

13. Кучерявий В.П. Урбоекологія / В.П. Кучерявий. – Львів: Світ, 2001. – 440 с.
Отримано 04.07.2012

УДК 657.471.23 : 662.767.2

А.Ю.ПУХНЮК, Д.В.КУЦЬІЙ, Ю.Б.МАТВЕЕВ, канд. физ.-матем. наук
Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ОБРАЗОВАНИЯ БИОГАЗА НА ПОЛИГОНАХ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ УКРАИНЫ

В работе проведен анализ некоторых существующих полевых методов оценки потенциала образования биогаза на полигонах твердых бытовых отходов и приводятся результаты исследования газообразования на четырех украинских полигонах ТБО.

В роботі проведено аналіз деяких існуючих методів польових методів оцінки потенціалу утворення біогазу на полігонах твердих побутових відходів та наведено результати досліджень газоутворення на чотирьох українських полігонах ТПВ.

Paper presents analysis of some existing methods for field investigation of landfill gas generation potential at municipal solid waste landfills and provides results of investigation of LFG generation at four Ukrainian landfills.

Ключевые слова: биогаз, твердые бытовые отходы, полигоны, метан.

Биогаз (БГ), образующийся на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО), содержит 50-60% метана и может быть использован в качестве возобновляемого источника энергии. Сбор биогаза на крупных украинских полигонах ТБО может составить до 10-15 млн. м³ в год. В мире реализовано около 1700 проектов по энергетической утилизации БГ [1]. Технико-экономическое обоснование и реализация таких проектов предполагает проведение предварительной оценки потенциала образования и сбора БГ на конкретном полигоне.

Наиболее распространенные методы для оценки количества и скорости образования биогаза из ТБО включают оценку с помощью математического моделирования процессов в теле полигона различного уровня сложности; полевые исследования газообразования на полигонах ТБО; исследование образцов ТБО в лабораторных условиях.

Моделирование газообразования является наиболее распространенным методом предварительного прогнозирования газообразования на полигоне ТБО. Для расчета метанообразования чаще всего используются математические модели разложения первого порядка, входными параметрами в которых являются количество, состав и возраст отходов. Потенциал газообразования (L_0) и скорость образования БГ (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.). Эффективность сбора БГ в процессе эксплуатации зависит от степени охвата тела полигона системой сбора БГ, качества ее регулирования, наличия верхнего газонепроницаемого слоя и газопроницаемости отходов.

В целом, процесс образования и сбора БГ на полигонах зависит от множества факторов, которые не могут быть в полной мере учтены в расчетах. Кроме того, результаты моделирования являются недостаточно надежными ввиду недостатков самих моделей (упрощенного представления о процессе газообразования, отсутствия достаточного количества долгосрочных эмпирических данных по сбору БГ на реальных полигонах ТБО для верификации моделей), а зачастую и недостаточности входных данных (например, отсутствия достоверных данных о составе и количестве вывезенных отходов). Кроме того, использование моделей, разработанных для стандартов управления ТБО западных стран, может приводить к значительным погрешностям в странах с более низкими стандартами.

Одним из способов уточнения оценки потенциала сбора БГ, калибровки моделей газообразования для условий конкретного полигона и получения дополнительной информации для проектирования системы сбора БГ является проведение полевых исследований на полигоне ТБО. Целью данной работы является анализ некоторых существующих полевых методов оценки потенциала газообразования и опыта их применения на украинских полигонах ТБО.

Методы полевых исследований газообразования делятся на пассивные, когда измеряется самопроизвольный выход БГ из тела полигона и активные, так называемые насосные тесты или пробные откачки БГ, при которых организуется отбор и измерение потока и состава БГ с помощью экспериментальной системы сбора на одном или нескольких репрезентативных участках полигона.

Измерение пассивного выхода газа из тела полигона включает измерение концентрации метана в поверхностном слое над полигоном и количественную оценку эмиссии метана [2]. Концентрации метана могут измеряться точечным способом с помощью пламенно-ионизационного детектора или на больших расстояниях – методами Фурье – или лазерной спектроскопии. Измерение потоков газа проводится с помощью установки на поверхности полигона переносной «газовой камеры», в которой измеряется изменение концентрации метана. Измерения могут проводиться статическим (измерение скорости вытеснения газа в камере поступающим биогазом) или динамическим методом (продувка

