

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДА БИОГАЗА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИГОНА
ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Т. А. Осипова, Н. С. Ремез

Национальный технический университет Украины «КПИ»

ул. Борщаговская, 115, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: osipova_tetiana@ukr.net; Nataly.Remez@gmail.com

Более 90 % отходов, которые образуются в Украине, подвергаются захоронению на полигонах твердых бытовых отходов и свалках. Это имеет ряд негативных последствий, таких как парниковый эффект, вызванный образованием биогаза, взрывоопасность, загрязнение подземных вод инфильтратом и т.д. С другой стороны, биогаз можно использовать в качестве энергетического ресурса. Для образования свалочного газа необходим определенный температурный режим. Для оценки целесообразности добычи свалочного газа необходимо подсчитать его количество. На примере полигона твердых бытовых отходов г. Борисполь проведено численное моделирование распределения температуры в теле полигона с использованием уравнения теплопроводности с начальными и граничными условиями. Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным сопоставлением расчетных данных с экспериментальными данными других авторов. Проведено моделирование объема выхода свалочного газа с помощью пакета прикладных программ LandGEM–Landfill emission model.

Ключевые слова: свалочный газ, полигон, отходы, биоразложение.

**ПРОГНОЗУВАННЯ ВИХОДУ БІОГАЗУ І ТЕМПЕРАТУРИ ПОЛІГОНУ
ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Т. А. Осіпова, Н. С. Ремез

Національний технічний університет України «КПІ»

вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: osipova_tetiana@ukr.net; Nataly.Remez@gmail.com

Більше 90 % відходів, які утворюються в Україні, піддаються захороненню на полігонах твердих побутових відходів та звалищах. Це має ряд негативних наслідків, таких як парниковий ефект, викликаний утворенням біогазу, вибухонебезпечність, забруднення підземних вод інфільтратом і т.д. З іншого боку, біогаз можна використовувати як енергетичного ресурсу. Для утворення звалищного газу необхідний певний температурний режим. Для оцінки доцільності видобутку звалищного газу, необхідно підрахувати його кількість. На прикладі полігону твердих побутових відходів м. Борисполя проведено чисельне моделювання розподілу температури в тілі полігону з використанням рівняння теплопровідності з початковими і граничними умовами. Достовірність отриманих результатів підтверджується задовільним співставленням розрахункових даних з експериментальними даними інших авторів. Проведено моделювання об'єму виходу звалищного газу за допомогою пакету прикладних програм LandGEM–Landfill emission model.

Ключові слова: звалищний газ, полігон, відходи, біорозпад.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В течение последних десятилетий скорость образования твердых бытовых отходов (ТБО) в мире постоянно увеличивалась. Количество ТБО ежегодно растет на 3–6 %. В разных странах на одного жителя обычно приходится от 250 до 700 кг ТБО в год, а в отдельных странах – до 1000 кг в год. В последние годы во многих развитых странах уделяется большое внимание проблеме уменьшения или стабилизации количества отходов. Речь идет об ограничении образования отходов, сортировке, использовании вторичных ресурсов и переработке. Однако уменьшить количество отходов пока не удается.

Типичная для Украины схема обращения с твердыми бытовыми отходами – нераздельный сбор и захоронение (> 90 %) ведет к засорению земель, безвозвратной потере ресурсов и прибыли, которую могла бы дать правильно налаженная комплексная переработка отходов.

При разложении органических компонентов отходов образуется биогаз. Свободное поступление свалочного газа в окружающую среду вызывает ряд негативных последствий. При накоплении свалочного газа могут возникать взрыво- и пожароопасные условия в зданиях и сооружениях. Накапливаясь в пористом слое почвы, биогаз уничтожает растительный покров, вызывая асфиксию корневой

системы. Свободное распространение свалочного газа приводит также к загрязнению атмосферы окружающих территорий токсичными соединениями, которые обладают, кроме того, неприятным запахом. Накопление свалочного газа в теле свалки часто вызывает самовозгорание ТБО. Процесс горения сопровождается образованием токсичных веществ, в частности диоксида углерода, способствующего парниковому эффекту (вклад метана в парниковый эффект составляет около 18 %). Концентрация метана в атмосфере ежегодно возрастает на 0,6 %, и за последние два века увеличилась более, чем в два раза.

