

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТБО ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА КАК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

Ю. В. Копец; К. К. Копец, к.т.н., доцент

ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» институт строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства

Аннотация. Получение и использование биогаза относится к инновационной энергетике, энерго- и ресурсосберегающим и природоохранным технологиям. В работе рассматриваются история изучения биогаза, опыт его производства, применения, его характеристики и технология производства. Приведен краткий обзор существующего положения в биоэнергетической отрасли в разных странах. Проанализирована ситуация в области переработки органического сырья со свалок ТБО в биогаз. Рассмотрены перспективы его применения в России и Луганской Народной Республике. Предложена схема утилизации отходов с последующим извлечением биогаза. Особое внимание уделяется процессу производства электроэнергии, а так же типам электростанций, работающих на свалочном газе.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, «зеленые» источники энергии, биогаз, биомасса.



**Копец
Юрий
Витальевич**



**Копец
Карина
Константиновна**

Быстрый рост численности населения, а также темп технологического развития вызывают непрерывное увеличение спроса на традиционное топливо. Однако геологические запасы основных ресурсов – нефти и газа – ограничены, а их добыча, переработка и сжигание приносят нашей планете колоссальный ущерб, связанный с глобальным изменением климата Земли – парниковым эффектом [1]. Это влечет за собой потребность в поиске новых технологий – переход к возобновляемой энергетике.

Альтернативные источники энергии уверенно входят в повседневную жизнь. Люди научились использовать для собственных нужд энергию воды, ветра, солнца, недр земли и другие виды топлива. К таким необычным источникам энергии и относится биогаз, как источник энергии, полезный людям для удовлетворения своих энергетических потребностей без использования ископаемого топлива [2].

Биогаз – газ, полученный по технологии анаэробного метанового сбраживания биомассы, органических отходов в биогазовых установках (агрегатах, являющихся комплексом технических сооружений и аппаратов, объединенных в единый технологический цикл) ассоциацией метагенных бактерий благодаря управляемому процессу разложения сырья [3]. Его основными компонентами являются: метан (CH_4) – 55-65 % и углекислый газ (CO_2) – 35-45 %, а также в очень малых количествах, около 1 %, другие газы, например, водород (H_2) и сероводород (H_2S). Средняя теплота сгорания биогаза зависит от его состава. При содержании метана около 60 % она равна 22 МДж/м³. Поскольку горючая часть биогаза состоит из метана (температура воспламенения метана около 645 °С), его причисляют к семейству природных газов. Он является экологически чистым топливом.

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ БИОГАЗА

Рассмотрим зарубежный и отечественный опыт в эксплуатации биогазовых установок.

Человечество научилось использовать биогаз давно. Ещё в 1-2 тысячелетии до н.э. на территории современной Германии уже существовали примитивные биогазовые установки.

Первые глобальные оценки потока свалочного метана начали проводиться в прошлом десятилетии. В одной из первых работ 1987 года было показано, что глобальная эмиссия свалочного метана составляет 30-70 млн. т в год, или 6-18 % от его общепланетарного потока [4].

Первая современная мусорная свалка с применением специальных инженерных сооружений открылась в Калифорнии (США) в 1937 году. Исследования и

применение свалочного газа в США начались после принятия в 1965 году закона об утилизации твёрдых отходов («Solid Waste Disposal Act»).

Англоязычный термин «landfill» (русск. свалка) устоялся только в 50-х годах. Работы по утилизации свалочного газа ускорились во время нефтяного кризиса 70-х годов. С 1980 года правительство США начало предоставлять налоговые льготы производителям свалочного газа. К концу 1984 года в США действовала 41 теплоэлектростанция, работающая на свалочном газе [5].

«Биогаз Технолджи» – одна из первых в мире компаний, которая начала использовать эти возможности в начале 2000-х годов. В настоящее время выполнены 20 проектов по сбору и утилизации свалочного газа в разных странах.