камеры воздухом с измерением его расхода и изменения концентрации метана). Недостатком такого подхода является необходимость проведения большого количества точечных измерений для покрытия всей поверхности полигона, а также необходимость учета изменений погодных условий. Альтернативным методом измерений для больших площадей является использование трассировочного газа (например, гексафторида серы SF₆) над поверхностью полигона для определения атмосферного коэффициента переноса. На основании измеренной концентрации метана на некотором расстоянии от полигона с его подветренной стороны и полученного коэффициента переноса определяется общая эмиссия метана с полигона. Еще одним методом измерения эмиссии метана является измерение состава газа и изменения градиента давления под поверхностью полигона, которое позволяет определить градиенты давления и концентраций, вызывающих конвекцию и диффузию БГ. Измерение гидравлической проводимости отходов в измеряемой толщине слоя позволяет определить конвективные и диффузионные потоки БГ.

В данной работе рассмотрены применение широко используемого метода пробной откачки и одного из вариантов измерения пассивного выхода БГ – баро-пневматического теста.

Метод *пробной откачки* является стандартным для применения, например, в Великобритании и США [3, 4], процедура измерений включает:

- оценку потока на скважинах с одновременным анализом состава БГ (CH₄, CO₂, O₂, H₂S, N₂) в определенном диапазоне разрежений. Длительность теста должна быть достаточной для установления стабильного режима газообразования (обычно несколько недель). Определяется максимально допустимое разрежение всасывания, определяемое требованиями к качеству БГ и минимизации подсоса воздуха для сохранения анаэробных условий в теле полигона (ориентировочный критерий – концентрация азота в БГ < 10%, кислорода < 2-3%).

- определение радиуса влияния (РВ) скважины с помощью датчиков давления, размещенных вдоль радиальных линий, исходящих из устья скважины. После стабилизации потока и концентрации метана, скорость откачки БГ предполагается равной скорости его образования в пределах РВ.

Преимуществом насосных тестов является возможность получения дополнительной информации о состоянии тела полигона, которая может использоваться при проектировании системы сбора, например, определение уровня фильтрата, оптимального расстояния между скважинами, состояния ТБО на разных глубинах. Вместе с тем существуют ограничения данного метода, связанные со:

- сложностью определения РВ, который может иметь форму сложную конфигурацию из-за гетерогенности отходов и наличия фильтрата в скважинах. Для определения РВ могут использоваться численные методы с использованием уравнения Дарси для газов в пористых средах с учетом плотности и газопроницаемости отходов. Однако на практике нашли применение упрощенные методы, где предполагается, что РВ имеет форму цилиндра и определяется как расстояние нулевого давления от скважины.

- ограниченной длительностью и площадью участка теста;
- упрощенными предположениями о стабильности и равномерности образования БГ в пределах РВ, стабильности атмосферного давления, равномерности газопроницаемости отходов и неучтенного влияния газопроницаемости верхнего покрытия полигона. Вместе с тем, суточные колебания атмосферного давления влияют на показания датчиков давления в зависимости от газопроницаемости верхнего покрытия, а газопроницаемость покрытия и отходов меняется в зависимости от влагосодержания, погодных и механических эффектов (например, промерзания, трещин в верхнем слое и т.д.).

Баро-пневматический метод является комбинированным и предполагает измерение в пассивном режиме давления биогаза на разных глубинах полигона и проведение насосного теста на одной или нескольких скважинах. Метод был сравнительно недавно разработан в США [5] и предложен в качестве альтернативы стандартному методу пробной откачки. Отличие его состоит в том, что он включает оценку гидрофизических свойств полигона ТБО (пористости и газопроницаемости покрытия и отходов).

В пористой среде газообразование соответствует разнице между абсолютным давлением газа в теле полигона и атмосферным давлением, а измерение задержки изменения давления в теле полигона в ответ на изменение атмосферного давления используется для оценки газопроницаемости и пористости покрытия и ТБО. Теоретической базой данного метода являются дифференциальные уравнения закона Дарси и закона сохранения массы [5,6]. С учетом некоторых допущений, решение этих уравнений позволяет определить поток БГ, вертикальную эффективную газопроницаемость и пористость на основании измерения атмосферного давления и давления в теле полигона в стационарном режиме. Для решения системы уравнений используется численный метод, где неизвестные параметры вычисляются итерационной аппроксимацией модельных и измеренных значений давления в теле полигона. Проверочная оценка горизонтальной газопроницаемости и пористости отходов производится методом пробной откачки.

Неопределенности данного метода связаны с тем, что:

- газопроницаемость, пористость и газообразование имеют высокую степень неоднородности в теле полигона – например, газопроницаемость отходов может отличаться на одном и том же полигоне на несколько порядков [6,7].

