

АНАЭРОБНАЯ БИОКОНВЕРСИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В БИОГАЗ

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск

Представлен обзор методов конверсии биомассы с целью получения альтернативных источников энергии и передовой опыт стран в области теплоэнергетики. Показаны преимущества использования отходов перерабатывающей промышленности и сельскохозяйственного производства для получения биотоплива. Приведены перспективы и основные источники сырья для получения биогаза в Украине. Представлена характеристика современных биогазовых установок.

Биоконверсия отходов сельскохозяйственного производства – важнейшая проблема современности. Она связана, с одной стороны, с возможностью использования огромного энергетического потенциала биомассы для получения жидкого и газообразного топлива (биогаза), с другой – предотвращения загрязнения воздушного и водного бассейнов, почвы и посевов благодаря утилизации и дезодорации сточных вод животноводческих комплексов, перерабатывающей промышленности, а также получения обеззараженных, высокоэффективных органических удобрений. Оба эти аспекта стали объектом исследований с шестидесятых годов XX столетия во многих странах мира.

Наиболее распространенный способ получения энергии из биомассы – анаэробное (без доступа кислорода) сбраживание отходов сельскохозяйственного производства, в результате которого образуются биогаз и перебродившая полужидкая масса (органическое удобрение).

Биогаз в настоящее время получают на базе отходов животноводства, растениеводства, отходов крахмалопаточных и сахарных заводов, масло-жировой и перерабатывающей промышленности, побочной продукции целлюлозно-бумажной промышленности, лесного хозяйства и др. [1].

Биогаз состоит из следующих компонентов: метан – 50–75%, углекислый газ – до 25–30%, сероводород – 1%, а также незначительные количества азота, аммиака, кислорода, водорода и оксида углерода.

Условно выделяют четыре стадии бактериальной метаболической конверсии органических субстратов с получением биогаза [2]:

I стадия – бактерии-аэробы ферментативно перестраивают высокомолекулярные соединения, которые содержатся в биомассе отходов (белки, полисахариды, целлюлозу и липиды) в низкомолекулярные водорастворимые, сбражи-

ваемые метаболиты: сахара, аминокислоты, жирные кислоты. Процесс гидролиза полимерных молекул органического субстрата под действием экзоферментов бактерий (амилаз, протеаз, липаз) проходит медленно, что предопределено уровнем кислотности среды (оптимальное pH=4,5–6) и длительностью пребывания первых в ферментаторе.

II стадия – к расщеплению привлекаются кислотообразующие бактерии, в середину клеток которых проникают отдельные молекулы, где они продолжают изменяться под действием ферментов. В анаэробных условиях (при pH=6–7,5) образуются неустойчивые карбоновые кислоты: уксусная, муравьиная, молочная, янтарная, масляная, пропионовая; низкомолекулярные спирты (этанол) и газы – диоксид углерода, водород, сероводород и аммиак. При этом формируются необходимые условия для активации метановых бактерий (уровень pH снижается). Этот этап называют фазой биологического окисления.

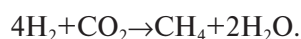
III стадия – происходит превращение органических кислот (муравьиной, масляной, молочной, пропионовой) в продукты, которые являются предшественниками метана: уксусную кислоту, диоксид углерода и водород. В этом процессе принимают участие кислотообразующие (ацетогенные) группы бактерий, к которым принадлежат *Clostridium aceticum*, *Clostridium thermoaceticum*, *Acetobacterium woodii*. Следовательно, в среде, где образуется метан, обязательно наличие уксусной кислоты в соответствии с уравнением:



В организме метановых бактерий, подобно ацетогенам, синтез в клеточных структурах ацетата из CO₂ и H₂ происходит через этап образования метаболитов ацетил-КоА и пирувата. IV

стадия (последний этап) – продукты жизнедеятельности метановых бактерий (*Methanobacterium formicum*, *Methanospirillum hungati*) – ацетат, диоксид углерода и водород, преимущественно превращаются в метан (именно на этом этапе синтезируется 90% всего метана). Следует подчеркнуть, что III стадия биосинтеза уксусной кислоты играет наиболее ответственную роль в скорости процесса метанообразования. Оптимальное значение показателя pH при этом поддерживается на уровне 7 (его значения могут находиться в диапазоне 6,6–8,0). Основным источником энергии для метановых бактерий являются водород и диоксид углерода, которые принимают участие в биосинтезе клеточных веществ указанных видов бактерий.

Образование метана происходит по восстановительной биокаталитической реакции:



Анаэробный процесс образования метана называют метаногенезом. В результате метаногенеза образуется газовая смесь (биогаз).

Метановые бактерии, или метаногены, адаптированные к существованию в разных питательных средах, по морфологическому строению подразделяются на: палочковидные (*Methanobacterium*), коккообразные (*Methanococcus*); сарциновидные (*Methanosarcina*); спиралеобразные (*Methanospirillum*). Известно около 10 видов бактерий *Methanococcus* и *Methanobacterium* (размер клеток некоторых меньше 0,001 мм). Метаногены отличаются от других бактерий особенностями метаболизма и составом клеточных структур. Отсутствие в клеточной стенке пептидогликанового скелета обуславливает нечувствительность метаногенов к действию антибиотиков, которые подавляют синтез белка. Все метановые бактерии принадлежат к анаэробам, поэтому естественный процесс разложения органических веществ субстрата при их участии возможен только без доступа кислорода.

