

© А.А. Юрченко¹, Д.В. Куликова¹, Е.А. Дмитрук¹, Л.Н. Чеберячко², И.Н. Безпятьй¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² КУ «Подгородненский УВК №3», Подгородное, Украина

УТИЛИЗАЦИЯ БИОГАЗА ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

© A. Yurchenko¹, D. Kulikova¹, E. Dmitruk¹, L. Cheberiyachko², I. Bezpiaty¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Podgorodnenskaya secondary school № 3, Dnipro, Ukraine

MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS BIOGAS UTILIZATION

Цель. Выполнить анализ методов и средств утилизации биогаза полигонов твёрдых бытовых отходов, разработать технологическую схему утилизации биогаза и критерии безопасности процесса утилизации.

Методика исследований. Для решения поставленных задач в работе использованы: аналитический метод – для исследования физико-химических процессов образования биогаза в свалках бытовых отходов; методы сигнатурной математики – для разработки критериев безопасности работы системы утилизации биогаза.

Результаты исследований. Выполнен анализ состояния вопроса утилизации биогаза полигонов твердых бытовых отходов как в мировой практике, так и в Украине. Дан прогноз по объёмам добычи метана на полигонах твёрдых бытовых отходов. Оценено снижение выбросов парниковых газов в атмосферу. Разработана структурная схема системы утилизации биогаза. Установлено, что в зависимости от местных условий, скорость откачки свалочного газа из одной скважины составляет от 5-50 м³/ч до 250 м³/ч. Радиус влияния скважины для откачки свалочного газа изменяется в пределах 8-80 м со средним значением 30-35 м. Расстояние между скважинами не должно быть меньше удвоенного радиуса влияния. Разработанные критерии безопасности позволяют предотвратить взрывы метана в процессе утилизации биогаза.

Научная новизна. Получили дальнейшее развитие методы обеспечения безопасной эксплуатации системы утилизации взрывчатых газов, которые предусматривают не только мониторинг концентрации метана в точках контроля, а и концентрации кислорода в этих же точках. Это обусловлено тем, что соотношение кислорода и метана является определяющим фактором, который влияет на взрывчатость метано-воздушных смесей.

Практическое значение. Разработана упрощённая структурная схема утилизации биогаза малых полигонов для добычи сжатого метана, технические средства которой мобильны и смонтированы в контейнерах. Разработаны критерии безопасности при эксплуатации этой системы утилизации биогаза. Разработанная технологическая схема может быть применена для утилизации метана на полигонах твердых бытовых отходов емкостью менее 100 тыс. т.

Ключевые слова: полигон, отходы, биогаз, утилизация, система, технические средства, эксплуатация, критерии безопасности

Введение. Одна из главных проблем защиты окружающей среды сегодня – загрязнение экосистемы бытовыми и промышленными отходами. Любой полигон твердых бытовых отходов (ПТБО) представляет собой большой биохимиче-

ский реактор, в недрах которого в процессе эксплуатации, а также в течение нескольких десятилетий после закрытия, в результате анаэробного разложения отходов растительного и животного происхождения образуется биогаз или, как его иногда называют, свалочный газ [1-3].

Согласно данным международной организации Global Methane Initiative общий объем антропогенных выбросов метана во всем мире к 2020 году вырастет на 15% процентов в сравнении с показателем десятилетней давности и составит 7904 млн тонн CO₂ экв. Известно, что около десяти процентов всех метановых выбросов в атмосферу приходится на мусорные полигоны, основной объем которых может быть не просто утилизирован, а применен в качестве топлива для электростанций на основе генераторов ДВС.

Для сравнения: потенциал биогаза ПТБО в США составляет около 13 млрд. м³/год, в странах ЕС – около 9 млрд. м³/год. Украина, потенциал которой оценивается 1,5 млрд м³/год, в этом отношении находится на начальной стадии, используя его всего лишь на несколько процентов [4].