- давление в теле полигона может изменяться в зависимости от температуры и объема пор в теле полигона.

- трещины, неуплотненности или пустоты, неравномерность водной эрозии, наличие трубопроводов системы сбора фильтрата, различия в форме поверхности, а также полости, созданные в теле полигона бурением скважин для установки датчиков давления, могут приводить к возникновению преферентных потоков БГ.

Баро-пневматический метод нашел применение на некоторых полигонах США [6], представляет интерес его апробация в условиях полигонов ТБО Украины.

Полевые исследования газообразования были проведены на полигонах гг. Мариуполь, Черновцы, Симферополь, Чернигов, основные характеристики полигонов приведены в табл.1. Исследования проводились совместно с компаниями SCS Engineers (США) и Hydro Geo Chem (США) при поддержке программы «Метан – на рынок» Агентства охраны окружающей среды США (US EPA) и Международного партнерства эффективности электроэнергетических компаний (International Utility Efficiency Partnership, IUEP).

Таблица 1 – Характеристики обследованных полигонов ТБО

Полигон	Площадь, га	Накоплено ТБО, млн. т ¹	Глубина, м	Год открытия/ закрытия	Форма / покрытие
Черновцы	5,6	0,8	12	1995-2008(2016 ²)	Пологий холм / отсут.
Мариуполь	12,3	2,1	25	1967-2010	Крутой холм / частично покрыт почвой, строит.отходами
Симферополь	23 ³	4,3 ³	10-15	1981-	Холм / участок проведения измерений покрыт почвой
Чернигов	25	3	12-16	1961-2010	Крутой холм / частичное покрытие

¹ по состоянию на время проведения исследований

² вторая секция

³ согласно данным оператора. Согласно обследованию полигона площадь под отходами ок. 10 га, масса накопленных ТБО – около 1 млн. т.

На полігоні ТБО г. Черновці тест по програмі експериментальних досліджень методом пробної откачки проводився в липні 2007 г., були пробурені три вертикальні скважини глибиною до 12 м (розположені в вершинах правильного трикутника) і встановлені чотири контрольні зонди з датчиками тиску на відстанях 5 м від кожної із скважин для оцінки можливої інфільтрації повітря. В час активної откачки газу в період 6 днів вимірювався склад газу (метан, кисень, двоокис вуглецю), статический тиск в скважинах і контрольних зондах, швидкість і температура БГ з допомогою портативного інфрачервоного газоаналізатора Landtec GEM 500 і термоанометра АТТ-1004.

На полігоні ТБО г. Маріуполь насосний тест проводився в серпні 2008 г. з установкою трьох скважин для откачки БГ (глибиною 11-20 м) і семи контрольних зондів з датчиками тиску на глибині 4 м (три на відстані 5 м від кожної скважини, три вздовж радіальної лінії на відстані від 5 до 25 м від однієї із скважин і один рівновіддалено між трьома скважинами).

В 2006 і 2008 гг. були проведені вимірювання газоутворення на полігонах ТБО гг. Сімферополь і Чернігов баро-пневматическим методом. На полігоні г. Сімферополь в межах закритої і покритої ґрунтової частини полігона була пробурена скважина для проведення насосного тесту глибиною 6 м і встановлені дев'ять вимірювальних зондів. Кожний зонд був оснащений двома диференціальними датчиками тиску (точністю до 0,007 кПа) і температурним сенсором (точністю до $\pm 0,1$ °С), встановленими на різних глибинах (3 м і 6...12 м). Дані тиску і температур в контрольних зондах фіксувалися вбудованим реєстратором даних в період 4-х днів з 30-секундним інтервалом. Вимірюваний тиск порівнювався з паралельно вимірюваним атмосферним тиском. Насосний тест проводився на откачній скважині при постійній швидкості потоку $80 \text{ м}^3/\text{ч}$ в період 2-х годин. Одноразово проводився моніторинг швидкості откачування, атмосферного тиску, тиску в скважині і тиску в двох сусідніх контрольних зондах, розташованих на відстані 3 м від скважини. Після закінчення откачування скважина була герметично закрита, після чого в період 2-х годин велася реєстрація відновлення тиску в тілі полігона. Для аналізу вологості і органічного речовини в час бурення скважин було отримано сім зразків відходів. Склад газу (CH_4 , CO_2 і O_2 , балансовий газ - азот) вимірювався з допомогою портативного газоаналізатора Dräger X - am 7000 Multi - Gas Monitor, перевірений аналіз складу зразків БГ був зроблений в лабораторії на газовому хроматографі.