Естественная микрофлора навоза состоит в основном из синтрофных и метанообразующих бактерий *Methanobacterium formicum*, *Methanospirillum hungati*. Установлено, что процесс деградации органической массы отходов стимулирует добавка к навозу специальных видов бактерий (ацетогенных и метаногенных) и незначительного количества почвы, которая интенсифицирует процесс более, чем в 2 раза. Основным компонентом биогаза является метан. Все эти реакции протекают одновременно, причём метанообразующие бактерии предъявляют к условиям своего существования значительно более высокие требования, чем кислотообразующие.

Количественный и качественный состав микроорганизмов сильно зависит от состава сбраживаемых органических веществ и условий окружающей среды.

Для процесса получения биогаза важными являются следующие технологические параметры: температура, pH среды, качество сырья, ингибиторы, концентрация твёрдых частиц, питательная среда, загрузка рабочего пространства, технологическое время цикла брожения, интенсивность перемешивания [3].

Выбор исходного сырья для производства биогаза значительно влияет на выход конечного продукта.

Из тонны навоза крупного рогатого скота получается 200–350 м³ биогаза с содержанием метана 60%, 300–630 м³ биогаза из различных видов растений с содержанием метана до 70%. Максимальное количество биогаза (1300 м³) с содержанием метана до 87% можно получить из жира [4].

Различают теоретический (физически возможный) и технически-реализуемый выход газа. В 1950–70-х годах технически возможный выход газа составлял всего 20–30% от теоретического. Сегодня применение энзимов, физико-механических методов для искусственной деградации сырья (например, ультразвуковых или жидкостных кавитаторов и других приспособлений) позволяет увеличивать выход биогаза на самой обычной установке с 60% до 95%.

Установлено, что длительность цикла метанового брожения растительных отходов сельского хозяйства (солома, ботва картофеля, сахарной и кормовой свеклы, трав) колеблется от 24 до 120 суток. При этом большая часть биогаза образуется в первые 20 суток. В расчете на 1 г сухого органического остатка выход газа получается не более 500–550 см³. Для промышленной реализации метанового брожения используют бродильные емкости (дайджестеры), оснащенные мешалками, шлюзовыми устройствами подачи субстрата и отвода продуктов брожения в виде жидкого удобрения и биогаза, который поступает в газгольдер и далее в хранилище.

Кроме отходов, для получения биогаза можно использовать специально выращенные энергетические культуры (силосная кукуруза, водоросли). Выход биогаза может достигать до 500 м³ из 1 тонны.

Биогаз можно получать на мусорных свалках (свалочный газ) [5]. Твёрдые бытовые отходы (ТБО) представляют собой биологические материалы, и на полигонах благоприятные условия для их анаэробного сбраживания. ТБО имеют более сложный состав, чем сырьё в биогазовых установках, и сбраживание происходит медленнее, обычно в течение нескольких лет.

Конечный продукт, известный под названием «свалочный газ», представляет собой смесь преимущественно CH_4 и CO_2 . Теоретически выход газа в течение «жизни» полигона может составить 150–300 м³ на тонну ТБО при концентрации метана от 50 до 60 об.%. Это соответствует примерно 5–6 ГДж энергии на тонну. В процессе формирования полигона каждый участок после заполнения покрывается слоем непроницаемой глины или подобного материала, создавая условия для анаэробного сбраживания. Газ собирается системой связанных между собой перфорированных труб, установленных в теле полигона до глубины 20 м. Питательной средой для метановых бактерий являются водород, азот, фосфор, калий, магний, кальций, сера и их соединения, содержащиеся в ТБО. Из 1 т сухого вещества твердых бытовых отходов образуется 170–200 м³ биогаза, половину объема которого и 25–30 мас.% составляет метан, вклад которого в образование парникового эффекта оценивается в 6%.

Сбор и использование свалочного газа позволит уменьшить эмиссию парниковых газов в атмосферу, а также снизит поступление загрязняющих веществ в окружающую среду.

Ряд специалистов считает, что необходима кооперация производств на базе единых промышленных площадок, что позволит обеспечить более полное использование сырья, снизить транспортные расходы и т.д. [6]. Одним из целесообразных путей решения проблемы комплексной переработки органических отходов является их предварительное измельчение и гомогенизация, что позволяет их привести в форму, доступную для микрофлоры.

В настоящее время ежегодно накапливается огромное количество отходов плодоконсервного производства. Химический же состав этих отходов таков, что большую часть составляют сложные соединения, которые не могут быть источником питания метаногенных бактерий [7]. Однако соли, микроэлементы, продукты гидролитического распада белков, углеводов и дрожевой автолизат являются отличной питательной средой метаногенов, как и других сапрофитов. Важнейшей особенностью метанового брожения является его исключительная длительность и сложность проведения даже при использовании чистых культур микроорганизмов, вызывающих это явление. В отличие от других видов брожений, используемых в промышленности, метановое брожение протекает в нестерильных условиях при наличии элективных микроорганизмов, составляющих симбиоз.

