

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА БИОГАЗА НА ПОЛИГОНЕ ТКО «СТРЕЛЕЦКОЕ»**Трубаев П.А.¹, Веревкин О.В.²**¹ БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород; ² ООО «ТК «Экотранс», г. Белгород**Аннотация**

Целью работы является обобщение данных по анализу состава биогаза, произведенным на полигоне ТКО «Стрелецкое» (Белгородская область) в период с 2017 г. по настоящее время с целью оценки его среднего состава и его изменения. Состав и выход биогаза исследовался в экспериментальной линии из трех скважин и в четырех системах газосбора общей площадью 1,75 Га, сооруженных на полигоне в 2017–2020 г. По результатам измерений содержание метана, без учета присосов атмосферного воздуха, составляет от 35 до 70% и постоянно для каждого газосборного поля. Практика эксплуатации систем газосбора показывает большую важность герметизации тела полигонов для предотвращения присосов воздуха. Мониторинг естественного выхода свалочного газа с тела полигона в 471 скважине показал неравномерный характер газообразования в различных точках, поэтому обустройство отдельных наблюдательных и рабочих газовых скважин может не позволить определить средние показатели по полигону. Исследования состава и выхода биогаза в течение длительного времени показали стабильность показателей и их зависимость только от технических характеристик участка полигона. Сезонность на выход метана влияет мало, поэтому обследование для климатических условий, подобных Белгородской области, возможно проводить в любое время года. Проведенные исследования показали, что ГОСТ 59417-2021 не позволяет проводить эффективное определение биогазового потенциала. Для решения этой задачи предлагается экспресс-метод обследования с обустройством временных скважин и определением параметров биогаза с использованием переносного оборудования.

Ключевые слова: биогаз, свалочный газ, состав, выход, стабильность, инструментальные замеры.

STUDY OF BIOGAS COMPOSITION AT THE MSW 'STRELETSKOE' LANDFILL SITE**Pavel Trubaev¹, Oleg Verevkin²**¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod² Transport Company Ecotrans LLC**Abstract**

The purpose of the work is to summarize data on the analysis of the composition of biogas produced at the Streletskoye MSW landfill (Belgorod region) from 2017 to the present in order to assess its average composition and its changes. The composition and yield of biogas was studied in an experimental line of three wells and in four gas collection systems with a total area of 1.75 hectares, built at the site in 2017–2020. According to the results of aeration, the methane content without taking into account leaks ranges from 35 to 70% and is constant for each gas collection field. The practice of operating gas collection systems shows the great importance of sealing the body of landfills to prevent atmospheric air suction. Monitoring of the natural release of landfill gas from the landfill body in 471 wells showed an uneven nature of gas formation at different points, so the installation of individual observation and working gas wells may not allow determining the average indicators for the landfill. Studies of the composition and yield of biogas over a long period of time have shown the stability of the indicators and their dependence only on the technical characteristics of the landfill site. Seasonality has little effect on methane output, so surveys for climatic conditions similar to the Belgorod region can be carried out at any time of the year. The conducted



studies showed that GOST 59417-2021 does not allow for an effective determination of biogas potential. To solve this problem, an express survey method is proposed with the installation of temporary wells and determination of biogas parameters using portable equipment.

Keywords: *biogas, landfill gas, composition, yield, stability, instrumental measurements.*

Содержание

1. Введение.....	123
2. Материалы и методы	125
2.1. Характеристика систем газосбора	125
2.2. Измерительные приборы	126
2.3. Особенности состава биогаза	127
3. Результаты и обсуждение	129
3.1. Измерение состава биогаза на северной части полигона ТКО	129
3.2. Исследование естественного выхода биогаза на газосборном поле «Север-2».....	132
3.3. Измерение состава биогаза на южной части полигона ТКО	134
3.5. Средний объем биогаза, откачиваемый с полигонов ТКО	137
3.6. Оценка стабильности выхода биогаза	138
3.7. Оценка содержания CO ₂ в биогазе.....	140
3.8. Оценка среднего состава биогаза полигонов ТКО.....	140
4. Выводы.....	142

1. Введение

В мире не существует универсальной одновременно и экономически и экологически эффективной технологии утилизации твердых коммунальных (бытовых) отходов (ТКО или ТБО). Раздельный сбор и/или сортировка полностью проблему накопления отходов не решает. После отбора всех полезных фракций остаются не менее 20-40% пищевых отходов, так же загрязненная бумага, текстиль. Переработка органических отходов возможна тремя способами:

– складирование на полигонах ТКО для естественного разложения, что требует больших площадей и сопровождается загрязнением атмосферы и почвы [1];