Аналогичная программа измерений была реализована в ноябре 2007 г. на Черниговском полигоне ТБО. Баро-пневматический тест и пробная откачка газа были выполнены с использованием семи скважин глубиной от 5,9 до 11,8 м. Измерение давления в стационарном режиме проводилось в течение 4-х дней, пробная откачка проводилась на одной из скважин (295 м³/ч) на протяжении 3-х часов с параллельной регистрацией изменения давления в остальных шести скважинах.

Результаты исследований газообразования методом пробной откачки

На полигоне г. Черновцы поток БГ (приведенный к 50% содержания метана) стабилизировался на 5-й день эксперимента на уровне 34 м³/ч, что составляет около 50% потока, зафиксированного в течение первого дня. Измеренные характеристики БГ: температура – 30...40 °С, состав – метан 33...37%, двуокись углерода 27...30%, кислород 0,3...2,4%, балансовый газ (азот) – 32...40%. Высокий уровень азота указывает на повышенную инфильтрацию воздуха через поверхность полигона из-за отсутствия поверхностного покрытия. На глубине 7...9 м в скважинах наблюдался фильтр.

Снижение концентраций метана и статического разрежения было зафиксировано в двух контрольных зондах. РВ для каждой скважины оказался равным 18 м, наблюдалось перекрытие между скважинами 25%, объем отходов в пределах РВ (для средней глубины отходов 12,5 м) – 28,6 тыс. м³, масса – 24,3 тыс. т (при плотности отходов 850 кг/м³, оцененной на основании информации оператора о способе уплотнения отходов). Расчетное удельное газообразование на полигоне составило 7,5 м³ БГ/ т ТБО·год⁻¹, газообразование, экстраполированное на весь объем полигона – 700 м³/ч.

На полигоне ТБО г. Мариуполь поток БГ стабилизировался через три недели эксперимента на уровне 44 м³/час (20% от начального значения). Состав БГ: метан 25...40%, двуокись углерода 24...29%, кислород 0,2...0,5%, азот – 30...46%. Инфильтрация воздуха, по-видимому, имеет место на крутых склонах.

Взаимосвязь с разрежением в соответствующих скважинах была выявлена в четырех из семи контрольных зондов, включая наиболее удаленный зонд, то есть РВ превысил максимальное расстояние измерения разрежения. Средний РВ во время насосного теста был оценен на уровне 2...2,5 глубины скважины, объем отходов в пределах РВ – от 167 тыс. м³ до 235 тыс. м³ (133...188 тыс. т). На основании оценки удельного газообразования отходов, количество БГ, которое можно собрать на Мариупольском полигоне в 2008 г. находится в диапазоне 341...589 м³/ч (при эффективности сбора БГ 85%).

Моделирование газообразования на полигонах ТБО г. Черновцы, Мариуполь. Для прогнозирования газообразования на полигоне ТБО г. Черновцы использовалась модель разложения первого порядка, которая является измененной версией модели LandGEM [8] со скорректированным значением потенциала газообразования ($L_0=150 \text{ м}^3 \text{ БГ/т ТБО}$) и значениями скорости разложения k для разных фракций отходов ($k_b=0,180$; $k_c=0,036$; $k_m=0,009 \text{ год}^{-1}$), где б – быстро-, с – средне-, м – медленно-разлагаемые органические фракции (соответственно: пищевые, садово-парковые, древесина/бумага/текстиль). Для расчетов был использован средний для Украины состав отходов (пищевые отходы – 36,1%, садовые отходы – 9,8%, бумага и картон – 14,3%, текстиль – 3,4%, древесина – 1,9%, резина, кожа, кости – 2,2%, другие органические отходы – 0,4%) [9]. Результаты моделирования для полигона ТБО г. Черновцы представлены для сценариев увеличения коэффициента сбора БГ с 65 до 90% по мере завершения эксплуатации.

Для моделирования газообразования на полигоне ТБО г. Мариуполь использовалась модифицированная версия модели 1-го порядка, включающая поправочный коэффициент метанообразования (ПКМ) для учета аэробных условий на полигоне (0,6 и 0,8 для консервативного и стандартного сценария, соответственно) и k , определенные на основании уровня осадков в регионе и оценки условий влажности на полигоне (0,14; 0,028 и 0,007 для быстро-, средне- и медленно-разлагаемых органических фракций соответственно). Значения L_0 для стандартной модели было принято $150 \text{ м}^3 \text{ БГ/т ТБО}$ и на 25% ниже для консервативного сценария. Принятая эффективность сбора для полигона г. Мариуполя – 60% с 2010 г. Образование БГ в 2008 г. оценивается на уровне 565...753 $\text{м}^3/\text{ч}$. Таким образом, результаты моделирования соответствовали результатам теста.