Глобальная добыча свалочного газа составляет около 1,2 млрд. м³ в год, что эквивалентно 429 тыс. тонн метана или 1 % его мировой эмиссии. К 2002 году в мире действовало 1 152 объекта по получению свалочного газа, общей мощностью производства энергии 3 929 МВт, с объёмом обрабатываемых отходов 4 548 млн. т. В Европе таких объектов насчитывалось 750. Лидерами по объёмам годовой газодобычи с полигонов ТБО являются: США – 500 млн. м³/год, Германия – 400, и Великобритания – 200.

В начале века в США вступил в силу закон о необходимости оборудования всех без исключения полигонов страны системами добычи и обезвреживания биогаза, после того как американскими исследователями было показано, что свалки являются основным антропогенным источником метана [6].

Из 6 тыс. свалок, действующих на территории США (2004 г.), около 360 собирают и утилизируют свалочный газ, и ещё на 600 свалках возможно извлечение метана. Полученного из этого газа электричества будет достаточно для снабжения 1 млн. домохозяйств. По данным ЕРА (Агентство по защите окружающей среды США) в 2006 году улавливание свалочного газа в США предотвратило выбросы в атмосферу 20 млн. метрических тонн парниковых газов в СО₂ эквиваленте, для захвата которых потребовалась бы высадка 20 млн. акров лесов. Утилизация газа в 2006 году позволила США сэкономить 169 млн. баррелей нефти из 500 тыс. по всему миру. К 2025 году США планируют получать 29 млрд. кВт ч электроэнергии ежегодно из бытового мусора и свалочного газа.

Свалки Канады, в свою очередь, выбрасывают в атмосферу 25 % парниковых газов. Но благодаря организованным полигонам выбросы парниковых газов уже сократились на 3,7 млн. тонн в год [5].

Чтобы разумно использовать 35 млн. м³ свалочного газа, ежегодно выделяющегося на свалке Раутен-вег под Веной, была создана станция электрической мощностью 7908 кВт; она покрывает потребности в электричестве 25 тыс. квартир. Подобные станции действуют также в Великобритании, Швейцарии, Австралии, Гонконге и других странах [7].

В Финляндии эксплуатируется уже более 30 систем по сбору биогаза практически со всех полигонов размещения отходов. Эти биогазовые насосные станции собирают в течение года такое количество мета-

на, которое эквивалентно более чем миллиону тонн углекислого газа.

В России в данное время разрабатывается несколько проектов по свалочному газу, в том числе утилизация свалочного газа на таких полигонах, как «Хметьево» и «Дмитровский» в Москве [8]. Свалки России ежегодно выбрасывают в атмосферу 1,1 млн. т, что составляет примерно 2,5 % от планетарного потока.

В ряде стран мира энергетика на биомассе заняла важное место в энергобалансе. К примеру, в Дании на долю энергетике на биомассе приходится более 7 % всей энергетике, в Австрии – 12 %, в Швеции – 21 %, а в Германии – более 24 %. В целом, в ЕС ежегодно из биомассы получают 14 % от общей потребности в энергии (рис. 1).

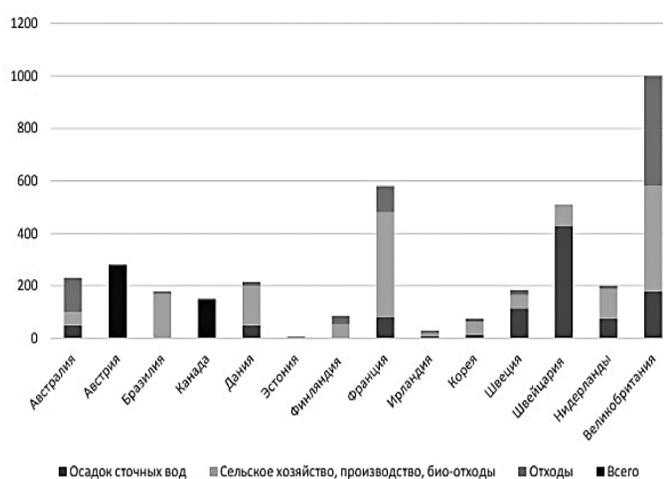


Рис. 1. Количество биоустановок по странам мира [9,10]