Для проведения метанового брожения необходимо строго следить за уровнем pH и температурой процесса. Посевным материалом для осуществления метанового брожения отходов

служили экскременты крупного рогатого скота, смешанные с водой в соотношении 1:1 и отфильтрованные. Концентрация сухих водорастворимых соединений в посевном материале составляла 3,4%. Установлено, что из отходов плодоконсервной промышленности в виде выжимок и других несъедобных частей сырья можно получать биогаз путем метанового брожения. Из депектинизированных выжимок в промышленных условиях биогаз эффективно можно получать только при непрерывной организации метанового брожения. При этом без специальных приемов наращивания концентрации биомассы интенсифицировать процесс невозможно, а биодegradация сухих веществ субстрата составит около 50%.

Во всем мире в настоящее время успешно ведутся работы по получению биогаза из отходов сельского хозяйства: свиного, коровьего навоза и куриного помета [8]. Производству биогаза уделяется большое внимание в странах Азии и бассейна Тихого океана, где свыше 3 млн установок. В настоящее время в Индии действует более 100 тыс. метантенков; предполагается, что дальнейшее развитие этой технологии получения биогаза позволит сократить использование электроэнергии на 44%, каменного угля – 15%, древесины – 79%. В КНР сейчас действует более 7 млн. метантенков. До 60% автобусного парка Китая в качестве топлива использует биогаз. В Индии строятся небольшие ферментеры от 2 м³ и более в расчете на одну крестьянскую семью или общину. В стране действует 80 тысяч таких установок, предполагается довести их количество до 12 млн. шт., чтобы обеспечить энергией 90 млн. человек. Ведутся работы по использованию нетрадиционных (альтернативных) источников энергии на основе использования биологических отходов и в Японии. В США многие фермеры приступили к строительству установок по переработке навоза крупного рогатого скота в биогаз.

Ускоренными темпами идет внедрение биоэнергетических установок в Европе. В 1998 году там насчитывалось более 800 (в том числе 24 крупных) биоэнергетических установок, работающих на навозе и помете. Такие компании как «EVONIK INDUSTRIES», «INTERTECH», «MT-ENERGIE», «HAGER+ELASSER VOSTOK» – в Германии, «ELTECO» – в Словении являются крупнейшими производителями оборудования биогазовых установок. Фирмы Швеции, Германии, Финляндии разработали модульные установки, выполненные на основе горизонтальных цилиндрических реакторов с продольными мешалками. Другое направление в биореакторостроении представлено крупными вертикальными метантеками, собираемыми на месте.

В Западной Европе не менее половины всех

птицеферм отапливаются биогазом, где установлены небольшие установки с объемом реакторов от 100 до 300 м³ [9].

Самое большое количество биогазовых установок в Европе расположено на территории Германии (более 7000). В этой стране самый высокий уровень в технологии получения биогаза.

Так, за период с 2000–2009 гг. количество биогазовых установок в Германии увеличилось с 1043 до 4780 единиц или более, чем в 4,5 раза, а установленная мощность электрогенераторов от 78 до 1600 МВт, т.е. более, чем в 20 раз. Такое значительное увеличение электрической мощности объясняется тем, что с 2005 г. в Германии преобладает строительство крупных биогазовых установок, что экономически выгоднее в период строительства и при эксплуатации. До 30–40% в стоимости установок приходится на средства автоматизации, которые незначительно зависят от мощности установки, аналогичная ситуация и с коммуникациями. Поэтому удельная стоимость биогазовых установок снижается с увеличением их мощности. Себестоимость производства электроэнергии на биогазовых установках Германии зависит от расходов на биомассу, которые колеблются от 40% до 70% всех текущих расходов.

В 2011 году в Европейском Союзе 56,7% биогаза было выработано на биогазовых установках, которые используют в качестве сырья отходы АПК и специально выращенное растительное сырье [10]. Около 30% биогаза получено на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО). Остальное количество – на станциях очистки сточных вод. При этом разные европейские страны имеют собственную специализацию. Биогаз полигонов ТБО играет основную роль в Великобритании, Франции, Италии и Испании, в то время как биогаз из сельскохозяйственных отходов и растительного сырья доминирует в Германии, Нидерландах, Чехии, Австрии, Бельгии, Дании и в Восточной Европе.

Биогаз преимущественно использовался для производства электроэнергии и тепла. Доминирующая часть полезного использования энергии биогаза приходится на производство электроэнергии, которая составляет 30,3 ТВт·ч в год.

В 2011 году в Европейском Союзе насчитывалось по разным данным примерно 180 установок по производству биогаза, 130 из которых поставляли биогаз в газовые распределительные сети, на остальных биогаз использовался в качестве моторного топлива для автомобилей. Суммарная мощность биогазовых установок составляла 70000 нм³/год (эквивалент 154 ГВт·ч электроэнергии).