В связи с нехваткой энергоресурсов использование свалочного газа, образующегося на полигонах ТБО, становится наиболее актуальным, поскольку решается ряд проблем экономического и экологического характера. Свалочный газ без предварительной очистки можно использовать как топливо для котлов и печей, т.е. он может поставляться прямо к потребителю для получения тепла или для использования в любом технологическом процессе (обжиг, получение технологического пара и др.) Этот путь использования газа является самым эффективным при условии, что его потребление непрерывное. Возможно применение полученных результатов для прогнозирования температуры и объема свалочного газа для последующей добычи свалочного газа с

полигонов ТБО и свалок Украины.

Анализ публикаций показывает, что существующие математические модели эмиссии биогаза [1–4] учитывают лишь небольшой ряд факторов, которые могут быть заданы в некотором приемлемом диапазоне или легко контролируются. Экспериментальные исследования требуют высоких материальных и временных затрат, а также высокой точности и непрерывности исследований. Поэтому моделирование температуры в теле полигона и прогнозирования объемов образования свалочного газа является актуальным с научной и практической точек зрения.

Цель работы – оценить температуру в теле полигона и провести моделирование выхода биогаза.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Твердые бытовые отходы – предметы или товары, потерявшие потребительские свойства, наибольшая часть отходов потребления. ТБО делятся также на отходы (биологические) и собственно бытовой мусор (небиологических отходы искусственного или естественного происхождения), последние часто на бытовом уровне называются просто мусором. Ежегодно количество мусора возрастает примерно на 3 % по объему. Значительное количество ТБО попадает на несанкционированные свалки, количество которых постоянно растет. Органическое вещество, которое является основным компонентом ТБО, разлагается на свалках приблизительно в течение 20 лет. Основным компонентом свалочного газа является метан. В соответствии с современными представлениями анаэробное превращение практически любого вида органического вещества в метан включает четыре взаимосвязанные стадии:

- стадия ферментативного гидролиза (расщепления) сложных органических веществ (углеводов, белков, жиров) с образованием более простых растворимых веществ (мономеров, аминокислот и др.);
- стадия кислотообразования (кислотогенная стадия – кислотогенез) с образованием летучих жирных кислот, спиртов, водорода, углекислого газа, аммиака, сероводорода и др.;
- ацетогенная стадия (ацетогенез) – стадия превращения жирных кислот и др. в уксусную кислоту, диссоциируют на анион ацетата и катион водорода;
- метаногенная стадия (метаногенез) – с образованием метана из уксусной кислоты и ацетата, а также в результате реакции восстановления углекислого газа водородом. Основным способом, который может обеспечить решение проблемы образования свалочного газа (СГ), является его сбор и утилизация [5].

Поскольку при сборе СГ снижается количество выбросов в атмосферу, снижается парниковый эффект, уменьшается вероятность наступления пожара и исчезает неприятный запах, можно сделать вывод об улучшении экологической ситуации при сборе СГ с полигонов ТБО и свалок.

Из общего количества свалок Украины более 140 составляют полигоны ТБО, которые могут считаться пригодными для добычи и использования биогаза (90 из них – наиболее крупные и одержат 30 % всех отходов). Удельный выход газа составляет 120–400 м³/т

ТБО. Поэтому потенциал биогаза, доступного для производства энергии на 90 наиболее крупных полигонах ТБО, составляет около 400 млн. м³/год, что эквивалентно 0,3 млн. т у.т. Экономические расчеты показывают, что наиболее рентабельными для установки систем сбора и утилизации свалочного газа являются крупнейшие полигоны с объемом накопленных отходов более 1 млн. т и глубиной более 10 м.

Таким образом, первоочередными кандидатами на реализацию таких проектов являются полигоны областных центров и городов с населением более 100 тыс. чел. Основным способом утилизации свалочного газа является производство электроэнергии или прямое сжигание для получения тепла (при наличии потребителей в радиусе менее 5 км).

Поэтому использование свалочного газа, образующегося на полигонах ТБО, становится наиболее актуальным, поскольку решается ряд проблем экономического и экологического характера.

В Украине ежегодно образуется более 10 млн. т отходов. В результате анаэробного брожения каждая тонна бытовых отходов может выделить 120–200 м³ биогаза, а все полигоны – до 10–15 млн. м³ в год [6].

Повышение температуры является одним из основных показателей интенсивности протекания процессов образования метана [7]. Эти процессы могут происходить при температурах от 20 до 65 °С, однако максимальная интенсивность метанообразования наблюдается в диапазоне 30–40 °С [8].