Европейский рынок биогазовых установок оценивается в \$3 млрд. и, по прогнозам, он должен вырасти до \$25 млрд. уже к 2020 г. При этом 75 % биогаза производится из отходов сельского хозяйства, 17 % – из органических отходов частных домохозяйств и предприятий и еще 8 % – канализационных очистных сооружений.

ПОРЯДОК ПЕРЕРАБОТКИ БИОГАЗА

Одним из важнейших источников СН₄ и СО₂ являются пункты захоронения и складирования твердых бытовых отходов. Расположенные в ландшафтах городов техногенные геологические тела, сформированные свалочными отложениями, самопроизвольно генерируют большое количество биогаза. Активное газообразование начинается после закрытия объекта (или его части), когда сформировался сбалансированный метаногенез, длится 20-30 лет и постепенно отмирает. Свалки интенсивно выбрасывают биогаз в атмосферу (доля общих выбросов метана в атмосферу составляет от 2 до 12,7 % от захоронения бытовых отходов). Выделяемые свалками газы содержат огромное количество токсичных и вредных веществ, крайне опасных для здоровья и жизни людей. Добыча и утилизация биогаза на полигоне может решить

экологические проблемы посредством предотвращения выбросов метана в атмосферу [11].

Самый эффективный способ уменьшить выбросы биогаза – это откачать его и использовать в качестве топлива или электроэнергии. В мире действует более 150 таких установок.

Производство биогаза на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО) не требует строительства специальных заводов. Основные затраты на использование биогаза (ТБО) связаны с извлечением, очисткой и транспортировкой. В этом отношении свалки можно рассматривать как аналог месторождения природного газа не только с точки зрения технологий разработки, но и с точки зрения запасов метана. Масштабы образования и низкая стоимость добычи делают биогаз со свалок одним из самых многообещающих источников энергии для местных нужд.

После очистки биогаз используется для выработки электрической и тепловой энергии, которая используется в технических целях и в системах отопления. Мощность установок по выработке электроэнергии из биогаза колеблется от десятка кВт до нескольких мВт, а биогазовых установок от 10 до 1 200 м³/ч. Сырой биогаз сжимается до 0,4 бар и подается на ТЭЦ по газопроводу протяженностью 1 км и диаметром 200 мм.

Обращаем внимание, что биогаз также можно использовать в качестве топлива в энергетических установках с двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Вывозимые на полигон отходы утилизируются в соответствии с указаниями СНиП. На полигоне будет построен газодобывающий комплекс, который будет состоять из скважин, газопроводов и компрессорных станций, которые будут снабжать установку рекуперации газом, который мы будем использовать в качестве мотор-генератора, вырабатывающего электроэнергию из биогаза. Из 1 м³ биогаза можно получить 1,3-1,5 кВт электроэнергии. При полном использовании запасов биогаза можно производить 665 тыс. кВт электроэнергии в год. В случае более крупных свалок производство электроэнергии может быть значительно выше.

Для выработки 1 мВт энергии необходима подача биогаза в количестве 525 м³/ч. Считается, что одна скважина дает до 80 м³/ч газа. Высокая плотность мусора позволяет извлекать газ с большой скоростью. Типичная свалка может производить газ в течение 10-12 лет. Максимальная производительность приходится на четвертый год, затем медленно снижается.

На рис. 2 представлена схема утилизации отходов с последующим извлечением биогаза.