– термическая утилизация (сжигание), что кроме возможных экологических рисков сопровождается большими затратами. По оценке НП «Совет рынка» величина удельных капитальных затрат на строительство объектов утилизации ТБО на 1 кВт мощности в 6 раз больше удельных капитальных затрат на строительство новых АЭС и в 13 раз дороже для газовой генерации, при этом более 92% от общей стоимости приходится на неэнергетическое оборудование¹;

– биопереработка путем анаэробной ферментации в биогазовых установках или ферментерах, что так же характеризуется высокой стоимостью из-за необходимости создания необходимых температурно-влажностных условий, использования специальных термофильных или мезофильных бактерий, небольшой производительности установок. Загрязнение ТКО токсичными веществами приводит к возникновению аварийных ситуаций с возможностью полной остановки процесса и гибели бактерий.

¹ Заключение № 24 от 19 марта 2019 г. по итогам расширенного совместного заседания Секции по вопросам антимонопольного законодательства в части регулирования и контроля за деятельностью отраслей топливно-энергетического комплекса и обеспечения конкуренции в отраслях топливно-энергетического комплекса и Секции по законодательному регулированию деятельности естественных монополий топливно-энергетического комплекса Экспертного совета при Комитете Государственной Думы по энергетике



Поэтому даже в развитых странах значительная часть бытовых отходов отвозится на полигоны, в Евросоюзе эта доля равна 29% [2]. В России, по данным государственного доклада на полигоны ТКО в 2021 г. поступило около 92% отходов [3], а в 2022 г. – 80% [4]. Такое резкое снижение значение за один год связано не с реальным изменением ситуации, а с изменением отчётности, когда отходы, поступающие на мусоросортировочные комплексы, относят к категории «Обработанные», хотя потом после отбора полезных фракций все равно в основной массе захораниваются на полигонах.

Таким образом полигоны ТКО являются и будут являться неизбежной структурой жилищно-коммунального комплекса страны.

Органические отходы на полигонах, кроме всех известных негативных факторов, оказывают еще один вид воздействий на окружающую среду – выделяющийся биогаз, который еще называют свалочным газом. В теле полигона ТКО в анаэробных условиях в результате жизнедеятельности метаногенных бактерий образуется биогаз, состоящий из метана, углекислого газа и азота и небольшого количества токсичных и органических газов. С 1 Га полигона ТКО в год выделяется около 300 м³/ч или 3 тыс. т/год биогаза [5]. Выбросы метана с полигонов ТКО России составляют 20 млрд. м³/год (или 10 млн. м³/год на 100 тыс. чел.) [6]. Вклад полигонов ТКО в общую эмиссию метана составляет около 10% (рис. 1).



Рис. 1. Источники метана в мире [7]

Образование и выделение биогаза на полигонах происходит непрерывно в течение от 17 до 25...30 лет. Парниковый эффект от метана сильнее, чем от углекислого газа, на величину в 28 раз при оценке за 100-летний период [8] или в 86 раз, если оценивать 20-летний период [9]. По данным работы [7] вклад углекислого газа в парниковый эффект равен 7,2°C, метана 0,8°C. В структуре парниковых выбросов вклад, вносимый отходами, по оценке ООН составляет 4,54% (<https://climatetrace.org/>), в России эта величина равна 4,5% [6].

В связи с этим для предотвращения негативного воздействия биогаза на окружающую среду необходимо осуществлять его сбор и обезвреживание. Прямое сжигание биогаза является самым простым и широко используемым методом утилизации, позволяющим преобразовать метан в углекислый газ с многократным снижением парникового эффекта и уничтожением вредных примесей. Это устоявшаяся, недорогая и мало обслуживаемая технология. Такой способ утилизации биогаза не требует удаления H₂S, и влаги. Так как биогаз на 40-60% состоит из метана, он является альтернативным (местным) топливом и поэтому его термическая утилизация может происходить с выработкой электроэнергии или тепловой энергии. Энергетическая утилизация газа с площади полигона 1 Га позволяет в год вырабатывать [5]:

- 5 млн. кВт·ч электроэнергии (0,6 МВт);
- 9 тыс. Гкал тепловой энергии (1 Гкал/ч) при использовании в качестве котлопечного топлива или 6 тыс. Гкал (0,7 Ккал/ч) при когенерации.

Утилизация биогаза со всех российских полигонов позволит обеспечить около 2% объема потребления электроэнергии в стране [5]. Как правило, система утилизации



биогаза рассматривается как относительно самостоятельный проект, не связанный технологически и экономически с полигоном [10].