На состояние полигона ТБО влияют: исходное содержание органики в отходах; влажности тела полигона; сезонный перепад температуры. Эти факторы обуславливают реальные условия поведения отходов. При этом принималось, что на верхней границе задаются изменения температуры по временам года. Для упрощения применяли гармонические колебания в пределах от T_{min} до T_{max} , т.е. минимальных и максимальных значений температур зимой и летом. На нижней границе расчетной области принята постоянная температура окружающей среды 12 °С. При необходимости на этих границах могут быть заданы сложные законы изменения температуры. За начальное было принято распределение температуры, которое возникает в почве без источников тепла. Чтобы результаты были сопоставимы, принято, что период полураспада, т.е. время, за которое разлагается половина органической массы, составляет 10 лет. Все расчеты выполнены на срок 20 лет. Начальное распределение органики по глубине принималось постоянным.

Для полигона г. Борисполь было проведено моделирование температуры в теле полигона и было проведено сравнение с экспериментальными результатами.

Процесс распределения тепла по глубине тела полигона описывается уравнением теплопроводности с начальными условиями, которые задаются в виде начального распределения тепла или влажности по глубине полигона.

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda(T) \partial T}{\partial z} \right) + Q(z), \quad (1)$$

Параметры $\lambda(T)$ и $Q(z)$ являются функциональными зависимостями от температуры T и влажности.

Граничные условия описывают поведение потока тепла на границах.

$$\frac{\partial T}{\partial z} = h_1(T - T_c), z = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = h_2(T - T_z), z = 1, \quad (3)$$

где T_c и T_z – температура окружающей среды для данного слоя; t – время h – глубина.

Эта начально-краевая задача решалась методом конечных разностей с применением неявной схемы типа предиктор-корректор второго порядка точности. Эта схема безусловно устойчивая. Для решения полученной системы уравнений использовался метод трехдиагональной прогонки. Была написана программа на языке программирования Фортран.

В результате расчетов получена зависимость температуры от глубины полигона г. Борисполь (рис. 1).

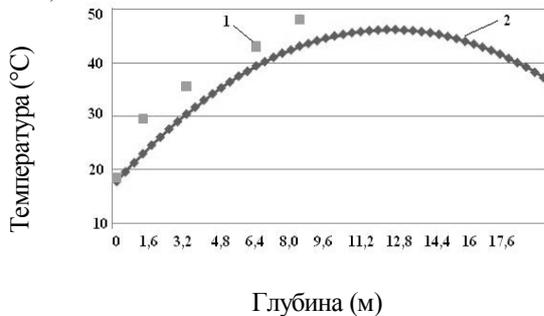


Рисунок 1 – Зависимость температуры от глубины полигона г. Борисполь: 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты моделирования

Из рис. 1 видно, что при движении от дневной поверхности вглубь полигона сначала происходит рост температуры, которая для данных условий достигает своего максимума на глубине 12,5 м, а далее происходит ее уменьшение. Исследование температуры в теле полигона на основе численного моделирования показало, что в теле полигона достигается температура в пределах 20–50 °C, что является достаточным условием для метаногенеза.

В работе [6] проведены экспериментальные исследования по сбору биогаза на полигоне ТБО г. Борисполь. Система сбора была сооружена в центральной части полигона на засыпанном участке. В состав системы входила одна вертикальная газосборная скважина (ГС), которая является частью строящейся промышленной системы сбора, а также пять экспериментальных скважин (ЭС), построенные в двух перпендикулярных направлениях на разных расстояниях от ГС.

ГС смонтирована в шурф диаметром 450 мм и глубиной 12,3 м. Вдоль центральной оси шурфа размещалась полиэтиленовая труба диаметром 110 мм. Нижние 6,7 м трубы – перфорированные и обсыпанные щебнем. Верхняя часть трубы длиной 4,8 м сплошная. В нижней части сплошного участка со-

оружалась пробка из бентонита высотой 0,7 м. Оставшееся пространство, было уплотнено глиной к поверхности полигона ТБО.

ЭС сооружались в шурфах диаметром 350 мм и глубиной 6...8 м. При бурении шурфов через каждые 2...3 метра отбирались образцы отходов с помощью цилиндрической желонки. В процессе отбора оценивались состав, степень разложения и влажность ТБО.