В связи с отсутствием точных данных по вывозу отходов за время эксплуатации полигонов, количество накопленных отходов оценивалось по объему тела полигона и плотности отходов. Количество ежегодного вывоза ТБО было получено на основании общего объема отходов и принятого ежегодного увеличения вывоза отходов на 2%.

Результаты моделирования газообразования и пробной откачки на полигонах гг. Черновцы и Мариуполь приведены на рис.1, 2.

*Результаты исследований газообразования
баро-пневматическим методом*

Результаты анализа образцов отходов демонстрируют низкое содержание органического вещества и общего органического углерода (9,5...18,6% и 3...7% соответственно), что свидетельствует о завершающей стадии биологического распада органики. Измеренная темпе-

ратура в теле полигона (20...22 °С) ниже, чем типичная температура для полигона с активным анаэробным газообразованием (35...40 °С). Наблюдаемая на одном участке температура 29 °С могла быть вызвана близостью возгорания ТБО, которые наблюдались по периметру полигона во время проведения измерений.

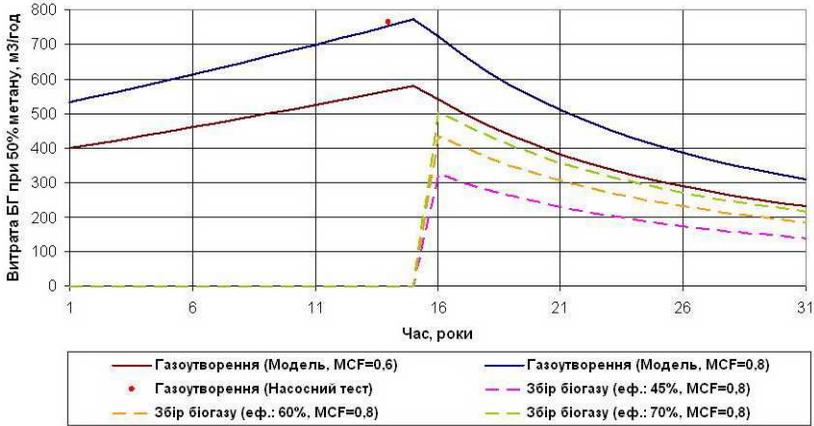


Рис.1 – Прогнозирование образования и сбора биогаза на полигоне ТБО г. Черновцы

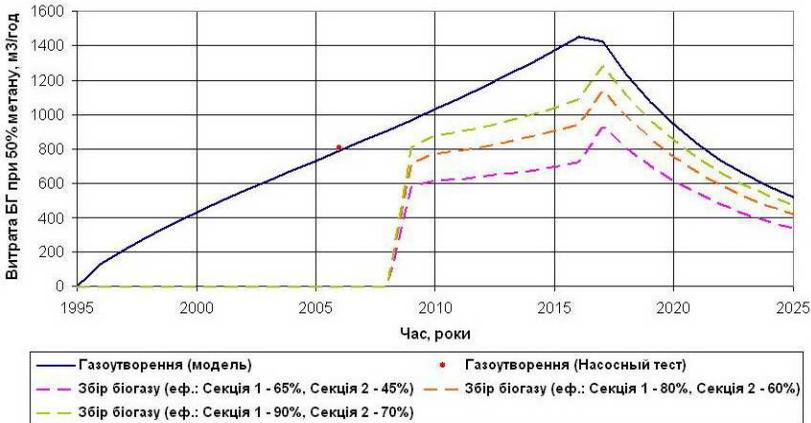


Рис.2 – Прогнозирование образования и сбора биогаза на полигоне ТБО г. Мариуполь

Результаты измерения состава газа: метан – 45...64%, двуокись углерода – 23,5...45,8%, азот – 1,3.. 22%, кислород – 0,4...2,6%. Повышенный уровень азота и наличие кислорода свидетельствуют о попадании воздуха в тело полигона при отборе образцов.