Газоиспользующие устройства традиционно рассчитываются на топливо заданного состава. В связи нестабильностью условий образования биогаза в теле полигона ТКО (вызванное вариацией состава отходов, влажности, температуры), состав биогаза может изменяться в весьма широких пределах, что затрудняет выбор и эксплуатацию оборудования для его энергетического использования.

Для оценки биогазового потенциала полигонов ТКО для разработки проектной документации по их дегазации предусмотрен ГОСТ 59417-2021 «Определение биогазового потенциала полигонов твердых коммунальных отходов с откачкой биогаза из вертикальных скважин и утилизацией на факельной установке. Общие технические условия» (применение добровольное). ГОСТ предусматривает сооружение на полигоне наблюдательных скважин, их количество и местоположение определяется расчетом, в зависимости от площади и мощности насыпи отходов, работы по исследованию биогазового потенциала полигона ТКО продолжают непрерывно от 3 до 12 мес.

Целью работы является обобщение данных по анализу состава биогаза, произведенным на полигоне ТКО «Стрелецкое» (Белгородская область) в период с 2017 г. по настоящее время с целью оценки его среднего состава и его изменения.

2. Материалы и методы

2.1. Характеристика систем газосбора

Исследование проводилось на полигоне твердых коммунальных отходов, расположенном по адресу: Белгородская обл., Белгородский р-н, с. Стрелецкое, ул. Зареченская (рис. 2). Полигон содержит участок, выведенный из эксплуатации площадью 152 тыс. м² и действующие участки общей площадью 142,308 м². Он обслуживает город Белгород и три муниципальных района (Белгородский, Борисовский и Грайворонский), общее количество жителей в которых – 554 тыс. человек. На полигоне расположены мусоросортировочный комплекс мощностью 100 тыс. т в год и производственные линии по выпуску пластиковых изделий и древесных брикетов из вторичного сырья. Вывод из эксплуатации полигона запланирован на 2025–2028 годы.

В течение 2017 – 2020 годов на полигоне были сооружены системы газосбора биогаза общей площадью 1,75 Га (табл. 1).



- 1 – участок «Северный» («Экоком»), окончание функционирования в 2006 г.;
- 2 – действующий участок полигона;
- 3 – участок, выведенный из эксплуатации более 10 лет («старая городская свалка»);
- 4 – мусоросортировочный комплекс и производственный участок по переработке вторичного сырья;
- 5-9 – действующие системы газосбора (1,75 Га);
- 10 – сооружаемая система газосбора (0,28 Га);
- 11 – перспективный план сооружения систем газосбора (10,76 Га).

Рис. 2. Схема полигона ТКО



Таблица 1

Характеристики систем газосбора

№	Наименование, поз. на рис. 2	Количество скважин	Площадь системы газосбора, м ²	Средний выход биогаза, м ³ /ч	Период эксплуатации	Использование биогаза
5	Экспериментальная линия, поз. 5	3	–	6*	июнь – декабрь 2017 г.	Не используется
6	«Север-1», поз. 6	44	700	117,5*	с сентября 2017 г.	Отопление цеха 1 493 м ² (котел 0,4 МВт), сжигание на факеле
8	«Север-2», поз. 8	572	10 296	732,6**	с сентября 2019 г.	
7	«Юг», поз. 7	52	1 000	137,4*	с августа 2018 г.	Печь для сушки древесины (1 МВт), отопление двух сортировочных модулей (0,6 МВт), производство электроэнергии (0,27 МВт), сжигание на факеле
9	«Юг-2», поля 1 и 2, поз. 9	337	5 500	590***	с марта 2020 г.	
Всего		1005	17 496	1583,5	–	–

* – по данным измерений; ** – прогноз по данным измерений на части поля (252 из 572 скважин); *** – проектное значение

Измерения проводились при отборе газа из скважин при сооружении систем газосбора и из газопроводных линий действующих систем газосбора.

2.2. Измерительные приборы

Для измерений использовались оборудование, указанное в табл. 2.

Таблица 2

Основные измерительные приборы

Наименование	Измеряемые величины	Диапазон измерения	Назначение
Газоанализатор ФП-34 (НПОДО «ФАРМЭК», Республика Беларусь)		CH ₄	0...100%
		O ₂	0...25%
		H ₂ S	0...100 мг/м ³
		CO ₂	0...2,5%
Газоанализатор MRU Vario Plus (Германия)		O ₂	0...21%
		CO ₂	0...30%
		CH ₄	0...1(3)%
		H ₂ S	0...0,03%
		CO	0...0,6(10)%
Газоанализатор Testo 330-1 LL (Германия)		O ₂	0...21%
		CO	0...8000 ppm
		Температура	-40...1200°C
Газоанализатор Dräger X-am (Германия)		CH ₄	0...100%
		O ₂	0...25%
		CO	0...0,6(10)%
		H ₂ S	0...100 ppm
		CO ₂ (IR сенсор)	0...50%
Дифманометр Testo 512/2 с трубками Пито		Давление	0...2 кПа
		Скорость (расчетная)	5...55 м/с
			Измерение расхода биогаза, теплотехнические испытания котлов



