

# Исследования состава биогаза на полигоне твердых бытовых отходов

**А.Н. Чусов**, заведующий кафедрой, доцент, к.техн.н.<sup>1</sup>

**В.И. Масликов**, профессор, д.техн.н.<sup>2</sup>

**Д.В. Молодцов**, старший преподаватель<sup>3</sup>

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

e-mail: chusov17@mail.ru<sup>1</sup>, vmaslikov@list.ru<sup>2</sup>, kovu@bigcats.ru<sup>3</sup>

## Ключевые слова:

твердые бытовые отходы,  
полигоны, биогаз,  
рекультивация.

*В статье рассмотрен практический опыт выполнения работ на полигонах твердых бытовых отходов с целью получения информации о пространственном распределении основных компонентов биогаза на различных участках захоронения отходов. Это необходимо для районирования территории полигона по степени насыщенности биогазом, оценки энергетического потенциала и создания систем дегазации при обосновании рекультивационных работ.*

## 1. Введение

В Ленинградской области и в регионе г. Санкт-Петербурга ежегодно образуется более 10 млн м<sup>3</sup> твердых бытовых отходов (ТБО), основная часть которых захоранивается на полигонах (более 20 полигонов) и многочисленных свалках. Некоторые полигоны, в том числе крупные, в ближайшее время должны быть закрыты и рекультивированы [1]. Для планирования работ по рекультивации необходимо иметь представление о процессах, происходящих в теле полигона, характеристикой которых являются состав и интенсивность эмиссии биогаза, образующегося в процессе разложения органосодержащих фракций отходов. Неконтролируемая эмиссия свалочного биогаза представляет опасность для окружающей среды и здоровья человека, так как в биогазе содержатся парниковые, горючие и токсичные вещества — метан, углекислый газ, сероводород и др. (более 100 примесей). Свалочный метан не только сильный парниковый, но и взрывоопасный газ, вызывает возгорание свалочных масс, приводит к сильному загрязнению атмосферы высокотоксичными соединениями. Одновременно в процессе биоразложения отходов образуется токсичный фильтрат, загрязняющий подземные и поверхностные воды, а также почвенный покров на прилегающей территории. Для снижения эмиссии загрязняющих веществ в окружающую среду полигоны должны иметь эффективные системы инженерной

защиты, тип которых определяется их состоянием и биохимическими процессами, протекающими при разложении отходов. Полноценной, обеспечивающей экологическую безопасность полигона, но относительно дорогой является система, предусматривающая сбор биогаза. Такая система представляет собой сложное инженерное сооружение, включает верхнее и нижнее многослойные изолирующие покрытия; газовые скважины; коллекторную и дренажную сети для отвода биогаза и фильтрата; очистное оборудование и др. Снизить затраты на обустройство полигона можно, получая дополнительный доход от энергетического использования биогаза в качестве топлива для нужд местной энергетики. Таким образом, вид рекультивации будет во многом определяться биогазовым потенциалом полигона [2]. Для оценки объема эмиссии биогаза необходимо провести специальные натурные исследования, так как математические модели не могут в полной мере отразить специфику функционирования конкретного полигона [3,4]. Разные объемы и морфологический состав отходов, время и способ их захоронения, климатические условия, температурный режим и другие факторы обуславливают изменчивость состава, мозаичность распределения газовой эмиссии на поверхности тела полигона, сезонные и годовые колебания выброса биогаза [5].

В настоящее время возрастает потребность в создании универсальной методики проведения на-

турных исследований эмиссии и состава биогаза на полигонах ТБО, позволяющей сопоставлять полученные результаты. Зарубежные методические разработки не учитывают реальное состояние российских полигонов, поэтому их практическое использование вызывает большие затруднения.

Специалисты кафедры «Гражданское строительство и прикладная экология» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ) при выполнении международных проектов INCO Copernicus и NISMIST, а также натуральных исследований на ряде действующих полигонов получили практический опыт организации и проведения работ по зонированию состава газов в теле полигона. Основной целью исследований было получение информации о пространственном распределении основных компонентов биогаза на различных участках захоронения отходов для районирования территории полигона по степени насыщенности биогазом и для создания систем дегазации.

## 2. Аппаратура для анализа и организация отбора проб

Состав газа в поверхностном слое отходов может существенно различаться в зависимости от глубины их залегания. Начиная примерно с глубины 0,5 м, концентрация метана в верхнем слое отходов возрастает до 40% (об.) и более, что представляет практический интерес.