Данные потока БГ и изменения разрежения в контрольных зондах во время прокачки скважины были использованы для определения гидроразлических свойств полигона по методологии Hydro Geo Chem Inc. для анализа баро-пневматического теста. Данные измерения давления в контрольных зондах были использованы для определения вертикальной газопроницаемости и газообразования с помощью одномерной компьютерной модели транспорта газа с использованием атмосферного давления в качестве верхнего граничного условия. В табл.2 приведены результаты оценки вертикальной газопроницаемости материалов покрывающего слоя ($K_{\text{покр}}$), вертикальной и горизонтальной газопроницаемости отходов ($K_{\text{верт}}$ и $K_{\text{гориз}}$ соответственно) и пористости (\emptyset) (С- Симферополь, Ч- Чернигов).

Таблица 2 – Результаты оценки гидрофизических свойств полигонов

Зонд	$K_{\text{гориз}}$, дарси	$K_{\text{верт}}$, дарси	$K_{\text{покр}}$, дарси	\emptyset
С-1	305	1,7	1,0	0,2
С-2	1200	5,0	1,5	0,23
Ч-1	120	1,0	1,0	0,25
Ч-2	40	1,5	1,5	0,55
Ч-3	191	5	0,3	0,3
Три полигона в США	2,1...200	$7,9 \times 10^{-4} \dots 6,1^*$	$4,8 \times 10^{-7} \dots 0,19^*$	0,027...0,83

* в двух точках (из двадцати двух) $K_{\text{верт}} = 10$ и 20 дарси; $K_{\text{покр}} = 2,8$ и $6,1$ дарси.

Горизонтальная проницаемость для двух зондов отличалась более чем в 4 раза, однако для обоих зондов ее значения очень велики (для сравнения приведены характеристики полигонов, измеренные тем же методом на трех полигонах США [6]). Это связано с низкой степенью уплотнения отходов в теле полигона. Вертикальная газопроницаемость является также очень высокой, поэтому инфильтрация воздуха вблизи скважин может быть проблематичной при эксплуатации системы сбора БГ в случае недостаточно герметичной изоляции скважин и отсутствия верхнего покрытия полигона.

Обычно давление в полигоне, который находится в анаэробных условиях, выше атмосферного давления за счет газообразования. Измеренное давление в теле полигона было ниже атмосферного в семи зондах (разница между давлением в скважине и атмосферным давлением: $-0,306 \dots -0,052$ кПа) и выше атмосферного в двух зондах ($0,0114 \dots 0,0276$ кПа). Оцененный уровень выхода газа находился в диапазоне $16,5 \cdot 10^{-4} \dots 21 \cdot 10^{-4}$ м³ в час на 1 т отходов (м³/т·ч⁻¹), а уровень поглощения газа в диапазоне от $2,48 \cdot 10^{-4} \dots 42 \cdot 10^{-4}$ м³/т·ч⁻¹.

Разрежение в теле полигона, предположительно, может быть результатом: 1) возгораний отходов на полигоне, создающих разрежение в

очаге горения и приток БГ из окружающего пространства и атмосферного воздуха с поверхности полигона; или 2) реакции аэробного окисления метана.

Поглощение кислорода при окислении метана ($CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$), приводит к замещению 3-х молей газа на 1 моль образованного газа и возникновению разрежения в теле полигона. Если предположить, что разрежение вызвано только окислением метана, образование метана может быть получено путем пересчета количества поглощенного газа делением на два. Рассчитанный таким образом уровень удельного образования метана с 1 т отходов составляет $82,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{ч}^{-1}$. Принимая, что на полигоне накоплено 1,2 млн. м^3 (1 млн. т) отходов, образование метана составляет около $792 \text{ м}^3/\text{ч}$ или 6,9 млн. м^3 метана в год ($6,9 \text{ м}^3$ метана /т ТБО год⁻¹). Однако оцененный уровень метанообразования является, вероятно, завышенным, так как разрежение в теле полигона может отчасти быть вызвано возгораниями. Кроме того, высокая степень распада отходов и низкие температуры в теле полигона также дают основание предполагать низкое газообразование на полигоне.

На полигоне ТБО г. Чернигов во время насосного теста содержание метана на протяжении 3,5 ч откачивания постепенно снижалось с 64 до 58%, содержание O_2 составляло 0,2...0,5%, CO_2 – 32...33%, N_2 – до 10%. Температура газа составляла 18,3...20,4 °С – низкие температуры свидетельствуют о низкой активности анаэробных процессов в теле полигона. Из семи скважин в трех наблюдался фильтрат на уровне 4-5 м от поверхности – это необходимо учесть перед строительством полномасштабной системы сбора БГ и при оценке потенциальной эффективности сбора БГ. Анализ характеристик полигона проводился по показаниям трех контрольных зондов, которые продемонстрировали взаимосвязь давления в них и разрежения во время откачки БГ из тестовой скважины. Оцененные значения горизонтальной газопроницаемости отходов составляли 40...191 дарси, вертикальной – 1...5 дарси, покрытия – 1...1,5 дарси, эффективная газовая пористость – 0,25...0,55 (табл.2). Высокие показатели вертикальной газопроницаемости указывают на возможную проблему с инфильтрацией воздуха с поверхности полигона при эксплуатации системы сбора БГ. Давление в измерительных зондах находилось на уровне или немного ниже атмосферного давления (-0,096..0 кПа).