Европейская ассоциация биомассы (ЕАБ) считает, что в Европе производство энергии,

полученной из биомассы, может быть увеличено от 72 млн. тонн в 2004 году до 220 млн. тонн в 2020 году. Наибольшим потенциалом располагает биомасса сельскохозяйственного сектора, где биогаз является важным элементом. По оценкам ЕАБ, в Европейском Союзе от 20 вплоть до 40 миллионов гектаров (млн. га) земли могут быть использованы для производства энергии без ущерба для пищевых ресурсов Европы.

Реальный потенциал производства метана, полученного из экскрементов животных, культур, выращиваемых для производства энергии, отходов, составляет около 40 млн. тонн в 2020 г, по сравнению с фактической выработкой в 5,9 млн. тонн в 2007 году. В 2020 году биогаз сможет покрыть более трети добычи природного газа в Европе, или около 10% потребления.

Что касается общей возможности использования энергии биомассы в Европе, то биогаз может составить 15–25% от общего производства биоэнергии, по сравнению с 7% в 2007 году. Потенциал биомассы для энергетики в целом гораздо больше, чем его использование на данный момент, однако этот потенциал должен расти благодаря деятельности на местном, региональном, национальном и международном уровнях.

Теплотворная способность биогаза составляет 5000–6000 ккал/м³ и зависит от процентного содержания в нем двуокиси углерода. После очистки теплотворная способность биогаза увеличивается до 1000 ккал. Из одного кубометра метана можно получить 9,94 кВт·ч электроэнергии. Один м³ биогаза может обеспечить работу двигателя мощностью 2 л.с.

Из 1 тонны сухого органического вещества можно получить при анаэробной переработке: из свиного навоза – 500 м³ биогаза или 0,36 условного топлива (т у.т.); из навоза КРС – 450 м³ биогаза или 0,321 т у.т.; из птичьего помета – 660 м³ биогаза или 0,428 т у.т.

Фирма Zorg biogas AG (Германия) установила 54 биогазовые станции мощностью от 100 кВт до 20 МВт в 14 странах мира [11]. Принцип работы заключается в том, что жидкие биоотходы перекачиваются на биогазовую установку фекальными насосами по бардопроводу. Канализационная насосная станция находится в специальном технологическом помещении. Твердые отходы (навоз, помет) доставляют транспортом или трактором. Жидкие отходы подаются в емкость, где происходит гомогенизация массы и подогрев (охлаждение) до необходимой температуры. Из емкости гомогенизации и загрузки твердых отходов биомасса (навоз, помет или барда) поступает в реактор (ферментатор) – газонепроницаемый, герметичный резервуар из кислотостойкого железобетона, имеющего теплоизоляцию. В реакторе поддержива-

ется фиксированная для микроорганизмов температура: 30–41°C (для мезофилов) или около 55°C (для термофилов). Перемешивание биомассы внутри реактора производится мешалками из нержавеющей стали. Подогрев реактора осуществляется водой, температура которой на входе в реактор 60°C, на выходе около 40°C. Система подогрева (пучок трубок) находится внутри стенки реактора, либо на его внутренней поверхности. Затраты тепловой и электрической энергии на нужды самой установки составляют от 5 до 15% всей энергии, которую дает биогазовая установка. Время гидравлического отстаивания внутри реактора (в зависимости от субстратов) – 20–40 дней. За это время органические вещества внутри биомассы метаболизируются (преобразовываются) микроорганизмами. Период брожения определяет объем реактора. Сбраживание отходов выполняют анаэробные микроорганизмы. В биореактор микроорганизмы вводятся один раз при первом запуске одним из трех способов: введение концентрата микроорганизмов; добавление свежего навоза или добавление биомассы с другого действующего реактора. Обычно используется второй и третий способы из-за низкой стоимости. В навоз микробы попадают из кишечника животных. Они не опасны для человека и животных. На выходе образуется два продукта: биогаз и биоудобрения (компостируемый и жидкий субстрат).

Биогаз поступает и хранится в газгольдере, где происходит выравнивание давления и состава газа. Газгольдер – это высокопрочная растягивающаяся EPDM мембрана, материал которой стоек к солнечному свету, осадкам и испарениям в реакторе. Срок службы газгольдера 15 лет. Газгольдер герметически накрывает реактор сверху. Над газгольдером имеется тентовое покрытие. В пространство между газгольдером и тентом закачивается воздух для создания давления и теплоизоляции. Из газгольдера идет непрерывная подача биогаза в газовый или дизель-газовый теплоэлектрогенератор, где производится тепло и электричество. 1 м³ газа дает 2 кВт·ч электрической и 2 кВт·ч тепловой энергии. Установкой управляет система автоматики, которая контролирует работу насосной станции, мешалок, системы подогрева, газовой автоматики, генератора. Для управления биогазовой установкой необходим один оператор в течение 2 ч в день.

Пereброженная масса – это биоудобрения, готовые к использованию. Жидкие биоудобрения отделяют от твердых с помощью сепаратора и направляют в емкости для хранения биоудобрения. В Германии этот субстрат – аммиачная вода в основном используется как удобрение из-за высокой концентрации аммиака (NH₄). Твердые удобрения хранятся на специ-

альном участке. Из емкости хранения жидких удобрений насосами масса перекачивается в бочки-прицепы и вывозится на свои поля или на продажу.

В настоящее время энергопотребление в агропромышленном комплексе России составляет 1,8 т у.т./год на одного человека [12].