Для отбора проб биогаза используется портативный газоанализатор, например GA2000 plus, предназначенный для анализа состава биогаза различного происхождения непосредственно на месте измерения. Основные технические характеристики газоанализатора GA2000 Plus:

- определяемые газы —  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ;
- диапазон измерений —  $\text{CH}_4$  — 0–100%;  $\text{CO}_2$  — 0–100%;  $\text{O}_2$  — 0–25%;  $\text{CO}$  — 0–2000 ppm;  $\text{H}_2\text{S}$  — 0–500 ppm (0–5000 ppm с внешним датчиком);
- время определения концентрации —  $\text{CH}_4 \leq 20$  секунд;  $\text{CO}_2 \leq 20$  секунд;  $\text{O}_2 \leq 20$  секунд;  $\text{CO} \leq 60$  секунд;  $\text{H}_2\text{S} \leq 60$  секунд;
- индикация пиковых значений  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ ;
- рабочая температура — от 0°C до 40°C.

Газоанализатор имеет взрывобезопасное исполнение, в него встроен побудитель расхода с фильтрами для защиты от влаги и пыли в газовой линии. Перед началом работы с газоанализатором необходимы калибровка нуля азотом высокой чистоты и замена загрязненных фильтров.

Для отбора проб используется зонд, изготовленный из нержавеющей стали в виде трубки рабочей длиной до 1 м (рис. 1). Нижняя часть зонда представляет заостренный конец для удобства введения в слой отходов и имеет ряд отверстий для забора ис-

следуемого газа. Верхняя часть зонда оснащена штуцером для подключения газовой линии газоанализатора. Для фиксации глубины погружения зонда в слой отходов используется ограничительное кольцо.

Предварительно на ситуационном плане полигона по согласованию с представителями эксплуатирующей организации намечаются участки отбора проб, например в узлах сетки 50 x 50 м. Конкретные точки отбора проб определяются непосредственно на месте в зависимости от возможности проведения измерений. Для их фиксации целесообразно использовать защищенный (по стандарту IPX7) портативный GPS/ГЛОНАСС-навигатор с трехкоординатным компасом и топографическими картами места размещения полигона, обеспечивающий точность определения координат не более 3 м.

С целью обеспечения безопасности при проведении работ замеряется температура отходов на поверхности полигона для выявления зон с повышенной температурой, что может свидетельствовать о подпочвенном горении свалочных масс. Предпочтительнее использовать бесконтактный метод измерения температуры поверхности тела полигона при помощи тепловизора с автофокусировкой и высоким разрешением, а в случае его отсутствия можно использовать пирометр. Следует избегать прохождения таких зон и запрещается производить в них отбор проб.

Отбор проб зондом на участках полигона рекомендуется производить на глубине (Н) 50–100 см от поверхности. На меньшей глубине возможно подсасывание воздуха, ведущее к искажению измеряемой концентрации. При более глубоком введении зонда,

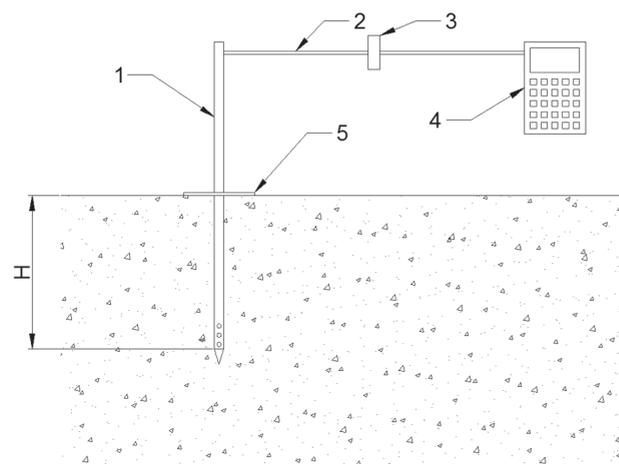


Рис. 1. Схема отбора проб биогаза из верхнего слоя полигона: 1 — проботборник (зонд); 2 — газовая линия; 3 — фильтры для защиты газоанализатора от пыли и влаги; 4 — газоанализатор со встроенным побудителем расхода; 5 — ограничительное кольцо; Н — глубина отбора пробы биогаза

как правило, возрастает риск попадания фильтрата в газовую линию, что может вызвать повреждение газоанализатора. В случае засасывания фильтрата с глубины в зонд необходимо выбрать на ближайшем расстоянии другую «сухую» точку. Ввиду наличия в отходах фракций, затрудняющих ввод зонда в месте отбора пробы, в слое отходов пробивается отверстие при помощи лома, изготовленного из материала, не вызывающего искрения при контакте с металлом.