Свободное распространение биогаза приводит к загрязнению атмосферы прилегающих территорий токсичными и дурно пахнущими соединениями. Свалочный газ является парниковым газом, который усиливает эффект изменения климата Земли в целом. Глобальная эмиссия биогаза является важным параметром для расчета прогнозных моделей изменения климата, так как при поступлении биогаза в природную среду формируются негативные эффекты как локального, так и глобального характера. По этой причине во многих развитых странах мира осуществляются специальные мероприятия по минимизации эмиссии свалочного газа [5]. Свалочный газ оказывает губительное воздействие на растительный покров, так как его накопление в поровом пространстве почвенного покрова вызывает асфиксию корневой системы, а так же является пожароопасным и взрывоопасным.

Постановка задачи. Получение биогаза из органических отходов основано на их свойствах выделять горючий газ в результате так называемого «метанового сбраживания» в анаэробных (без доступа воздуха) условиях. Биогаз, который образуется при метановом сбраживании, представляет собой смесь, состоящую из 50-80 % метана, 20-50 % углекислого газа, примерно 1 % сероводорода, а также незначительного количества некоторых других газов (азота, кислорода, водорода, аммиака, хлора, закиси углерода и др.). При этом 1 м³ метана при сгорании выделяет энергию, равную примерно 20-25 МДж. [3-5]

Наиболее рентабельным для установки систем сбора и утилизации свалочного газа являются полигоны областных центров и городов с населением от 100 тыс. человек. На небольших свалках рационально устанавливать оборудование для использования свалочного газа в передвижных контейнерах, что позволяет избегать затрат на строительство здания. Передвижные контейнеры могут легко перемещаться с одной свалки на другую при выработке существующего потенциала биогаза.

Поэтому, наряду с утилизацией метана пластов угля и выработанных про-

странств закрывающихся шахт, необходимо разработать методы и средства утилизации биогаза мелких полигонов посёлков с числом жителей меньше 100 тысяч, а также критерии безопасности их эксплуатации.

Анализ предыдущих исследований. 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 [4-6].

Метан (тепличный газ) и углекислый газ являются основными факторами, способствующими глобальному потеплению и росту парникового эффекта. Вредное воздействие метана на окружающую среду в 21 раз превышает негативное влияние углекислого газа. Поэтому захват метана – лучший краткосрочный способ предотвращения глобального потепления [3]. Бесконтрольно выделяясь, биогаз затрудняет или делает невозможной планомерную регенерацию территории свалки, распространяя неприятный запах. Накапливаясь, он может служить источником энергии [5-8].

Проведем оценку потенциала свалочного газа в Украине. Предварительные расчёты показывают, что ежегодно в Украине образуется 12,6 млн. т ТБО (300 кг/год на каждого жителя из 42 миллионов населения). Из них на свалках подлежат захоронению 11,3 млн. т (90%). Выход доступного для сбора и использования свалочного газа – 100 м³/т. Таким образом, в целом по Украине эмиссия биогаза полигонов твердых бытовых отходов составляет 1,13 млрд. м³.

По энергетическому потенциалу 1 м³ биогаза соответствует 0,5 м³ природного газа. Газо-энергетический потенциал полигона, на котором размещен 1 млн. т твердых бытовых отходов с влажностью 40%, можно рассматривать как техногенное месторождение с запасами 50-60 млн. м³ природного газа, что по Украине в целом составляет 500-600 млн. м³ [6-8].

Органическое вещество разлагается на свалках приблизительно в течение 20 лет. Активное газообразование в толще складированных отходов начинается примерно с третьего года от начала складирования, постепенно нарастая, и продолжается 10-15 лет, после чего процесс постепенно замедляется. Поэтому при среднем выходе свалочного газа 100 м³/т ТБО средняя скорость выхода его принимается, как правило, 5 м³/т ТБО в год [3]. Эта цифра подтверждается данными по эксплуатации 86 систем сбора свалочного газа в различных странах [7-9].

При этом утилизация биогаза в количестве 1 млн. м³ в год, (в т.ч. его сжигание) дает снижение выбросов парниковых газов на 8,3 тыс. тонн в СО₂ эквиваленте и сокращает потребление угля на 20% [9-11]. Условия успешных реализаций проектов зависят от объёма накопленных отходов (более 1 млн. тонн), от глубины их залегания (более 10 м), а также от рекультивации самой свалки (перекрытия слоёв грунта мощностью не менее 30-40 см).