2.3. Особенности состава биогаза

Состав биогаза зависит от следующих факторов:

- состава отходов, который заметно изменяется в разных регионах;
- климатических условий, определяющих температуру и влажность в теле полигона;
- степени герметизации тела полигона, определяющей поступление атмосферного воздуха, содержащего кислород, и условия образования: анаэробное или аэробное.

Чистый биогаз, полученный в анаэробных условиях, содержит 55% метана и 45% углекислого газа [11]. В биогазе на полигонах ТКО также в незначительных количествах содержится ряд токсичных и неприятно пахнущих соединений: диоксид серы SO_2 , сероводород H_2S , окись азота NO_x , фтористый водород HF , аммиак NH_3 , бензол C_6H_6 , трихлорметан $CHCl_3$, четыреххлористый углерод CCl_4 , хлорбензол C_6H_5Cl и другие газы.

Влажность биогаза

В связи с высокой температурой и влажностью в теле полигона выходящий из него биогаз имеет максимальную влажность (относительную влажность 100%) и при охлаждении из него выделяется большое количество конденсата. Зависимость между давлением насыщенного водяного пара p_H и температурой t , °C, может быть выражена уравнением, которое применимо в диапазоне $t = -30...100^\circ C$ (в диапазоне $0...100^\circ C$ коэффициент детерминации $r^2 = 1$; среднее отклонение MAPE = 0,3%):

$$p_H(t) = \exp\left(\frac{6,4 + 0,1013t}{1 + 0,00434t}\right), \text{ Па.}$$

Масса и объем влаги m_t , содержащаяся в биогазе,

$$m_t = \frac{0,806}{\rho_6} \frac{p_H}{p_0 - p_H}, \text{ кг/кг} = 0,806 \frac{p_H}{p_0 - p_H} \text{ кг(л)/м}^3 \text{ биогаза,}$$

где 0,806 и ρ_6 – плотность водяного пара и биогаза при нормальных условиях, кг/м³; p_0 – атмосферное давление, Па.

Таким образом при охлаждении 1 м³ биогаза от температуры t_1 до t_2 выделится влага (конденсат) массой

$$m_k = 0,806 \left(\frac{p_H(t_1)}{p_0 - p_H(t_1)} - \frac{p_H(t_2)}{p_0 - p_H(t_2)} \right), \text{ кг (л).}$$

На рис. 3 приведен объем конденсата, образующегося при охлаждении биогаза. Например, при среднем выходе с 1 Га 300 м³/ч биогаза образуется до 60 л конденсата.

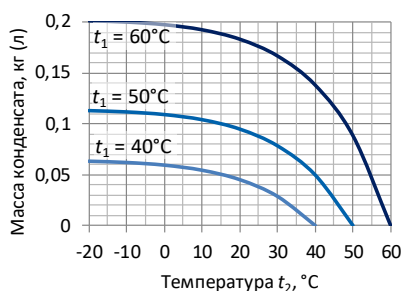


Рис. 3. Выделение конденсата при охлаждении 1 м³ биогаза, насыщенного влагой, от температуры t_1 до t_2

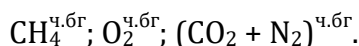
Влияние присосов на состав биогаза

Результаты практических измерений, приведенные в большом количестве источников, а также замеры авторов на ряде полигонов, показывают практическое содержа-



ние метана в биогазе в пределах от 35% до 70%. Низкое содержание метана в биогазе с полигонов ТКО может быть обусловлено как условиями его образование (в этом случае содержание кислорода в биогазе 1 и менее), так и подмешиванием (присосами в системе газосбора или поступление в систему газосбора воздуха через слой отходов) в биогаз воздуха уже после его образования (при этом содержание кислорода в биогазе 5% и выше).

Состав чистого биогаза может быть выражен через объемное содержание основных компонентов (азот и углекислый газ не разделяются в связи с трудностью их инструментального определения и отсутствия их влияния на энергетические свойства биогаза):



При наличии присосов с объемной долей x с учетом незначительной части остальных соединений состав биогаза может быть определен по выражениям (об. %):

$$\text{CH}_4 = (1 - x) \text{CH}_4^{\text{ч.бг}};$$

$$\text{O}_2 = (1 - x) \text{O}_2^{\text{ч.бг}} + 21x;$$

$$\text{CO}_2 + \text{N}_2 = 100 - (\text{CH}_4 + \text{O}_2).$$

На рис. 4 представлено содержание в биогазе метана и кислорода в зависимости от величины присосов.