Усовершенствованы технологии и установлены граничные условия их применения для сбраживания навоза [13]. Производство биогаза из густого подстильного навоза влажностью менее 90% необходимо осуществлять в метантенках с рециркуляцией жидкой фракции, а из навоза влажностью более 90% – в проточных метантенках. Максимальная нагрузка по сухому органическому веществу навоза не должна превышать 9 кг на 1 м³ метантенка. При этом образуется максимальное количество биогаза до 20 мг/м³.

Установлено, что наилучшим материалом-носителем для использования в анаэробном биофильтре является керамзит. Этот материал обеспечивает коэффициент удержания биомассы при сбраживании навозного стока свиноферм, равный 1,6. Применение керамзита в качестве материала-носителя позволило обеспечить стабильное сбраживание навозного стока влажностью 97,5% и получение из него биогаза в количестве 2,5–3,0 л из 1 л стока в сутки.

Применение анаэробного контактного реактора для обработки избыточного ила очистных сооружений влажностью 99% обеспечивает снижение БПК₅ с 2000 мг/л до 500 мг/л и получение биогаза в количестве 0,9 л при обработке 1 л стока в сутки.

В 2003 г. в рамках проекта технической помощи правительства Нидерландов в Украине при участии голландской компании VTG, НТЦ „Биомасса“, „УкрНДиАгропроект“ была построена биогазовая установка в ООО „Агро-Овен“ (с. Оленивка Магдалиновского района, Днепропетровской области), где содержится 20 тыс. голов свиней [14]. Построенная установка дает возможность получить 3300 куб. м биогаза, 30 кВт тепловой и 150 кВт электрической энергии в сутки. В 2007–2008 гг. ООО „Зорг Украина“ построило три биогазовых установки мощностью 0,4–1,0 МВт электрической и тепловой энергии в Киевской, Харьковской и Херсонской областях. С 2009 г. в ООО „Украинская молочная компания“ (с. Большой Крупиль, Згурьевского района, Киевской области) функционирует биогазовая установка с комбинированным производством электроэнергии и тепла мощностью 625 кВт с возможностью расширения до 950 кВт, которая перерабатывает отходы комплекса с поголовьем 4 тыс. коров. В настоящее время построено и в стадии завершения находятся 7 объектов по производству биогаза из

отходов животноводства в Днепропетровской, Киевской, Одесской, Харьковской, Херсонской областях и в Автономной Республике Крым. В качестве сырья для производства биогаза может быть использованы отходы животноводства (навоз, помет, сточные воды), сельскохозяйственные отходы (солома, кукурузный силос, свекольная и картофельная ботва, листья), агропромышленные отходы (отходы от производства спирта, биоэтанола, травы, очистки овощей, фруктов, жом). Установлено, что из 1 т биоресурсов можно получить 25–500 куб. м биогаза, до 0,9 т биоудобрений, а при полном сжигании биогаза – по 50–1000 кВт электрической и тепловой энергии.

Выход биогаза из разных органических отходов зависит от морфологического и элементарного состава. Ориентировочный выход биогаза из отходов составляет, м³/тонну: навоз КРС – 40; навоз свиней – 35; осадок сточных вод – 5; помет птиц – 40; овощные отходы – 48; молочные отходы – 50; отходы пивоваренных заводов – 200; отходы ресторанов – 189; отходы обработки рыбы и рыбьего жира – 300; трава (сухое вещество 33 %) – 165; подсолнух (сухое вещество 23%) – 90; рапсовый жмых (сухое вещество 90%) – 620; барда (сухое вещество 31%) – 250 [15].

Переработка одних только животноводческих отходов в масштабах Украины позволит получить свыше 3 млрд. м³ биогаза, что эквивалентно 2 млрд. м³ природного газа в год. Общий энергетический потенциал органических отходов в сельском хозяйстве превышает 34 млрд. м³/год.

Биогазовые технологии являются наиболее эффективными для утилизации органических отходов, пригодных к брожению. Максимального эффекта можно достичь при наличии потребителей качественных органических удобрений и потребителей тепловой и электрической энергии. Анаэробная переработка органических отходов животноводства Украины позволит сэкономить более 2 млрд. м³ экспортированного природного газа.

В Мариуполе Донецкой области в 2012 г. ввели в эксплуатацию систему сбора и утилизации биогаза на полигоне твердых бытовых отходов [16]. Этот проект отечественной компании “ТИС Экко” реализуется в Украине впервые. Утилизацию биогаза в факельной установке на Приморском полигоне ТБО специалисты называют уникальным для нашего государства сочетанием заботы об окружающей среде, инновационных технологий и бизнеса.

Система сбора и утилизации газа даст возможность свести к минимуму выделение канцерогенных органических веществ, которые образуются в ходе горения отходов, и уменьшит негативное влияние полигона на окружающую

среду и здоровье жителей. Газ, который образуется в толще полигона, будет утилизировать факельная установка, благодаря чему исчезнут запах, вредные выбросы в атмосферу и опасность самовозгорания.

В Мариуполе построят первую в Украине теплоэлектростанцию, которая будет работать на биогазе из полигона ТБО. В Донецкой области ежегодно образуется почти 6 млн. м³ бытовых отходов, а накапливается свыше 400 млн. м³.