В пробуренных шурфах вдоль стенки устанавливались датчики температуры НТФ 250 на глубинах около 1, 3, 6 и 8 м. Электрические разъемы датчиков температуры выводились на поверхность. Затем в пробуренном шурфе последовательно вставлялись три полиэтиленовые трубы диаметром 25 мм на глубину около 8, 6 и 3 м.

Сопоставляя экспериментальные и расчетные данные по распределению температуры в теле полигона (рис. 1), можно сделать вывод о хорошей достоверности последних. Исходя из условия, что температура в теле полигона является достаточной для прохождения метаногенеза, было проведено моделирование объема выхода СГ на данном полигоне.

Для технико-экономического обоснования и реализации проектов по добыче свалочного газа необходима предварительная оценка потенциала его образования на конкретном полигоне. Методология оценки эмиссий биогаза на свалках и полигонах развивалась по мере развития технологии захоронения. С началом строительства полигонов захоронения ТБО начинаются и активные исследования процессов разложения отходов и образования биогаза. Для оценки количества биогаза, образующегося и выделяется в атмосферу, на основании морфологического состава отходов и других основных факторов применяется математическое моделирование, то есть математическое выражение теоретически возможного количества газа, образующегося на полигоне ТБО. Моделирование является наиболее удобным и мало затратным методом предварительного прогнозирования газообразования, при этом чаще всего используется математическая модель разложения первого порядка. Входными параметрами этой модели являются скорость образования биогаза k , потенциал газообразования L_o , масса отходов M_i , поступившая на полигон в i -тый год, возраст j -того участка полигона t_{ij} . Модель имеет следующий вид:

$$Q_{CG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_o \left(\frac{M_i}{10} \right) \cdot e^{-kt_{ij}}. \quad (4)$$

Потенциал газообразования L_o и скорость образования СГ k зависят от количества и фракционного состава ТБО, условий в теле полигона (влажности, температуры, рН, наличия ингибирующих веществ и др.), а также условий эксплуатации полигона (наличия предварительной сортировки, формы полигона, степени уплотнения ТБО, наличия верхнего газонепроницаемого слоя, возгораний и др.). L_o находится в пределах 0...312 м³/т отходов, а k – 0,001...0,4 год⁻¹ [10]. Скорость образования биогаза, k , определяет скорость генерации метана из отходов на свалке. Единицы измерения – год⁻¹. Коэффициент k описывает скорость, с которой разлагаются отходы, раз-

мещенные на свалке, и образуется метан, и связан с периодом полураспада отходов в соответствии с уравнением: $(t_{1/2}) = \ln 2/k$. Чем выше значение k , тем быстрее образуется метан на полигоне (до тех пор, пока на полигоне размещаются отходы), а затем снижается (после закрытия полигона) с течением времени.

Значение M_i выбирается отдельно для каждого полигона. Значение k и L_o выбирают в зависимости от того, для каких отходов рассчитывают выход газа.

На выходе можно получить следующие данные:

- интенсивность выбросов метана, и неметановых органических составляющих и отдельных загрязнителей воздуха;
- год закрытия полигона, основанный на объеме полигона и количестве отходов, поступающих на полигон;
- выбросы отдельных загрязняющих веществ;
- графики выбросов для отдельных загрязняющих веществ.

Расчет проводился для Бориспольского полигона ТБО. Полигон запущен в эксплуатацию в 2003 г. На рис. 2 изображена зависимость объема эмиссии СГ от времени на Бориспольском полигоне.

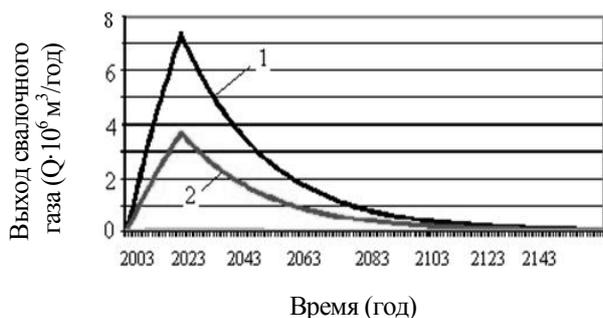


Рисунок 2 – Выход СГ и метана на полигоне ТБО г. Борисполь, рассчитанный по модели разложения первого порядка: 1 – выход свалочного газа; 2 – выход метана