На полигоне в свалке бурят скважину на глубину не менее 10 м и укладывают стальную трубу с перфорацией в нижней части. Затрубное пространство хранилища заполняется гранулированным материалом. Верхняя часть затрубного пространства забетонирована для предотвращения попадания воздуха в скважину. Типичное оборудование для сбора биогаза состоит из всасывающего трубопровода, диафрагменного расходомера и задвижки для регулирования потока. Газ отсасывается и направляется по трубопроводам потребителю в качестве топлива или электроэнергии.

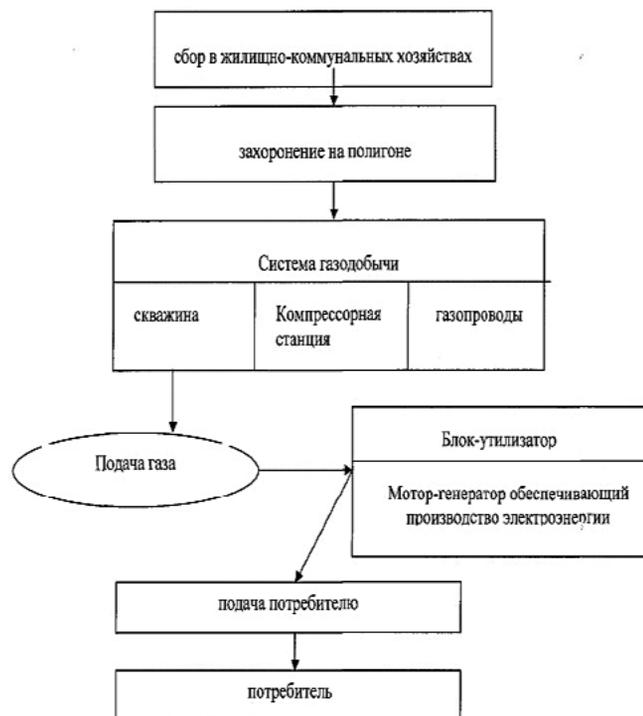


Рис. 2. Схема захоронения ТБО с дальнейшим получением и использованием биогаза в виде топлива или электроэнергии

Технология малогабаритного биогаза воплощает в себе возможность решить проблему доступа к энергии для развивающихся стран с невысоким уровнем дохода [12]. Биогазовые установки могут уменьшить энергетическую бедность и обеспечить чистую энергию для приготовления пищи и освещения в сельских районах, где отсутствует энергетическая инфраструктура.

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Различные технологии, в том числе поршневые двигатели внутреннего сгорания, турбины, микротурбины и топливные элементы могут использоваться для выработки электроэнергии для использования на месте и/или продажи в сеть. Поршневой двигатель является наиболее часто используемой технологией преобразования свалочного газа в электроэнергию из-за его относительно низкой стоимости, высокой эффективности и размеров, которые дополняют выход газа на многих свалках. Газовые турбины обычно используются в более крупных энергетических проектах по свалке, тогда как микротурбины обычно используются для меньших объемов свалочного газа и в нишевых приложениях.

В проектах когенерации, также известной как комбинированное производство тепла и электроэнергии (ТЭЦ), свалочный газ используется для выработки как электроэнергии, так и тепловой энергии, обычно в виде пара или горячей воды. Несколько проектов когенерации с использованием двигателей или турбин были установлены на промышленных, коммерческих и институциональных объектах с использованием двигателей или турбин. Повышение эффективности за счет использования тепловой энергии в дополнение к производству электроэнергии может сделать этот тип проекта очень привлекательным.

ТИПЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ НА СВАЛОЧНОМ ГАЗЕ

Более 70 процентов всех проектов по производству электроэнергии на свалках используют поршневые двигатели внутреннего сгорания (РР) для создания электростанций, работающих на свалочном газе. РР – это форма двигателя внутреннего сгорания, которую часто можно увидеть на свалках. Они выбраны из-за относительно низкой стоимости, высокой эффективности, а доступные модели подходят для большинства свалок. Остальные представляют собой газовые турбины в двух формах: «турбины» для крупных свалок с высоким выходом свалочного газа и микротурбины для небольших свалок.