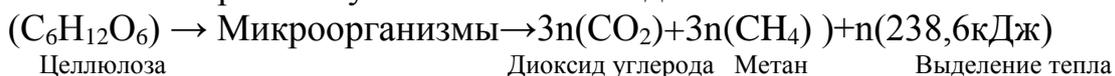
Только крупные города Украины производят ТБО в год 10 млн. т. Около 90% их собирается и вывозится на 656 свалок, расположенных в 10-20 км от городов. В среднем на одного жителя Украины приходится 0,8-1,0 кг ТБО в сутки [10].

Созданы экспериментальные установки, разрабатываются конструкции скважин, взрывобезопасное оборудование для откачки свалочного газа и его использования в качестве моторного топлива в стационарных энергоустановках, а также для заправки транспорта [9, 11].

В настоящее время биогаз в основном используется в виде энергетического топлива для сжигания в тепловых котлах и различных двигателях-генераторах. Если биогаз не применяется, то его избыточные объёмы факельно сжигают для предотвращения эмиссии метана в атмосферу [12]. При сжигании метана свалочный газ превращается в углекислый, который, так или иначе, попал бы в атмосферу при разложении биомассы. Таким образом, использование биогаза в качестве источника энергии не увеличивает количество атмосферного углекислого газа, а значит он аналогично энергии, полученной путём сжигания древесины, является безвредным для природы энергоносителем.

Основная часть. По статистическим данным на 2018 год численность населения Украины составляет 42098982 человек, которые проживают в следующих населённых пунктах: города – 460 (из которых 51 с числом жителей более 100 тысяч); посёлки городского типа – 885; сельские населённые пункты – 28377. Таким образом, только число малых городов и посёлков городского типа составляет 1294. Эти населённые пункты имеют полигоны твёрдых бытовых отходов, а зачастую и несанкционированные свалки, с объёмом свалочного тела менее 30 тыс. т и считаются нерентабельными для обустройства систем утилизации биогаза. Поэтому они, как правило, не предусматривают выполнения мероприятий по предотвращению эмиссии биогаза в атмосферу и поступления фильтрата в подземные воды.

Биогаз образуется в результате биохимических процессов, протекающих в аэробной зоне свалочного тела. Суммарная биохимическая реакция разложения целлюлозы в анаэробных условиях имеет вид:



Как видно из суммарной биохимической реакции разложения целлюлозы, протекающей в анаэробных условиях, 50% углерода целлюлозы окисляется до диоксида углерода, а 50% восстанавливается до метана с выделением 238,6 кДж тепла на 1 моль глюкозы. При этом этиловый спирт превращается в уксусную кислоту, а уксусная кислота – в диоксид углерода и метан, главным образом под влиянием жизнедеятельности соответствующих бактерий и микроорганизмов.

В процессе эмиссии из толщи свалки на поверхность биогаз вытесняет воздух, присутствующий в верхних слоях отходов и в укрывающей их почве. В результате этого у большинства растений, растущих на поверхности свалки, особенно культурных, задерживается рост, а в отдельных случаях многие из них погибают из-за нехватки кислорода в корнеобитаемом слое.

Нами разработана технологическая схема сбора и утилизации биогаза полигонов твёрдых бытовых отходов малых посёлков в регионе закрытия шахт (рис. 1). Выделенный под свалку участок земной поверхности оконтуривается ограждающей дамбой 4 из природных материальных материалов (глина, песок, гравий,

щебень и др.).

Система сбора биогаза предусматривает бурение скважин 1 диаметром 350 мм на всю глубину свалочного тела. Внутри образовавшегося пространства вставляют перфорированную трубу диаметром 168 мм, снаружи обмотанную фильтровой сеткой. В нижней части устраивают отстойник высотой 3 м, выше отстойника – фильтровое звено высотой, равной толщe свалочного тела минус 1 м. Выше фильтрового звена проходит гладкая целиковая труба того же диаметра на высоту на 2 м выше дневной рекультивируемой поверхности. Далее пространство между обсадной трубой и газоотводящей камерой засыпают гравием и по мере отсыпки гравия извлекают обсадную трубу. Вокруг устья газоотводящей скважины устраивают бетонную отмостку толщиной 0,5 м и размером в плане 0,5x0,5 м. Со скважин биогаз поступает в систему его удаления по гибким трубопроводам из полимерных материалов 2 для направления его к фильтру 8.