Для Хмельницкого экологическую опасность окружающей среды создает городская свалка, на которой действует ограниченная система сбора биогаза. Принцип ее работы следующий: из трех скважин глубиной 15–18 м биогаз принудительно транспортируется перфорированными трубопроводами к газораспределительной подстанции.

Биогаз, очищенный от примесей и влаги, под давлением коллектором подается в мастерскую, в которой установлено четыре трубчатых инфракрасных обогревателя для создания оптимальной температуры в помещении. В перспективе на свалке планируют построить еще 30 скважин для сбора биогаза.

Разработан способ, который включает обработку измельченного исходного сырья с использованием микроорганизмов в присутствии соединений, являющихся донорами водорода [17]. В качестве основного сырья используют растение эйхорнию и ее смеси с торфом, лигнином и со сброженной навозной жижей, активным илом аэротенка, которые содержат метаногенные микроорганизмы с культуральной средой на основе фосфатно-хлоридно-карбонатного буфера, а также отходы переработки древесины, содержащих гуматы, целлюлозу и/или отходы сахарного производства. Процесс ведут при температуре 15–70°C в анаэробных или аэробных условиях. Отбирают синтезированный метан, а образующийся диоксид углерода оставляют в реакторе. Затем в реактор добавляют вещества-доноры водорода, гуминовые соединения, микроорганизмы. Содержимое реактора перемешивают, процесс далее ведут при температуре от 3°C до 60°C и при pH=5–9. Из полученной водно-углеводородной смеси биотопливо отделяют путем отстаивания, сепарации, дистилляции или деэмульгирования. Изобретение позволяет повысить эффективность получения биотоплива.

Изобретение решает задачу расширения номенклатуры сырья для получения биотоплива, повышения степени переработки сырья, выхода продукта и улучшения показателей его качества. Оно может найти применение в агропромышленном комплексе, на предприятиях коммунального хозяйства, при производстве альтернативного топлива.

Разработан способ получения биогаза из сточных вод спиртовых заводов, который включает кондиционирование барды, обогащение ростовыми и питательными веществами, анаэробное сбраживание, который отличается тем, что подготавливают барду концентрацией органических веществ по показателю химического потребления кислорода 10–100 тыс.мг/дм³, 40–100 млн./дм³ термолизированных дрожжевых клеток и подают в анаэробный реактор со скоростью разбавления среды 0,005–0,030 час⁻¹ [18].

Получение биогаза путем метанового сбраживания органических субстратов предусматривает метановое брожение субстрата в присутствии стимуляторов метаногенеза, в качестве которых используют соединения ацетата никеля (II) с этилендиамином или соединение никеля (II) с глицином, добавляемых в субстрат в количестве 0,05–1,50 мг/л в пересчете на содержание никеля в комплексном соединении [19].

Разработано изобретение, которое относится к способу переработки органических отходов в биогаз и удобрение. Техническим результатом является упрощение способа переработки органических отходов в биогаз и удобрение, обеспечение надежности отбора биогаза из массива биомассы и цикличности процесса переработки отходов. Способ включает подготовку основания из гидроизолирующего материала, монтаж газодренажной конструкции из жестко связанных труб, совмещающей функции вертикального и горизонтального газового дренажа; сортировку и измельчение отходов, заселение их метаногенными микроорганизмами и увлажнение, укладку послойно насыпкой с верхней части газодренажной конструкции с пересыпкой слоев газодонепроницаемым материалом. Биогаз отводят через газодренажную конструкцию, а фильтрат – гидродренажной системой, вмонтированной в основание. Переработанную анаэробными микроорганизмами биомассу можно использовать в качестве удобрения. После раз-

грузки установки цикл переработки отходов повторяется [20].

Общее количество биогаза в восьми странах ЕС в 2010–2011 годах составило 0,5 млрд. м³/год [21]. В табл. 1 представлены действующие биогазовые установки в Украине.

Биогазовая установка на комбинате «Запорожсталь» была внедрена для очистки стоков и уменьшения потребления энергии. Тепловая утилизация биогаза реализуется на собственные потребности свинокомплексу комбината.

На свинокомплексе корпорации «Агро-Овен» электроэнергия, производимая в биогазовой установке, потребляется на собственные потребности установки и предприятия, при этом когенерационная установка не подключена к общей электросети.

В 2012 году «Мироновский хлебопродукт» начал строить биогазовую установку на птицефабрике «Орель-Лидер» в Днепропетровской области [22]. Планирует реализовать биогазовую программу из тридцати биогазовых установок компания «Укрлендфарминг».

На базе отходов крупных спиртовых заводов (до 20 тыс. т спирта в год) возможно построить биогазовую станцию производительностью 3 млн нм³ метана в год, который отвечает установленной электрической мощности когенерационной установки 1 МВт.

Потенциал производства биогаза в агропромышленном комплексе Украины представлен в табл. 2.