Из анализа графика следует, что сначала происходит рост эмиссии СГ со временем, и максимум выделения СГ, и в том числе метана, приходится на 2019 год (первый год после закрытия полигона), что соответствует стадии активного метаногенеза, при этом можно получить $7,36 \cdot 10^6$ м³/год. В метагенной активной фазе (от 10 до 30 лет) разлагаются образованные в ацетогенной фазе кислоты, что сопровождается значительным выделением метана, диоксида углерода и др. Далее наблюдается уменьшение объемов выделенного газа, которое соответствует стадии стабильного метаногенеза. На этой стадии (рекультивационный и пострекультивационный этапы жизненного цикла полигона) идет дальнейшее уменьшение концентраций органических веществ. Прогнозируемые объемы метана, рассчитанные по 2143 год, составляют $2,1 \cdot 10^8$ м³. В случае увеличения срока эксплуатации полигона до 2028 года, максимум эмиссии метана приходится на 2029 год и составляет $1,04 \cdot 10^7$ м³/год, а его общий объем до 2143 года возрастает до $3,6 \cdot 10^8$ м³.

Далее было проведено моделирование выхода

СГ на основе модели разложения первого порядка в программе Ukraine Landfill Gas Model [10]. Модель позволяет сделать оценку выхода СГ, а также оценку эффективности системы сбора сгенерированного газа, известную как эффективность сбора. Входными параметрами этой модели являются скорость образования биогаза k , потенциал газообразования L_o , масса отходов M_i , поступившая на полигон в i -тый год, возраст j -того участка полигона t_{ij} , метано-корректирующий фактор MCF и фактор, учитывающий пожары на полигоне F . Модель имеет следующий вид:

$$Q_{cr} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1} 2kL_o \left(\frac{M_i}{10} \right) \cdot e^{-kt_{ij}} \cdot MCF \cdot F \cdot \quad (5)$$

Метано-корректирующий фактор (MCF) – составляющая модели, которая учитывает степень анаэробного разложения отходов. Он варьируется в зависимости от глубины свалки и ее типа. На управляемом (санитарном) полигоне, разложение отходов считается анаэробным ($MCF = 1$). На полигонах или свалках с менее благоприятными условиями для анаэробного разложения, MCF будет ниже, чтобы отразить степень аэробных условий в этих местах. Отходы, залегающие на глубине не менее пяти метров, лучше разлагаются, поскольку большая глубина полигона способствует анаэробному разложению; на меньших глубинах, разложение отходов в основном является аэробным. Санитарные полигоны, в основном, имеют контролируемое размещение отходов (отходы направлены на конкретные области полигона, имеется контроль за пожарами на полигоне и др.). Также бывают в наличии: механическое уплотнение, покрытие полигона или выравнивание отходов. На свалках, имеющих полуанаэробные условия, существует контроль за размещением отходов, а также пропускающий материал покрытия, система дренажа фильтрата и система вентиляции.

Модель автоматически рассчитывает эффективность сбора на основе следующих факторов:

- практика управления свалкой – правильно организованные свалки имеют такие характеристики (покрытие почвы, уплотнения и выравнивания отходов, контроль размещения отходов, контроль за очисткой свалки, борьба с пожарами, системы управления фильтратом), которые позволят достичь более высокой эффективности сбора, чем на неконтролируемых свалках;
- глубина свалки – неглубокие полигоны имеют неглубокие скважины для получения биогаза, которые являются менее эффективными, потому что они более склонны к проникновению в них воздуха;
- тип и степень покрытия – эффективность сбора биогаза будет высокой на полигонах с низко проницаемым почвенным покровом отходов, который ограничивает высвобождение биогаза в атмосферу, проникновение воздуха в газовую систему, а также проникновение осадков в виде дождя в отходы;
- подкладка под отходы на полигоне – полигоны с глиняной или синтетической основой имеют более низкие показатели миграции СГ в почву, что приводит к повышению эффективности сбора биогаза;
- размещение отходов – уплотненные отходы

будут иметь более высокую инфильтрацию воздуха и более низкое качество газа, и, соответственно, более низкую эффективность сбора;

– площадь размещения отходов на полигоне – неуправляемые свалки со стихийным размещением отходов, как правило, имеют более низкую эффективность сбора СГ, чем санитарные полигоны, где размещение отходов направлено на конкретные зоны полигона;

– обращение с фильтратом – высокий уровень фильтрата может резко ограничить эффективность сбора СГ, в частности, на полигонах с большим количеством осадков, плохим дренажем, и ограниченным грунтовым покрытием.