Ожидается, что в будущем свалочный газ (биогаз) будет сжигаться с более высокой эффективностью, чем могут достичь двигатели внутреннего сгорания в топливных элементах. Однако автору этой статьи на сегодняшний день не известно ни о каком подобном использовании биогазовых топливных элементов.

В следующем абзаце мы предоставим более подробную информацию о трех вышеупомянутых типах электростанций, работающих на свалочном газе. Они перечислены как двигатели внутреннего сгорания со следующими вариантами конструкции:

- возвратно-поступательный поршень (РР)
- газовая турбина и
- микротурбина.

ПОРШНЕВЫЕ (РР) ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Двигатели РР обычно достигают КПД от 25 до 35 процентов на свалочном газе. Тем не менее, двигатели РР могут быть добавлены или удалены в соответствии с тенденциями использования газа. Каждый двигатель может развивать мощность от 150 кВт до 3 МВт, в зависимости от расхода газа.

Двигатель РР (менее 1 МВт) обычно может стоить 2 300 долларов за кВт с годовыми затратами на эксплуатацию и техническое обслуживание в размере 210 долларов за кВт. Двигатель РР (мощностью более 800 кВт) обычно может стоить 1 700 долларов за кВт с годовыми затратами на эксплуатацию и техническое обслуживание в размере 180 долларов за кВт. Оценки даны в долларах 2010 года.

ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Газовые турбины, еще одна форма двигателя внутреннего сгорания, обычно имеют эффективность от 20 до 28 процентов при полной нагрузке на свалочном газе. КПД падает, когда турбина работает с частичной нагрузкой. Газовые турбины имеют относительно низкие затраты на техническое обслуживание и выбросы оксидов азота по сравнению с двигателями РР. Газовые турбины требуют высокой степени сжатия газа, которая использует больше электроэнергии для сжатия, что снижает эффективность.

Газовые турбины также более устойчивы к коррозионным повреждениям, чем двигатели РР. Газовые турбины требуют минимум 1 300 кубических футов в минуту и обычно превышают 2 100 кубических футов в минуту и могут генерировать от 1 до 10 МВт. Газовая турбина (мощностью более 3 МВт)

обычно может стоить 1 400 долларов за кВт, а ежегодные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание составляют 130 долларов за кВт. Оценки даны в долларах 2010 года.

МИКРОТУРБИНЫ

Микротурбины могут производить электроэнергию с меньшим количеством свалочного газа, чем газовые турбины или двигатели РР. Микротурбины могут работать на скорости от 20 до 200 кубических футов в минуту и выделяют меньше оксидов азота, чем двигатели РР. Кроме того, они могут работать с меньшим содержанием метана (всего 35 процентов). Микротурбины требуют обширной обработки газа и бывают мощностью 30, 70 и 250 кВт.

Микротурбина (менее 1 МВт) обычно может стоить 5 500 долларов за кВт при годовых затратах на эксплуатацию и техническое обслуживание в размере 380 долларов за кВт. Оценки даны в долларах 2010 года [13].

На количество производимого биогаза влияют: состав, возраст, плотность, температура и влажность отходов; площадь, глубина, режим эксплуатации и рекультивации хранилища отходов; водный баланс хранилища. В простейшем случае газы могут собираться и подаваться в качестве топлива потребителю по трубам. Поскольку биогаз может содержать сероводород и галогенпроизводные углеводороды, его необходимо очищать, чтобы использовать в качестве топлива для газовых двигателей. Сероводород извлекается на первой стадии, а галогенпроизводные углеводороды удаляются на второй стадии.

Таблица 1.