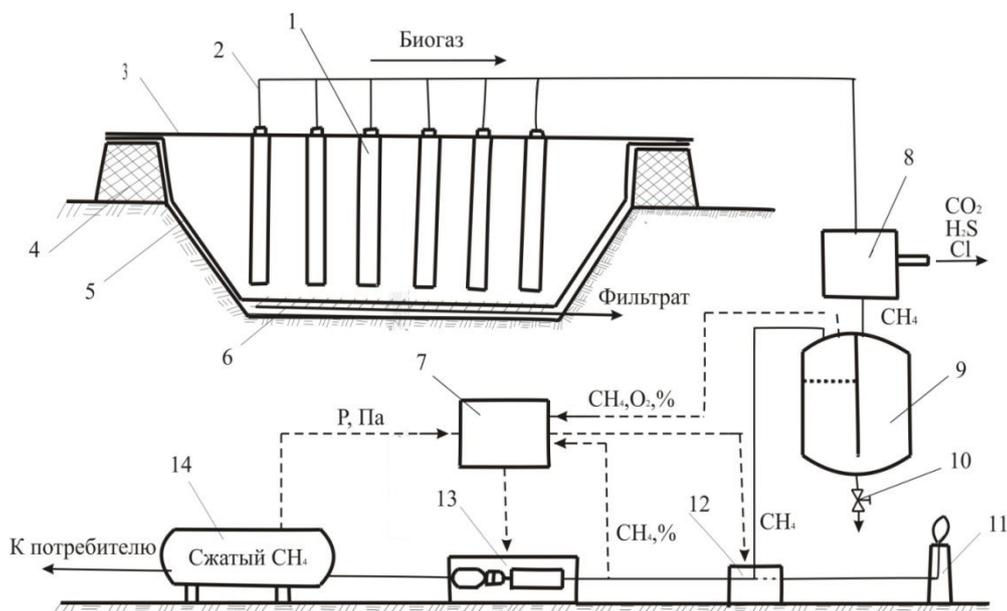


Рис. 1. Технологическая схема сбора и утилизации биогаза полигона твёрдых бытовых отходов: 1 – скважины; 2 – трубопровод; 3 – укрытие поверхности свалки; 4 – ограждающая дамба; 5 – противофильтрационный экран; 6 – дренажная система; 7 – модуль мониторинга и управления; 8 – фильтр; 9 – газовое хранилище; 10 – патрубок с вентилем для слива конденсата; 11 – устройство для факельного сжигания метана; 12 – распределительный узел; 13 – компрессор; 14 – гальдозер

В зависимости от местных условий, скорость откачки свалочного газа из одной скважины от 5-50 м³/ч до 250 м³/ч. Радиус влияния скважины для откачки свалочного газа изменяется в пределах 8-80 м со средним значением 30-35 м. Расстояние между скважинами не должно быть меньше удвоенного радиуса влияния.

Одним из многих методов локализации и предотвращения распространения загрязняющих веществ является капсуляция, позволяющая устранить такие

опасности, исходящие от свалок, как загрязнение прилегающих земель, грунтовых вод, загазирование атмосферного воздуха и др. Важнейшими составными элементами капсуляции является герметичное основание (противофильтрационный экран) 5 и плотная заделка поверхности свалки 3.

В результате смешивания просачивающихся вод с загрязняющимися веществами, содержащимися в свалочном теле и образующимися в результате протекания процессов деструкции, сбраживания, гумификации органического вещества и других процессов, в основании свалочного тела скапливается фильтрат. Фильтрат представляет собой токсичный раствор с содержанием минеральных частиц до нескольких десятков граммов на 1 л, ионов аммония, хлора и других микрокомпонентов, а также высоким содержанием тяжёлых металлов (цинк, свинец, никель, хром, кадмий и др.).

Для снижения вероятности проникновения фильтрата в горные породы зоны аэрации и затем на поверхность грунтовых вод до начала эксплуатации полигона выполняют защиту горных пород в его основании. Нами предусмотрено применение геосинтетических материалов при устройстве противофильтрационных экранов 5 в основании полигона (рис. 1).