Оцененная вертикальная газопроницаемость отходов находилась в диапазоне 1,32 ...3,79 дарси. Средний уровень образования метана, рассчитанный для условия, что измеренные разрежения являются только результатом аэробного окисления метана, составляет $14,5 \text{ м}^3/\text{т ТБО} \cdot \text{год}^{-1}$ или 43,6 млн. м^3 в год ($4970 \text{ м}^3/\text{ч}$) со всего объема накопленных отходов

(3,75 млн. м³). В работе [10] представлены данные по сбору метана на санитарных обустроенных полигонах США во время эксплуатации полномасштабных систем сбора БГ – около 1,3-3,4 м³ СН₄ / т ТБО*год⁻¹. Таким образом, предположение о том, что аэробное окисление метана является единственной причиной разрежения и применение соответствующего метода расчета выхода БГ, вероятно, приводит к переоценке газообразования. Если разрежение частично вызвано наблюдаемыми на полигоне возгораниями, корректная оценка газообразования с применением баро-пневматического метода является затруднительной.

Таким образом, применение полевых тестов для оценки газообразования на полигонах ТБО позволяет определить условия в теле полигона и оценить величину газообразования на конкретном полигоне. Полученные данные могут быть применены для калибровки моделей газообразования. Оцененный потенциал газообразования на исследованных полигонах может составлять до 7,5 м³ БГ в год с тонны ТБО. При исследовании газообразования на четырех крупных полигонах ТБО в разных областях Украины были выявлены следующие особенности, влияющие на оценку потенциала образования биогаза:

- отсутствие достоверных данных о количестве и составе ТБО затрудняет калибровку моделей газообразования;

- наблюдается низкая степень уплотнения, а также высокая газопроницаемость верхнего слоя отходов из-за отсутствия поверхностного изолирующего покрытия, что может приводить к значительной инфильтрации воздуха в процессе эксплуатации полномасштабной системы сбора БГ. Закладка отходов слоем небольшой толщины по всей поверхности полигона приводит к аэробному разложению органики в верхних слоях полигона, усиленному увлажнению отходов и формированию большого количества фильтрата;

- при строительстве полномасштабной системы сбора БГ должны учитываться высокие уровни фильтрата и соответствующее снижение потенциальной эффективности сбора БГ;

- наблюдаемая высокая горизонтальная газопроницаемость и высокое соотношение горизонтальной и вертикальной проницаемости позволяет уменьшить риск инфильтрации воздуха через поверхность полигона, повысить качество БГ и увеличить расстояния между скважинами при строительстве полномасштабной системы сбора БГ;

- в двух полигонах были зафиксированы разрежения по всей глубине полигона, что свидетельствует об отсутствии активного газообразования на момент измерения. Причиной разрежений в теле полигона может быть окисление метана проникающим в тело полигона воздухом,

«каминный» эффект от очагов возгораний ТБО или комбинация обоих эффектов;

- возгорания на полигонах приводят к выгоранию метана и органики, образованию внутренних пустот и пожаров в теле полигона и могут приводить к созданию разрежения и подосу воздуха через поверхность или боковые склоны на полигонах с высокой газопроницаемостью;

- низкие температуры в теле двух полигонов и низкое содержание остаточного органического вещества в образцах с одного из полигонов свидетельствуют о низкой активности анаэробных процессов газообразования и низком остаточном содержании органики.

В целом, особенности принятой в Украине практики эксплуатации полигонов ТБО существенным образом влияют как на потенциал образования БГ, так и на возможности применения различных экспериментальных методов полевых исследований газообразования.

В наблюдаемых условиях целесообразным представляется усовершенствование процедуры проведения экспериментов:

- при проведении пробной откачки рекомендуется установка большего количества датчиков на разных глубинах, а также в нескольких направлениях от скважины для увеличения точности определения радиуса влияния скважины в условиях гетерогенного полигона ТБО;

- в условиях отсутствия газонепроницаемого покрытия дна и боковых поверхностей полигона применение баро-пневматического метода может быть затруднено в связи с возможным оттоком газа по преферентным путям (трещины в поверхности, участки отходов с низкой плотностью, пустоты), особенно при наличии очагов возгораний. Для измерения и учета всех потоков необходимо устранить возгорания и установить репрезентативно большое количество датчиков давления на разных глубинах с охватом большего объема полигона.

