией производства отечественного оборудования может сделать использование биогазовых установок экономически более выгодным.

Исходя из представленного в статье анализа, для повышения эффективности использования биогазовых технологий в Республике Беларусь необходимо:

1) На стадии разработки проектов размещения биогазовых установок и выбора их мощности уделять внимание оценке потенциала биосырья на текущий момент,

а также на ближайшую и длительную перспективу. Обстоятельно прорабатывать логистику поставки биосырья (оптимальным является размещение биогазовых установок в непосредственной близости от источника сырья с подачей сырья без использования транспортных средств).

2) При выборе конструкции биогазового реактора обеспечить его хорошую теплоизоляцию, предусмотреть надежное техническое оборудование оптимальной мощности и технологичность его монтажа. Перспективным является организация совместных предприятий для производства биогазового оборудования на территории нашей страны.

3) Осуществлять подбор составов субстратов, обеспечивающих оптимальные условия брожения и увеличение выхода биогаза.

4) Обеспечивать оптимальный температурный режим и кислотность сбраживаемого состава, а также следить за наличием в нем достаточного количества питательных веществ и микроэлементов для развития бактерий.

5) Осуществлять предварительную обработку субстрата.

6) Изыскивать возможности более эффективного использования вырабатываемой биогазовыми установками тепловой энергии (отопление, процессы сушки и др.).

Литература

1. Kaltschmitt, M., Hartmann, H. *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*. – Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2001.
2. Величко В.В., Кундас С.П. Эффективность и проблемы использования биогазовых технологий // Сахаровские чтения 2015 года: экологические проблемы XXI века: материалы 16-й междунар. науч. конф., 19–20 мая 2016 года, г. Минск, Республика Беларусь / под ред. С.А. Маскевича, С.С. Позняка, Н.А. Лысухо. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2016. – 266 с.
3. European Biogas Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://european-biogas.eu>. – Дата доступа: 15.03.2017.
4. Navigant research [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.navigantresearch.com>. – Дата доступа: 20.10.2016.

gantresearch.com. – Дата доступа: 20.10.2016.

5. Weiland, P. *Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate // VDI-Berichte, Nr. 1620 «Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven»; S. 19–32; VDI-Verlag, 2001.*

6. Leuhn, M. Bauer, C. Gronauer, A. *Probleme der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen im Langzeitbetrieb und molekularbiologische Analytik. VDLUFA-Schriftenreihe 64, 2008, S. 118–125.*

7. Weiland, P. *Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland, Gültzower Fachgespräche, Band 15: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, Weimar, 2000 S. 8–27.*

8. *Руководство по биогазу: от получения до использования*. – Gültzow-Prüzen: Fachagentur Wachsende Rohstoffe e.V. FNR, 2012. – 213 с.

9. Montgomery L. F. R., Bochmann G. *Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production // IEA Bioenergy*. – 2014. – С. 1–20.

10. Mshandete A. et al. *Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste // Renewable energy*. – 2006. – Т. 31. – №. 14. – С. 2385–2392.

11. Liu D. et al. *Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process // Water Research*. – 2006. – Т. 40. – №. 11. – С. 2230–2236.

12. Salerno M. B. et al. *Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved biosolids digestion and methanogenesis // Water Environment Research*. – 2009. – Т. 81. – №. 8. – С. 831–839.

13. Choi H., Jeong S. W., Chung Y. *Enhanced anaerobic gas production of waste activated sludge pretreated by pulse power technique // Bioresource Technology*. – 2006. – Т. 97. – №. 2. – С. 198–203.

14. *Теплоэлектроцентральный // Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. – Дата доступа: 25.04.2017.

15. *Энергодиспетчер. Оперативная работа в электроэнергетике [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: <http://operby.com/energetika-dlya-nachinayushhix.html>. – Дата доступа: 25.04.2017. ■

Статья поступила в редакцию 27.06.2017