С целью разгрузки гидростатического давления фильтрата на противофильтрационный экран 5 в основании полигона предусмотрена дренажная система 6. Система сбора фильтрата предназначена для отвода отходов по трубам в изолированные водоприёмные ёмкости, расположенные за пределами насыпи и рассчитанные на периодическую их откачку в систему городской канализации или в автоцистерны с целью последующего вывоза на ближайшие очистные сооружения.

Технические средства системы утилизации биогаза представлены фильтром 8, газовым хранилищем 9, распределительным узлом 12, устройством безопасного факельного сжигания метана 11, компрессором 13, модулем мониторинга и управления 7 и гальдозером 14 для аккумуляирования сжатого газа, который отправляется потребителям.

Необходимость наличия фильтра обусловлена тем, что сырой биогаз насыщен водяным паром и содержит, наряду с метаном (CH_4) и двуокисью углерода (CO_2), также существенное количество сероводорода (H_2S). Чтобы защитить агрегаты газоподготовки от сильного износа, поломки и выполнять требования последующих ступеней очистки, водяной пар, сероводород и двуокись углерода из биогаза нужно удалить.

На сегодняшний день существует три основных способа очистки биогаза: метод жидкого (мокрого) и твёрдого (сухого) химического поглощения примесей (абсорбционный и адсорбционный), метод мембранного разделения и вымораживания (криогенный метод) [9-11].

Мембранная технология является относительной новинкой в сфере подготовки биогаза. При использовании мембранных технологий разделение метана и других компонентов газа обеспечивается благодаря разным скоростям диффузии молекул различных газов.

После фильтра очищенный метан поступает в газовое хранилище 9, а выделенный сероводород, углекислый газ и хлор поступает в систему их разделения и утилизации. Газовое хранилище 9 предназначено для отделения конденсата из метана после фильтрации биогаза, а также его осушки. Здесь концентрация метана не должна быть ниже 95%. Патрубок с вентилем 10 предназначен для слива конденсата.

Из газового хранилища 9 метан под действием разряжения, создаваемого компрессором 13, поступает в распределительный узел 12, который направляет метан на вход компрессора или, в случае аварийной ситуации или остановки компрессора, к устройству факельного сжигания метана 11.

С компрессора метан поступает в гальдозер 14 с номинальным рабочим давлением 20 МПа, с которого сжатый метан направляется к потребителю. При достижении номинального давления метана в гальдозере поступающий с компрессора сжатый метан направляется на резервный гальдозер или при отсутствии такового компрессор по команде модуля управления 7 останавливается, а метан посредством переключения распределительного узла направляется в устройство для факельного его сжигания.

Нижний предел взрываемости (НПВ) и предельная концентрация кислорода (ПКК) наглядно представлены на диаграмме взрываемости метано-воздушных смесей (рис. 2) [12].