Преимуществом модели является то, что в ней учитывается состав отходов на конкретной свалке, а также тип полигона, глубина, дата начала работы. Также к преимуществам относится то, что модель определяет уменьшение вредных выбросов в атмосферу, а также позволяет не только прогнозировать выход СГ, но и возможное количество СГ, которое можно собрать на данной свалке, учитывая ее тип. На рис.3. показаны выход и возможный объем сбора СГ на полигоне г. Борисполь, рассчитанные в программе Ukraine Landfill Gas Model.

Из анализа рис. 3 следует, что максимум выделения СГ приходится на 2019 год (первый год после закрытия полигона), при этом можно получить $6,5 \cdot 10^6$ м³/год, а собрать – $4,8 \cdot 10^6$ м³/год. Видно, что при расчете с помощью модели разложения первого порядка выход биогаза выше, чем рассчитанные в программе Ukraine Landfill Gas Model. Это связано с тем, что Ukraine Landfill Gas Model учитывает большее количество факторов, в том числе состав отходов, форму и тип полигона, вид размещения отходов, покрытие и подкладку на полигоне, способ обращения с фильтратом и т.д.

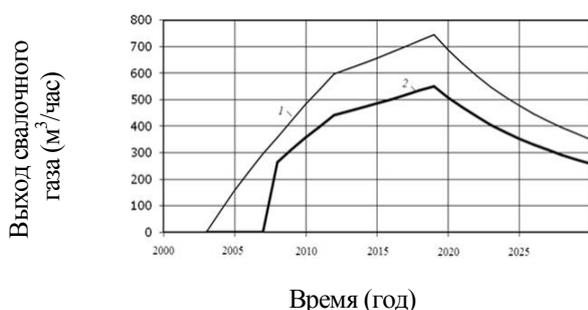


Рисунок 3 – Выход и возможный объем сбора СГ на полигоне г. Борисполь, рассчитанные в программе Ukraine Landfill Gas Model:
1 – выход СГ, 2 – возможный объем сбора СГ

ВЫВОДЫ. В работе было проведено численное моделирование температуры в теле полигона и выход биогаза на примере Бориспольского полигона. Исследование температуры с помощью численного моделирования показало, что в теле полигона достигается температура в пределах 20–50 °С, что является достаточным условием для метаногенеза. Из сопоставления экспериментальных и расчетных данных можно сделать вывод об их достаточной согласованности, а также об адекватности модели и раз-

работанной программы реальным процессам на полигоне, поэтому разработанная методика может быть применена для расчета температуры на других полигонах.

Проведено моделирование выхода биогаза на полигоне ТБО с помощью пакета прикладных программ LandGEM–Landfill emission model. Данная модель была выбрана, поскольку она учитывает наиболее существенные факторы и параметры, такие как возраст полигона, количество отходов и др. Проведен расчет зависимости выхода биогаза от времени. Из анализа результатов установлено, что наибольший объем СГ образуется на следующий год после прекращения размещения отходов. С помощью модели Ukraine Landfill Gas Model проведены расчеты выхода биогаза с учетом состава отходов, глубины заложения и других свойств полигона. Следует отметить, что данная модель разработана с учетом природных условий Украины, отличительных свойств состава ТБО, связанных со спецификой потребления. Установлено, что при использовании этой модели полученный объем СГ в 1,5 раза меньше по сравнению с объемом, рассчитанным по модели Landfill emission model.

Таким образом, разработана эффективная методика расчета выхода биогаза и температуры полигона ТБО на основе численного моделирования, которая позволяет прогнозировать возможность протекания метаногенеза для образования биогаза и оценить потенциал его образования на полигонах Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Oonk J., Weenk A., Coops O., Luning L. 1994. Validation of Landfill Gas Formation Models: Report. – Institute of Environmental and Energy Technology. – 1994. – № 94. – 315 p.
2. Peer R.L., Epperson D.L., Campbell D.L., P. Von Brook. Development of an Empirical Model of Methane Emissions from Landfills. U.S. EPA, Office of Research and Development, 1992.
3. Ham R.K. Predicting Gas Generation from Landfills, 1979.
4. Van Zanten, B. and M.J.J. Scheepers. Modelling of Landfill Gas Potentials. Proceedings, SWANA 18th Annual Landfill Gas Symposium, New Orleans, LA, 1995.
5. Энергетический потенциал метанообразования при мезофильном анаэробном разложении органической составляющей отходов / В.Н. Бабаев, Н.П. Горох, И.В. Коринько // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2011. – № 4/6. – С. 59–65.
6. Пухнюк А.Ю., Куцый Д.В., Матвеев Ю.Б. Полевые исследования для оценки потенциала образования биогаза на полигонах твердых бытовых отходов Украины // Комунальне господарство міст. – 2012. – Вип. 105. – С. 482–495.
7. Yesiller N. Analysis of temperatures at a municipal solid waste landfill [Electronic resource]: proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill. – Режим доступа: <http://http://gwri.calpoly.edu/cgi-bin/complex2/showPage.plx?pid=52>
8. Der Deponiegashaushalt in Alttablagerungen – Leitfaden Deponiegas: Materialien zur Altlasten-