Оптимальным подходом для оценки потенциала газообразования представляется комбинация экспериментальных методов с использованием лабораторных измерений характеристик образцов свалочного тела для получения взаимоподтверждающих результатов.

1. Куцый Д.В., Матвеев Ю.Б., Пухнюк А.Ю. Тенденции развития технологий энергетической утилизации биогаза с производством энергии на полигонах ТБО// Коммунальная и промышленная теплоэнергетика. – 2011. – Т.33, №6. – С.64-72.

2. Fellner J, Scheongrundner P., Brunner P. Methanemissionen aus Deponien, Bewertung von Messdaten (METHMES). – Вена, 2003. – 107 P. <http://www.lebensministerium.at/suchergebnisse.html?queryString=methmes+bericht&Suche=Suche>.

3. Guidance on Pumping Trials to Determine Whether Installation of Gas Flaring Systems at Landfill Sites Can be Justified. Version 1.0. – UK Environment Agency, 2005. – 7 P.

4. Determination of Landfill Gas Production Flow Rate [electronic resource]: Method 2E / U.S. EPA, Emission Measurement Center. – Washington, 2012. – Access mode: <http://www.epa.gov/ttn/emc/methods/method2e.html> (20.02.12). – Title from document.
5. Bentley H., Walter G., Smith S., Tang J., Williamson C. Method and system for estimating gas production by a landfill or other subsurface source. – Patent No.: US 6,611,760 B2., Hydro Geo Chem Inc., Tucson, Arizona, 2003. – 11 P.
6. Bentley H.W. Baro-pneumatic Estimation of Landfill Gas Generation Rates at Four Landfills in the Southeastern United States [electronic resource]: proceedings of SWANA's 28th Annual Landfill Gas Symposium / Harold W. Bentley, Stewart J. Smith, Todd Schrauf. – San Diego: SWANA, 2005. – 1 CD-disk (CD-ROM). – System requirements: Pentium ; 128 Mb RAM ; CD-ROM ; Windows 2003/XP ; PDF Reader 7.0. – Title from List of Papers.
7. Jain P., Powell J., Townsend T., Reinhart D. Estimating the Hydraulic Conductivity of Landfilled Municipal Solid Waste Using the Borehole Permeameter Test // Journal of Environmental Engineering. – Vol. 132, Issue 6, 2006. – 8 P.
8. Landfill Gas Emission Model (LandGEM), version 3.02, User's Guide. – U.S. Environmental Protection Agency, 2005. – Access mode: <http://www.epa.gov/ttn/catc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>.
9. Пухнюк А.Ю. Исследование газообразования на старых украинских полигонах твердых бытовых отходов // Коммунальная и промышленная теплоэнергетика. – 2012. – Т.34, №4. – С.83-93.
10. SCS Engineers, Augenstein D. Comparison of models for predicting landfill methane recovery. 1997, Report for SWANA, File No. 0295028. Access mode: <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy97/26041.pdf>.

Получено 01.08.2012

УДК 628

Э.И.САЛИЕВ, канд. наук гос. упр.

Национальная академия природоохранного и курортного строительства АР Крым, г. Симферополь

Н.Б.АКУЛОВА

Крымское республиканское предприятие «Производственное предприятие водопроводно-канализационного хозяйства», г. Красноперекопск

ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННОГО ХОЗЯЙСТВА

Охарактеризовано современное состояние отрасли водопроводно-канализационного хозяйства Украины, очерчен круг проблем, не позволяющих предприятиям, предоставляющим услуги водоснабжения и водоотведения, работать эффективно с учетом принципов ресурсосбережения и инвестиционной привлекательности. Обоснована необходимость перехода к рыночной модели функционирования и создания конкурентной среды в этой отрасли. Рассмотрены основные аспекты повышения эффективности работы предприятий водопроводно-канализационного хозяйства и соответствующие методы решения поставленных проблем.

Охарактеризовано сучасний стан галузі водопровідно-каналізаційного господарства України, окреслено коло проблем, які не дозволяють підприємствам, що надають послуги водопостачання і водовідведення, працювати ефективно з урахуванням принципів ресурсозбереження та інвестиційної привабливості. Обґрунтовано необхідність переходу до рин-