Установленная электрическая мощность КГУ, которые будут работать на биогазе из отходов масло-экстракционных заводов (до 180 тыс. тонн масла в год), может суммарно составлять около 15 МВт, а на биогазе из отходов сахарных заводов – 3,5 МВт. Из отходов, которые образуются при производстве 1 т спирта, можно получить 40–150 нм³ CH₄, из отходов при производстве 1 т пива – 1–8 нм³ CH₄, 1 т сахара – 15–100 нм³ CH₄, 1 т масла – 110–225 нм³.

Таблица 1

Действующие биогазовые установки в Украине

Предприятие	Год запуска	Поголовье	Сырье	Объем сырья, т/сут	Объем реакторов, м ³	Мощность, кВт	Технология
Свиноферма комбината "Запорожсталь", Запорожье	1993	12 000	навоз	20–22	595	–	Bigadan Ltd, Дания
Свиноферма корпорации "Агро-Овен", Оленивка, Днепропетровская область	2003	15 000	навоз, отходы жира	80	2×1000	180	BTG, Нидерланды
Аграрная компания "Элита", Терезине, Киевская область	2009	1 000	навоз	60	1 500	250	LIPP, ФРН
Ферма крупного рогатого скота "УМК", В. Крупель, Киевская область	2009	6 000	навоз	400	3×2400+1000	955	"Зорг", Украина

Потенциал производства биогаза в агропромышленном комплексе Украины

Вид деятельности	Количество предприятий в Украине (на 2010–2011 гг.)	Общий объем основных отходов, тыс. т	Потенциал производства биогаза с общего объема отходов и продукции млн. м ³ /год
Всего в Украине	11 667	39 727	9 543
Сахарные заводы	60	23 264	976
Пивзаводы	51	1 017	122
Спиртовые заводы	58	2 705	117
Фермы крупного рогатого скота	5 079	15 432	386
Свинофермы	5 634	5 657	160
Птицефабрики	785	4 722	378
Силос кукурузы			7 406

Установлено, что механическое измельчение растительного сырья способствует увеличению количества биогаза в 10 раз. Использование селекционной мезофильной целлюлитической ассоциации микроорганизмов сокращает время начала гидролиза сырью на двое суток и увеличивает количество образуемого биогаза на 45% [23].

Рассмотрена общая концепция и пути повышения эффективности анаэробных процессов метанообразования, предложены новые решения по очистке биометана и повышению его выхода в составе биогаза за счет оптимизации технологии, биохимической конверсии газовой смеси CO₂/H₂ и стимулирующих микродобавок [24].

Разработана биогазовая установка БЭТЕК, которая по техническому уровню не уступает лучшим зарубежным образцам биогазовых установок, а отдельные технические решения, например, по получению высококачественного органического удобрения «биогумин», не имеют аналогов. Предложенный вариант исполнения биогазового комплекса позволяет значительно увеличить скорость и глубину разложения биомассы и выход метана при оптимизации параметров (рН, температура, давление, дисперсность биомассы, сообщество микроорганизмов, тип перемешивания и др.), отдельных и независимых друг от друга стадий гидролиза и образования метана. Отмеченные недостатки в значительной мере удается устранить в установках 2-ступенчатого сбраживания биомассы. Экономическая эффективность процесса повышается: увеличивается выход биогаза; сокращается время цикла сбраживания; возрастает степень обеззараживания субстрата (при рабочей температуре 55°C патогенные микроорганизмы погибают в течение 24 ч); происходит его дезодорация и улучшение свойств как органического удобрения, поскольку азот переходит в легкоусвояемую растениями форму [25].

Для эффективного использования биогазовых установок аграрным предприятиям необхо-

димо иметь 200–300 т биосырья в сутки. Вместе с тем, статистические данные говорят о том, что в 2009 г. лишь 3 аграрных предприятия Украины имели достаточное поголовье крупного рогатого скота, свиней и птиц для обеспечения производства биогаза из собственного сырья [26].

На основе аналитического обзора установлено, что производство биогаза является не только экологически безопасной технологией, но и наиболее конкурентоспособной областью биоэнергетики. Использование биогазовых установок позволяет решить следующие проблемы: энергетическую (получение энергии от использования топливного биогаза), экологическую (обеззараживание отходов, утилизация парникового биогаза), агрохимическую (получение высококачественных удобрений), экономическую (получение прибыли от реализации удобрений, сокращение платежей за загрязнение окружающей среды).

Общий энергетический потенциал органических отходов в сельском хозяйстве Украины превышает 34 млрд. м³/год. Переработка только животноводческих отходов позволит получить свыше 3 млрд. м³ биогаза, что эквивалентно 2 млрд. м³ природного газа в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соуфер С. Биомасса как источник энергии. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
2. Баадер Б, Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: Теория и практика: пер. с нем. М.И. Серебряного. – М.: Колос, 1982. – 148 с.
3. Сербін В.А. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії в системах ТПП. – Макіївка: ДонДАБА, 2003. – 153 с.
4. Ратушняк Г.С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання: навч. посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 170 с.
5. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. –

132 с.