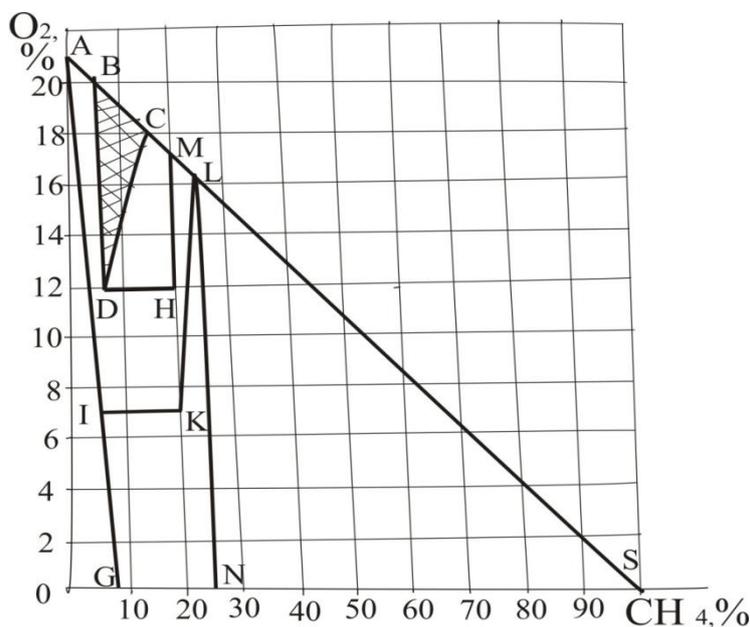


Рис. 2. Диаграмма взрывоопасных метановоздушных смесей

Из этой диаграммы следует то, что все практически осуществимые смеси метана с атмосферным воздухом представлены площадью ниже линии AL. Точка В соответствует нижнему концентрационному пределу взрывчатости метана в воздухе (5% метана и 95% воздуха), а точка С – верхнему (ВПВ, 15% метана и 85% воздуха). Точка D соответствует нижнему концентрационному пределу

взрывчатости смеси по кислороду ПКК (НПВ- 6% по метану и ПКК- 12% по кислороду.) Точки В, С и D замыкают контур, называемый треугольником взрывчатости, в пределах которого метано-воздушная смесь взрывоопасна. Линия ВD является линией нижних, а линия CD - верхних концентрационных пределов взрывчатости. Область, ограниченная контуром АGOА, составляет зону невзрывчатых смесей метана с кислородом воздуха, а область справа от линии CD, ограниченная контуром DНМС, - зону невзрывчатых смесей метана с кислородом воздуха, но которые могут стать взрывчатыми при концентрации кислорода свыше 12%.

Нами настоятельно рекомендуется в отношении ПКК в диапазоне концентраций метана от 5% до 20% делать поправку на запас надежности – 4% об. д кислорода, т.е. ПКК должен быть равен 8 % об.д При этом ПКК в технологических процессах, использующих метан, с учетом погрешностей измерения кислорода не должен превышать 7% об. д, (граница по линии ІК для указанного диапазона концентраций метана от 5% до 20%).

На основании анализа диаграммы и коэффициентов безопасности методом экспертных оценок нами сделано заключение о возможности повышения ресурсосбережения метана с концентрациями ниже 25% путем регламентирования выброса в атмосферу объемов его добычи с учетом границ взрывобезопасности, определяемых соотношением одновременно измеряемых концентраций кислорода и метана. При этом часть смеси области АLNOА, на рис. 2, не выбрасывать в атмосферу. Как видно из рис. 2, область, ограниченная линиями АІKLNOА отделена от взрывоопасного треугольника ВСD справа – более чем 10% об. д по метану(граница LK), снизу – на 5% об. д ниже ПКК и слева (граница АІ) находится во взрывобезопасной зоне. На этом основании нами рекомендуется метано-воздушную смесь области АІKLNOА с параметрами ниже границ АІKLН определять как взрывобезопасную и использовать ее при извлечении, транспортировании, хранении и утилизации.

Результаты аналитических исследований и эвристического поиска, представленных на диаграмме (рис. 2) свидетельствуют о том, что в диапазоне концентраций метана от 0 до 5% об. д, значение концентрации кислорода, определяющие взрывобезопасность метано-воздушной смеси, обратно пропорционально концентрации метана, а в диапазоне концентраций метана от 20 до 25% об. д прямо пропорционально концентрации метана, а при концентрации кислорода ниже 7% об. д, смесь не воспламеняется и не взрывается. Эта закономерность дает основание для установления критерия безопасности, при транспортировании метана дегазационными трубопроводами и при подготовке его к утилизации в виде уравнений (1), (2) и (3):

Граница (АІ) от 0 до 5% CH_4

$$K_{61} = \frac{7 + |K_{\text{CH}_4} - 5| \cdot 2,6 - K_{\text{O}_2}}{7 + |K_{\text{CH}_4} - 5| \cdot 2,6} \cdot 20^{0,5[1 - \text{Sign}(7 + |K_{\text{CH}_4} - 5| \cdot 2,6 - K_{\text{O}_2})]}, \quad (1)$$

Граница (ІК) от 5 до 20 % CH_4

$$K_{62} = \frac{7 - K_{O_2}}{7} \cdot 20^{0,5[1 - \text{Sign}(7 - K_{O_2})]} \quad (2)$$

Граница (KL) от 20 до 25% CH₄

$$K_{63} = \frac{20 + (K_{CH_4} - 20) \cdot 1,6 - K_{O_2}}{20 + (K_{CH_4} - 20) \cdot 1,6} \cdot 20^{0,5[1 - \text{Sign}(20 + (K_{CH_4} - 20) \cdot 1,6 - K_{O_2})]} \quad (3)$$

где K_{61} – коэффициент взрывобезопасности для границы AI; K_{62} – коэффициент взрывобезопасности для границы IK; K_{63} – коэффициент взрывобезопасности для границы KL; K_{CH_4} – измеренная концентрация метана, %; K_{O_2} – измеренная концентрация кислорода, %.