Количество биогаза, которое возможно извлечь со свалок городов и посёлков ЛНР

Населенный пункт	Количество ТБО (тыс. т)	Количество биогаза (тыс. м ³)	Использование биогаза	
			Теплота сгорания (тыс. МДж/м ³)	Количество электроэнергии (тыс. кВт)
Луганская агломерация	229,2	2292	48 132	3 209
Свердловская агломерация	82,8	828	17 388	1 159
Южно-Луганская агломерация	187,2	1872	39 312	2 621
Центрально-Луганская агломерация	244,3	2443	51 303	3 420
Всего	743,5	7435	156 135	10 409

В обоих случаях в качестве очищающего вещества используется активированный уголь. В первом случае он играет роль катализатора при превращении сероводорода в элементарную серу: $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$. Активный уголь, на котором осажается элементарная сера, периодически заменяется свежим. На второй стадии активный уголь играет роль

адсорбента. Для выработки 1 МВт энергии необходима подача биогаза в количестве 525 м³/ч. Высокая плотность мусора позволяет извлекать газ с большой скоростью.

Анализ морфологического состава ТБО на свалке в Луганске говорит о наличии большого количества органических отходов, которые могут разлагаться с образованием биогаза.

Отмечается, что при разложении 1 тонны ТБО образуется 100-150 м³ биогаза. С учетом использования свалок со сроком эксплуатации более 10 лет можно получить в Луганской агломерации 230 млн. м³ потенциального количества биогаза; в других агломерациях – 514 млн. м³ (таблица 1).

В Санкт-Петербургском государственном техническом университете разработан пилот-проект системы сбора биогаза на полигоне ТБО г. Тосно с объемом свалочных отложений около 1 млн. м³. Проведенные расчеты показали, что общее количество биогаза, выделившегося за 20 летний период эксплуатации системы по его сбору составляет 20-30 млн. м³ (или около 1 млн. м³/год). Такое количество биогаза достаточно для эксплуатации энергетической установки мощностью порядка 1 МВт. К настоящему времени накоплен значительный практический опыт по использованию биогаза из хранилищ мусора и отходов.

Выход биогаза с полигонов ТБО может возрасти в 1,5-2 раза, если к бытовому мусору добавлять осадок станций биологической очистки сточных вод. При этом может быть решена крайне актуальная проблема осадков городских очистных сооружений.

Рассмотрим преимущества и недостатки производства биогаза (таблица 2).

Таблица 2.
Преимущества и недостатки производства биогаза [14]

Преимущества	Недостатки
Источник возобновляемой энергии	Необходимость гарантированного сбыта производственной электроэнергии
Доступность сырья для производства биогаза, полное отсутствие топливных затрат в структуре операционных расходов. В 95 % случаев отходы достаются собственнику бесплатно	Существенные капитальные затраты в расчете на единицу мощности
Экологически безвредное среднекалорийное газовое топливо	Отсутствие гарантированного снабжения генерирующих объектов отходами, закрепленного на законодательном уровне
Территориальная гибкость: биогазовые установки не требуют сетевой инфраструктуры и строительства дорогостоящих газопроводов и могут быть размещены в любом районе	Отсутствие законодательных требований о полной переработке перебродившей массы в чистую воду и комплексные удобрения
Технологическая гибкость: использование биотоплива дает возможность получения одновременно нескольких видов энергоресурсов – газа, тепла, моторного топлива, электроэнергии	Узкий диапазон рентабельных проектов

Для конкретных территорий внедрение биогаза будет способствовать сокращению количества отходов и объемов их накопления, уменьшению местного загрязнения воздуха благодаря меньшему количеству вредных выбросов, сокращению содержания органических веществ в отходах и сточных водах, уменьшению использования химических удобрений.