Продолжительность отбора проб устанавливается с учетом времени заполнения газовой линии и последующего измерения концентрации анализируемых компонентов (около 90 с). После каждого измерения необходимо продувать газовую линию атмосферным воздухом в течение порядка 30 секунд для исключения влияния остаточного газа предыдущего измерения. Измерение состава газов в верхнем слое отходов тела полигона необходимо проводить только при благоприятных погодных условиях (положительная температура воздуха, отсутствие осадков, слабый ветер и т.д.).

Рекомендуется проводить работы на полигоне группой не менее двух человек. В состав группы обязательно должен входить представитель эксплуатирующей организации, хорошо ориентирующийся на полигоне и знающий технологическую и экологическую обстановку. Отбор проб должен осуществляться сотрудниками, прошедшими обучение (теоретическое и практическое) по методике отбора проб, работе с используемым оборудованием и соблюдению требований охраны труда и пожаробезопасности.

Основными измеряемыми показателями являются концентрация метана и углекислого газа и сопутствующих примесей — сероводорода, кислорода, угарного газа. Регистрация результатов измерения должна производиться в память устройств и заноситься в журнал (табл. 1).

Следует обратить внимание на содержание сероводорода, являющегося высокотоксичным газом, и монооксида углерода, выделяемого при горении отходов в теле полигона. В случае наличия этих газов в месте отбора пробы необходимо проявлять особую осторожность и покинуть данный участок полигона.

Таблица 1

Пример представления данных в журнале измерений

№ точки	Широта по системе WGS, ° N	Долгота по системе WGS, ° E	Концентрация				
			CH <sub>4</sub> , %	CO <sub>2</sub> , %	O <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> S, ppm	CO, ppm
1							
2							
...	...	...	...	...	...	...	...

### 3. Обработка результатов измерений

Нередко для конкретного полигона отсутствуют необходимые геодезические данные. В этом случае рекомендуется использовать доступный программный пакет SASPlanet для получения и координатной привязки космоснимка местности в системе координат WGS84. Обработку результатов измерений рекомендуется производить с использованием распространенного и простого в освоении программного комплекса MapInfo, позволяющего строить карты расположения точек отбора проб, двух- и трехмерные тематические карты зонального распределения компонентов биогаза в верхнем слое отходов.

В последнее время проявляется интерес к использованию биогаза полигонов ТБО на стадии эксплуатации путем создания временной газосборной сети, так как это позволяет уменьшить выброс загрязняющих веществ и более полно использовать их биогазовый потенциал. Для выбора репрезентативных мест размещения скважин необходимо иметь предварительную информацию о потоках биогаза на поверхности тела полигона на данный момент, проводя газогеохимическую съемку. Такие исследования СПбГПУ проводил на одном из крупных действующих полигонов Ленинградской области. В качестве примера на рис. 2 представлено расположение точек отбора проб. С учетом большой площади полигона измерения были проведены в 90 точках (удаленность соседних точек не более 50 м).

На рис. 3 представлены трехмерные тематические карты зонального распределения метана, углекислого газа, сероводорода и кислорода в верхнем слое отходов, позволяющие планировать мероприятия на конкретных участках полигона.

По результатам исследований выявлены обширные площади с высокой концентрацией метана на эксплуатируемых участках и, соответственно, с существенным энергетическим потенциалом.

На следующем этапе исследований определяют продуктивность зон с высоким содержанием метана в поверхностном слое отходов. Для этого могут быть использованы методы аналитический, скважинный и с помощью бокса-газоуловителя.

Для предварительной оценки объемов выделяющегося биогаза на полигоне можно использовать упрощенный аналитический метод. Имея информацию о годовом объеме захороненных отходов с начала эксплуатации полигона на текущий момент времени с использованием математической модели, например Табасарана—Реттенбергера — формулы (1) и (2), можно определить удельный объем биогаза (метана), выделяющегося при разложении отходов:

$$G_0 = 1,868 \cdot C_{орз} (0,14 \cdot T + 0,028), \quad (1)$$

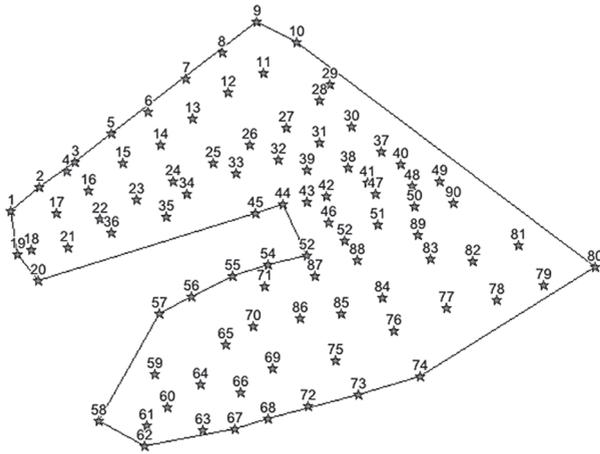


Рис. 2. Расположение точек отбора проб на теле полигона

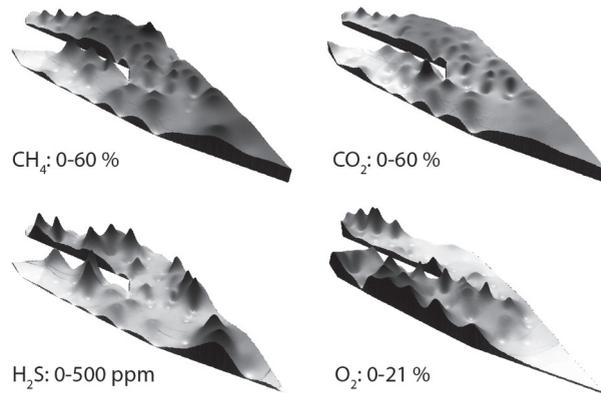


Рис. 3. Трехмерные тематические карты содержания метана, углекислого газа, сероводорода и кислорода в газе поверхностного слоя отходов полигона ТБО

где  $G_0$  — объем биогаза, выделяющегося при разложении отходов,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;

$C_{\text{орг}}$  — содержание органического углерода,  $\text{кг}/\text{т}$ ;  
 $T$  — температура отходов в теле полигона.

С использованием зависимости (2) определяется удельный объем биогаза, выделившегося на текущее время:

$$G_t = G_0(1 - 10^{-k \cdot t}), \quad (2)$$

где  $G_t$  — объем биогаза, выделившегося за расчетный период  $t$  лет,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;

$k$  — константа разложения отходов.

Окончательный вид математической модели корректируется с учетом лабораторных экспериментов с образцами отходов, захораниваемых на полигоне [6].

Объем метана, выделяемого  $i$ -м участком полигона, определяется в предположении о распределении общей эмиссии по всей поверхности полигона пропорционально площади отдельных участков и измеренной концентрации метана на этих участках, по формуле (3):

$$V_i = V_{\text{общ}} \cdot \frac{C_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^n (C_i \cdot F_i)}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{общ}}$  — эмиссия метана со всего полигона,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$C_i$  — концентрация метана в поверхностном слое отходов  $i$ -го участка полигона, % об.;

$n$  — общее число участков;

$F_i$  — площадь  $i$ -го участка полигона,  $\text{м}^2$ .

Предварительные расчеты, выполненные для рассматриваемого полигона, показали, что объем эмиссии метана на участках с высоким содержанием в поверхностном слое отходов составляет около  $800 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Целесообразность его использования может быть определена в результате технико-экономических расчетов. Благоприятным фактором для создания системы сбора биогаза является отсутствие возгораний отходов в теле полигона, так как при проведении измерения в пробах не зафиксировано содержание монооксида углерода.

Более точным, но затратным методом определения объемов выделяющегося биогаза является «скважинный», позволяющий оценить газопродуктивность слоя отходов [7]. На участках с высоким содержанием метана производится бурение нескольких скважин различной глубины (от 5 до 20 м) для контроля эмиссии с различных газогенерирующих слоев отходов. Скважины обычно размещают на расстоянии 25-50 м друг от друга. При достижении заданной глубины и после зачистки скважин они обсаживаются стальными трубами с фильтрами в нижней части. В процессе бурения осуществляется визуальный осмотр керна, отбор проб свалочной массы с различной глубины для газокерновой съемки. Как правило, осуществляется контроль содержания метана в жидкой и газовой фазах [8].

В условиях полигонов ТБО, где поток эмиссии биогаза, как правило, не превышает  $2000 \text{ г}/\text{м}^2$  в сутки и не создает практически давления выше атмосферного из-за открытости всей поверхности свалочного тела, продуктивность скважины определяют путем откачки биогаза с измерением содержания метана и углекислого газа до и после откачки и фиксации времени восстановления их первоначальной концентрации. В период пробной откачки рекомендуется проводить измерение физических параметров газового поля в скважинах: давление, влажность, температуру и др. Периодический отбор проб должен осуществляться не реже одного раза в месяц, чтобы учесть влияние сезонных изменений

погоды на изучаемые параметры. Представляется целесообразным организовать наблюдения в течение одного-двух лет.