Уравнения (1, 2, 3) получены методами сигнатурной математики для решения краевых задач в информационно-управляемых пространствах технологических процессов утилизации биогаза.

Выводы. 1. Биогаз полигонов твердых бытовых отходов является возобновляемым источником добычи углеводородов, запасы которого на Украине по предварительным расчетам составляют 1,5 млрд. м³/год.

2. Разработанная технологическая схема утилизации биогаза полигонов твердых бытовых отходов, технические средства которой смонтированы в контейнерах, может быть применена для получения метана при утилизации биогаза полигонов твердых бытовых отходов емкостью менее 100 тыс. т.

3. Разработанные критерии безопасности позволяют предотвратить взрывы метана в процессе утилизации биогаза и аварийные ситуации на гальдозере.

4. Утилизация биогаза полигонов твердых бытовых отходов может не только улучшить экологическое состояние городов, но и внести существенный вклад в энергетическую независимость Украины.

Перечень ссылок

1. Пухнюк, А.Ю., Куцкий, Д.В., & Матвеев, Ю.Б. (2012). Полевые исследования для оценки потенциала образования биогаза на полигонах твердых бытовых отходов Украины. *Коммунальне господарство міст*, 105, 482-495.
2. Пятничко, А.И., & Жук, Г.В. (2010). Результат обследования полигонов ТБО Украины для установления объемов добычи и состава биогаза. *Технические газы*, 2, 63-66.
3. Куцкий, Д.В., Матвеев, Ю.Б., & Пухнюк, А.Ю. (2011). Тенденции развития технологий энергетической утилизации биогаза с производством электроэнергии на полигонах ТБО. *Коммунальная и промышленная теплоэнергетика*, 6, 64-72.
4. Коровяка, Е.А., Василенко, Е.А., & Манукян, Э.С. (2014). Регенерация метана, выделяемого мусорными свалками, и возможности его утилизации в Днепропетровском регионе. *Геотехнічна механіка*, 117, 215-224.
5. Гелетуха, Г.Г., & Марценюк, З.А. (1999). Обзор технологий добычи и использования биогаза на свалках и полигонах твердых бытовых отходов и перспективы их развития в Украине. *Экотехнологии и ресурсосбережения*, 4, 6-14.
6. Вамболь, С. А., Шахов, Ю. В., Вамболь, В. В., & Петухов, И. И. (2016). A mathematical description of the separation of gas mixtures generated by the thermal utilization of waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(2(79)), 35. doi:10.15587/1729-4061.2016.60486
7. Курс, О.В., Ткаченко, С.І., & Семененко, Н.В. (2010). Способи утилізації біогазу. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, 7, 20-30.

8. Жук, Г.В., Пятничко, А.И., & Баннов, В.Е. (2012). Система сбора и утилизации биогаза полигона твердых бытовых отходов. *Технические газы*, 3, 65-68.
9. Каллистова, А.Ю., Глаголева, М.В., & Шнырев, Н.А. (2006). Эмиссия метана с поверхности полигона захоронения твердых бытовых отходов в зависимости от возраста полигона и от времени года. *Экологическая химия*, 15, 13-21.
10. Пятничко, А.И., Жук, Г.В., & Баннов, В.Е. (2010). Результаты обследования полигонов ТБО Украины для установления объемов добычи и состава биогаза. *Технические газы*, 2, 63-66.
11. Гелетуха, Г.Г., Кучерук, П.І., & Матвеев, Ю.І., (2013). *Розвиток біогазових технологій в Україні та Німеччині : нормативно-правове поле, стан та перспективи*. Київ-Гольцов. Retrieved from http://www.uabio.org/img/files/news/pdf/Razvitiye_biogazovyh_tachnologiy_1.pdf.
12. Stasevich, R.K., Litvinenko, A.A., & Jurchenko, A.A. (2018). Information resource-saving technology of extraction, transportation and utilization gases of coal mine. *Development of scientific foundations of resource-saving technologies of mineral mining and processing: Multi-authored monograph*, 151-170.