6. Корзникова М.В., Блохин А.Ю., Козлов Ю.П. Оценка степени конверсии органического вещества отходов животноводства и птицеводства в биогаз (на примере РФ) // Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер. Химия. Биология. Фармация. – 2008. – № 2. – С.108-111.
7. Бондарь С.Н., Чабанова О.Б., Недобийчук Т.В. Исследование процесса получения биогаза из отходов плодоконсервного производства // Экологічна безпека. – 2008. – № 2. – С.68-72.
8. ООО «Инновационно-трастовая компания – Энерго»: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: file://localhost/D:/Мои%20документы/Биогаз/Для%20статьи/ИТК-ЭНЕРГО.mht
9. Передерій Н.О. Отримання енергії з біогазу – перспективи розвитку технології // Вісник ЖДТУ. – 2008. – № 2 (44). – С.281-284.
10. Гелетуша Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні: Аналітична записка БАУ №4 (31 травня 2013 р.): [Електрон. ресурс]. – Режим доступа: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
11. ZORG biogas AG: Биогазовые установки: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://zorgbiogas.ru/biogas-plants?lang=ru
12. Корзникова М.В., Блохин А.Ю., Козлов Ю.П. Оценка степени конверсии органического вещества отходов животноводства и птицеводства в биогаз (на примере РФ) // Вестник Воронежского гос. ун-та, Сер. Химия. Биология. Фармация. – 2008. – № 2. – С.108-111.
13. Ковалев А.А. Технологии и технико-энергетическое обоснование производства биогаза в системах утилизации навоза животноводческих ферм: Дис...докт. техн. наук: 05.14.08. – М.: МГУ, 1998. – 244 с.
14. Климчук О.В., Грох Н.В. Виробництво біогазу: досвід зарубіжних країн та перспективи розвитку в Україні // Збірник наукових праць ВНАУ, Сер. Економічні науки. – 2012. – № 2 (64). – С.50-54.
15. Степанов Д.В., Ткаченко С.И., Ранский А.П. Оценка возможности получения энергоносителей из органических отходов с учетом техногенной нагрузки на окружающую среду // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 1. – С.1-8.
16. Історія розвитку біогазових установок в Україні: [Електрон. ресурс]. – Режим доступа: file://localhost/D:/Мои%20документы/Биогаз/Для%20статьи/История_БГУ.mht
17. Пат. 2378380 Российская Федерация, С12P5/00. Способ получения биотоплива / Н.А. Кручинин, А.Г. Дмитриев, Г.М. Костылев, А.В. Котровский, В.А. Кондратьев, Г.Н. Мелёшин, С.Л. Михайлянц; патентообладатель Н.А. Кручинин, А.Г. Дмитриев – № 2008116917/13; Заявл. 30.04.2008; Опубл. 10.01.2010. – 6 с.
18. Пат. на корисну модель 34130 Україна, С10L 1/18 (2008.01). Спосіб одержання біогазу із післяспиртової барди // І.І. Яковець, І.М. Демчак, В.В. Сосницький, А.І. Українець; власник НУХТ. – № 200803620; Заявл. 21.03.2008; опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14. – 5 с.
19. Пат. 1838415 СССР, МПК 5, С12P5/02, C02F11/04. Способ получения биогаза // Г.П. Лукина, С.Б. Абилов, И.Е. Ежова, М.А. Великая, А.Е. Епифанов, Е.С. Панцхава, В.Я. Быховский, Ю.И. Шишков; ВНИИ генетики и селекции промышленных микроорганизмов. – № 5009150; Заявл. 12.11.1991; Опубл. 30.08.1993. – 7 с.
20. Пат. 2372155 Российская Федерация, МПК8 B09B 1/00, B09B 3/00. Способ получения биогаза и удобрения из органических отходов // Ю.А. Парахин, Ю.А. Седов, С.А. Майоров, А.Н. Загородних, И.Д. Ермаков. – № 2008113459/03; Заявл. 07.04.2008; Опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31. – 5 с.
21. Георгій Гелетуша, голова правління Біоенергетичної асоціації України: Перспективи біогазу в Україні [Електрон. ресурс]. – Режим доступа: file://localhost/D:/Мои%20документы/Биогаз/Для%20статьи/Перспективи%20біогазу%20в%20Україні%20.mht
22. Перспективи виробництва біогазу в Україні / Г.Г. Гелетуша, П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвеев, Т.В. Ходаківська // Відновлювана енергетика. – 2011. – № 3. – С.73-77.
23. Ястремська Л.С. Біотехнологічні аспекти трансформації сільськогосподарських відходів в енергоносії // Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2011. – № 4. – С.44-46.
24. Ковалев В.В., Унгурану Д.В., Ковалева О.В. Теоретические и практические аспекты совершенствования процессов биогазовой технологии // Проблемы региональной энергетики. – 2012. – № 1. – С. 102-114.
25. Нескородов Г.Ф., Эрсамбетов В.Ш. Технологические комплексы для получения биогаза и разделения его на компоненты // Сотрудничество для решения проблемы отходов: Тез. 7-й Междунар. конф. – Харьков. – 2010. – С.10-11.
26. Ігнат'єва Т.Г. Виробництво біогазу як інноваційний напрям енергозбереження в аграрних підприємствах України: стан, проблеми та перспективи розвитку // Інноваційна економіка (Всеукраїнський науково-виробничий журнал). – 2011. – С.19-23.

Поступила в редакцію 17.07.2013