ВЫВОДЫ

Производство биогаза является эффективной и инвестиционно привлекательной технологией, которая обуславливается наличием значительного сырьевого потенциала, благоприятными природно-климатическими условиями и низким уровнем себестоимости этого вида энергии. Т.е. производство биогаза из отходов всех источников (сельскохозяйственных, лесных, промышленных и бытовых) для производства комбинированной тепловой и электрической энергии является очень эффективной мерой по снижению выбросов парниковых газов. Утилизация биогаза позволит не только частично обеспечить местные потребности в топливе, но и будет способствовать улучшению качества окружающей среды, снижению пожароопасности свалочных отложений и т.д.

Список литературы

1. Зайнутдинова, А. Ф. Анализ перспектив использования биогаза в России. /А. Ф. Зайнутдинова, А. Р. Садыкова, Л. Ф. Ильгамова, И. В. Мухаметова // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, vol. 5-2 (56), 2021. – С. 181-183.
2. Amini, S Investigation of biogas as renewable energy source / S. Amini, P. Ordoney, L. Khuzestan // *Int. J. Agric. Crop Sci.* 2013. – pp. 1453-1457
3. Bharathiraja, B. Biogas production – A review on composition, fuel properties, feedstock and principles of anaerobic digestion / B. Bharathiraja, T. Sudharsana, J. Jayamuthunagai, R. Praveenkumar,.; S. Chozhavendhan, J. Iyyappan, // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. – pp. 570-582
4. Метан на рынке. [Электронный ресурс]: Главная статья / - *Электрон. журн. - Русдем-Энергоэффект, 2007-2010.* - Режим доступа: <http://www.methanetomarkets.ru>
5. Schiopu, AMMunicipal solid waste landfilling and treatment of resulting liquid effluents / Ana-Maria Schiopu, M. Gavrilesu // *Environmental Engineering and Management Journal* 9(7):993-1019, 2010. – pp.993-1019
6. Загорская, Е. Добыча и утилизация свалочного газа для выработки электроэнергии и сокращения выбросов парниковых газов [Электронный ресурс]: презентация компании Green Light Energy Solutions / Е. Загорская. – Режим доступа: <http://www.glesllc.com/>
7. Плохих, И. Н. Энергия – вокруг нас. Моторные мины-ТЭС на вторичном топливе. Примеры использования и утилизации «дармовой» энергии. [Электронный ресурс]: статья/ И. Н. Плохих // *АКВА-ТЕРМ, 2001.* – Режим доступа: <http://www.esist.ru/>
8. Колганов, Д. Метан на рынке [Электронный ресурс]: статья / Д. Колганов. // *Электрон. журн. – Русдем-Энергоэффект, 2007-2010.* - Режим доступа: <http://www.methanetomarkets.ru>

9. Ваваева, М. С. Биогаз как современный источник энергоресурсов в Белгородской области / М. С. Ваваева, М. В. Марушко // *Образование, наука, производство*, 2015. – С.1212-1216.
10. IEA Bioenergy Task 37 – Country Reports Summaries 2019. [Электронный ресурс]. – Режим доступа - URL: <http://task37.ieabioenergy.com>
11. Свалочный газ [Электронный ресурс]: статья / Теплосоюз Украина; Технологии и инновации, 2007-2009. – Режим доступа: <http://www.teplosouyz.com/>
12. Somanathan, E. Biogas: Clean Energy Access with Low-Cost Mitigation of Climate Chang / E. Somanathan, R. Bluffstone // *e. Environ. Resour. Econ.*, 2015.- pp. 265-277, doi:10.1007/s10640-015-9961-6
13. Landfill Gas Power Plants [https://landfill-gas.com/power-plants 2019](https://landfill-gas.com/power-plants-2019)
14. Бойнрав, Л. В. Перспективы использования биогаза в России / Л. В. Бойнрав, А. В. Калямова, А. В. Румянцева // Система управления экологической безопасностью: сборник трудов XIV международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 20-21 мая 2020 г.) включает статьи, посвященные различным теоретическим и практическим аспектам экологической безопасности. - Екатеринбург: УрФУ, 2020. - С. 226-231.