bearbeitung / G. Rettenberger, H. Mezger, S. Urban-Kiss and partner. – Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1992. – 136 s.

9. EPA, 2005. Landfill Gas Emissions Model

(LandGEM). Version 3.02, Eastern Research Group, USA.

10. EPA, 2009. Ukraine Landfill Gas Model. Version 1.0, Eastern Research Group, USA.

PREDICTION OF BIOGAS YIELD AND TEMPERATURE OF LANDFILL BASED ON MATHEMATICAL SIMULATION

T. Osipova, N. Remez

National Technical University of Ukraine "KPI"

vul. Borshagovska, 115, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: Nataly.Remez@gmail.com; osipova_tetiana@ukr.net

More than 90% of the waste, which is generated in Ukraine, is located at landfills and dumps. It has a number of negative consequences, such as the greenhouse effect caused by the formation of biogas, explosiveness, contamination of groundwater with leachate, etc. On the other hand, the biogas can be used as an energy resource. The formation of landfill gas needs a certain temperature. To assess the feasibility of production of landfill gas, it is necessary to calculate its amount. On the example of Boryspil MSW landfill the results of numerical simulation of the temperature distribution in the body of the landfill, using the heat equation with initial and boundary conditions are shown, reliability of the results shows satisfactory comparison of calculated data with the experimental data of other authors. The landfill gas yield is estimated using application package LandGEM - Landfill emission model.

Key words: landfill gas, landfill, waste, biodegradability.

REFERENCES

1. Oonk, J., Weenk, A., Coops, O., Luning, L. (1994), Validation of Landfill Gas Formation Models: Report, Institute of Environmental and Energy Technology, no. 94, 315 p.

2. Peer, R.L., Epperson, D.L., Campbell, D.L., Von Brook, P. (1992), "Development of Empirical Model of Methane Emissions from Landfills", Office of Research and Development, EPA, U.S.

3. Ham, R.K. (1979), Predicting Gas Generation from Landfills.

4. Van Zanten, B., Scheepers, M.J.J. (1995), "Modelling of Landfill Gas Potentials", Proceedings, SWANA 18th Annual Landfill Gas Symposium, New Orleans, LA, USA.

5. Babayev, V.N., Gorokh, N.P., Korin'ko, I.V. (2011), "The energy potential of methane under mesophilic anaerobic decomposition of organic waste component", *Vost.-Yevrop. zhurn. peredovykh tekhnologiy*, no. 4/6, pp. 59–65.

6. Pukhnyuk, A.Yu., Kutsyy, D.V., Matveyev, Yu.B. (2012), "Field studies to assess the potential of biogas at

landfills in Ukraine", *Komunal'ne gospodarstvo mist*, no. 105, pp. 482–495.

7. Yesiller N. Analysis of temperatures at a municipal solid waste landfill [Electronic resource]: Proceedings Sardinia 2003, *Ninth International Waste Management and Landfill*, mode of access <http://http://gwri.calpoly.edu/cgi-bin/complex2/showPage.plx?pid=52>

8. Rettenberger, G., Mezger, H., Urban-Kiss, S. (1992), *The landfill gas in household Altablagerungen - Guide landfill gas: materials contaminated machining* [Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen -Leitfaden Deponiegas: Materialien zur Altlasten-bearbeitung], Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, Germany.

9. EPA, (2005), Landfill Gas Emissions Model (LandGEM). Version 3.02, Eastern Research Group, USA.

10. EPA, (2009), Ukraine Landfill Gas Model. Version 1.0, Eastern Research Group, USA.

Стаття надійшла 26.05.2015.