АНОТАЦІЯ

Мета. Виконати аналіз методів і засобів утилізації біогазу полігонів твердих побутових відходів, розробити технологічну схему утилізації біогазу і критерії безпеки технічних засобів.

Методика досліджень Для вирішення поставлених завдань в роботі використані: аналітичний метод – для дослідження фізико-хімічних процесів утворення біогазу в звалищах побутових відходів; методи математичної статистики – для розробки критеріїв безпеки роботи системи утилізації біогазу.

Результати досліджень. Виконано аналіз стану питання утилізації біогазу полігонів твердих побутових відходів як у світовій практиці, так і в Україні. Наведено прогноз за обсягами видобутку метану на полігонах твердих побутових відходів. Оцінено зниження викидів парникових газів в атмосферу. Розроблено систему утилізації біогазу. Встановлено, що в залежності від місцевих умов, швидкість відкачування звалищного газу з однієї свердловини становить від 5-50 м³/год до 250 м³/год. Радіус впливу свердловини для відкачування звалищного газу змінюється в межах 8-80 м із середнім значенням 30-35 м. Відстань між свердловинами не повинна бути менше подвоєного радіусу впливу. Розроблені критерії безпеки дозволяють запобігти вибухам метану в процесі утилізації біогазу.

Наукова новизна. Отримали подальший розвиток методи забезпечення безпечної експлуатації системи утилізації вибухових газів, які передбачають не тільки моніторинг концентрації метану в точках контролю, а й концентрації кисню в цих же точках. Це обумовлено тим, що і кисень є найважливішим фактором, який впливає на вибуховість метано-повітряних сумішей.

Практичне значення. Розроблена спрощена схема утилізації біогазу малих полігонів для видобутку стисненого метану, технічні засоби якої мобільні і змонтовані в контейнерах. Розроблено критерії безпеки при експлуатації цієї системи утилізації біогазу. Розроблена технологічна схема може бути застосована для утилізації метану на полігонах твердих побутових відходів місткістю менше 100 тис. т.

Ключові слова: полігон, відходи, біогаз, утилізація, система, технічні засоби, експлуатація, критерії безпеки

ABSTRACT

The purpose of the work. To analyze the methods and means of biogas utilization of municipal solid waste landfills, to develop a technological scheme of biogas utilization and safety criteria for

technical means operation.

Research Methods. To solve the problems, we used in the work: an analytical method – for the study of the physical and chemical processes of biogas generation in municipal waste dumps; methods of mathematical statistics – to develop criteria for the safety of the biogas utilization system.

The results. The analysis of the state of the issue of biogas utilization of municipal solid waste landfills both in world practice and in Ukraine has been carried out. The forecast for methane production at landfills for municipal solid waste is given. The reduction of greenhouse gas emissions were estimated. A biogas utilization system have been developed. It was found that depending on local conditions, the rate of pumping landfill gas from one well is from 5-50 m³/h to 250 m³/h. The radius of influence of the well for pumping landfill gas varies within 8-80 m with an average value of 30-35 m. the Distance between the wells should not be less than twice the radius of influence. The developed safety criteria allow to prevent methane explosions in the process of biogas utilization.

Scientific novelty. Methods to ensure the safe operation of the system for the disposal of explosive gases, which not only monitor the concentration of methane at control points, but also the concentration of oxygen at these points, have been prospective developed. This is due to the fact that oxygen is the most important factor that affects the explosiveness of methane-air mixtures.

The practical significance. A simplified scheme for the utilization of biogas of small landfills for the extraction of compressed methane has been developed, the technical means of which is mobile and mounted in containers. Safety criteria have been developed for the operation of this biogas utilization system. The developed technological scheme can be used for the utilization of methane at solid waste landfills with a capacity of less than 100 thousand tons.

Keywords: *landfill, waste, biogas, disposal, system, technical means, operation, safety criteria*