За рубежом для оценки интенсивности эмиссии биогаза из верхнего слоя тела полигона используется также относительно простой, но менее точный метод — с применением газоуловителя в виде специального бокса (flux box) объемом около 50 л, который устанавливается на исследуемом участке таким образом, чтобы исключить в него подсос воздуха. Бокс имеет штуцеры для отвода вытесняемого воздуха, а также для подключения газоанализатора, работающего в замкнутом проточном режиме. Через определенный промежуток времени включается газоанализатор и определяется концентрация основных

компонентов биогаза и кислорода. Зная объем бокса и контролируя изменение концентрации метана во времени, можно определить газопродуктивность исследуемого участка ( $\text{мг/м}^2 \text{ мин}$ ) [9].

#### 4. Выводы

Интегральной характеристикой состояния полигона и протекающих процессов разложения отходов является состав биогаза в верхнем слое свалочных отложений. Предложена и апробирована экспресс-методика натуральных исследований состава биогаза на полигонах ТБО, позволяющая в кратчайшие сроки получить информацию о пространственном распределении основных компонентов биогаза на поверхности тела полигона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долгосрочная целевая инвестиционная программа обращения с твердыми бытовыми и промышленными отходами в Санкт-Петербурге на 2012–2020 годы. Раздел 1. 2011. <http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/toxics/recycle/LIP-part1.pdf>.
2. Метан со свалок ТБО. Каталог / Федеральное агентство по науке и инновациям «РусДЕМ Энергоэффект». — 2009. — 80 с.
3. Федоров М.П., Кораблев В.В., Масликов В.И., Иокша Е.О. «Углеродные» инвестиции в энергетическое использование полигонов ТБО // Экология и жизнь: научно-популярный и образовательный журнал. 2008. №4 (77). — С. 16–22.
4. Энергетическое использование эмиссии метана на полигоне твердых бытовых отходов Санкт-Петербурга для сокращения парниковых выбросов и привлечения инвестиций в рекультивацию / Федоров М.П., Зинченко А.В., Кораблев В.В., Масликов В.И., Чусов А.Н., Иокша Е.О. // Научно-технические ведомости СПбГПУ №6(70)/2008. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — С. 135–142.
5. Зональное определение эмиссий биогаза на полигоне ТБО для оценки геоэкологического состояния и обоснования управления процессами разложения отходов при рекультивации / А.Н. Чусов, В.И. Масликов, Д.В. Молодцов, М.Г. Рыжакова // Научно-технические ведомости СПбГПУ №2-1(147)/2012. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — С. 260–265.
6. Лабораторные исследования разложения отходов в биореакторах для оценки биогазового потенциала и выбора мероприятий по рекультивации полигонов ТБО / А.Н. Чусов, В.И. Масликов, Е.Ю. Негуляева, Д.В. Молодцов А.В. Черемисин // Научно-технические ведомости СПбГПУ №2-2(147)/2012. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — С. 229–235.
7. Rettenberger G. Die Bedeutung der Methan-, Kohlendioxid- und HKW-Emissionen von Deponien für die Atmosphäre. In: Rettenberger/Stegmann (Hrsg.): Deponiegasnutzung. Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft Bd. 2. Economica Verlag, Bonn, 1991. S. 9–26.
8. Федоров П.М. Мониторинг за воздействием полигона твердых бытовых отходов на окружающую среду // Региональная экология. — 2001. № 3-4. — С. 48–51.
9. Rettenberger G. Forschungsbericht 103 02 207 Teil II: Untersuchung zur Entstehung, Ausbreitung und Ableitung von Zersetzungsgasen in Abfallablagerungen. Texte des Umweltbundesamtes 13. Berlin, 1982.

## Researches of Biogas Composition on Landfill

**A.N. Chusov**, Head of Chair, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Saint-Petersburg State Polytechnical University

**V.I. Maslikov**, Professor, Doctor of Engineering, Professor, Saint-Petersburg State Polytechnical University

**D.V. Molodtsov**, Senior Lecturer, Saint-Petersburg State Polytechnical University

*A practical experience related to execution of work on landfills in order to obtain information on spatial distribution of biogas's main components in different areas of waste disposal for landfill site zoning depending on biogas saturation degree, for energy potential assessment and creation of degassing systems for justification of remediation has been considered in this paper.*

**Keywords:** municipal solid waste, landfills, biogas, remediation.