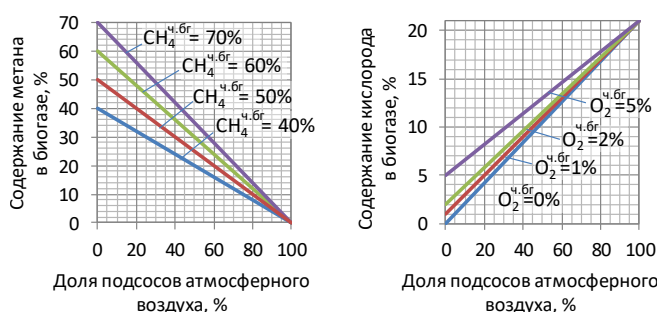


Рис. 4. Состав биогаза при различном количестве присосов

Присосы воздуха, кроме увеличения расхода биогаза в газосборной системе и нагрузки на тягодутьевое оборудование, значительно влияют на сжигание биогаза в котлах и печах, так как наличие в биогазе воздуха требует уменьшения его объема, подаваемого на горение.

Для оценки содержания метана в чистом биогазе, без присосов, его содержание целесообразно пересчитывать на чистый биогаз при условии, что объем кислорода в биогазе выше $\text{O}_2^{\text{ч.бг}}$ поступил с присосами воздуха. Если объемная доля присосов воздуха в биогазе d , то процентное содержание метана и кислорода в разбавленном биогазе:

$$\text{CH}_4 = (1 - d) \text{CH}_4^{\text{ч.бг}}, \quad \text{O}_2 = (1 - d) \text{O}_2^{\text{ч.бг}} + d \cdot 21\%,$$

где $\text{CH}_4^{\text{ч.бг}}$ и $\text{O}_2^{\text{ч.бг}}$ – содержание метана и кислорода в биогазе без присосов; 21% – содержание кислорода в воздухе.

Выражая из уравнений величину d , получаем:

$$1 - \frac{\text{CH}_4}{\text{CH}_4^{\text{ч.бг}}} = \frac{\text{O}_2 - \text{O}_2^{\text{ч.бг}}}{21 - \text{O}_2^{\text{ч.бг}}}, \quad \text{или} \quad \frac{\text{CH}_4}{\text{CH}_4^{\text{ч.бг}}} = \frac{21 - \text{O}_2}{21 - \text{O}_2^{\text{ч.бг}}}$$



Таким образом содержание метана в неразбавленном присосами биогазе определяется по выражению:

$$\begin{aligned} \text{CH}_4^{\text{ч.бг}} &= \text{CH}_4, \text{ если } \text{O}_2 \leq \text{O}_2^{\text{ч.бг}}; \\ \text{CH}_4^{\text{ч.бг}} &= \frac{21 - \text{O}_2^{\text{ч.бг}}}{21 - \text{O}_2} \text{CH}_4, \text{ если } \text{O}_2 > \text{O}_2^{\text{ч.бг}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где CH_4 , O_2 – содержание в биогазе метана и кислорода, определенное по измерениям, об. %; значение $\text{O}_2^{\text{ч.бг}}$ может быть принято согласно [11] равным 1%.

Теплота сгорания биогаза

Так как кроме метана другие горючие компоненты содержатся в биогазе в крайне незначительных количествах, теплота сгорания биогаза определяется по содержанию метана CH_4 , об. %:

$$Q_{\text{пн}} = 35,88 \cdot \text{CH}_4 / 100 = 0,3588 \text{ CH}_4 \approx \text{CH}_4 / 3, \text{ МДж/м}^3,$$

лабораторные методы определения теплоты сгорания необходимости применять нет.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Измерение состава биогаза на северной части полигона ТКО

Северная часть полигона ТКО (см. рис. 5) выведена из эксплуатации и имеет следующие характеристики:

- год начала функционирования 2001;
- год окончания функционирования 2006;
- площадь полигона 1,5 га;
- глубина 25 м;
- средний объём вывозимых отходов 62 500 м³/год.

На первом этапе исследования в июле 2017 г. началось сооружение экспериментальной линии из трех скважин глубиной 12 м, в которые были опущены полиэтиленовые перфорированные трубы диаметром 50 мм, произведенные на ООО «ТК Экотранс» из вторичной гранулы, полученной при сортировке отходов. Замеры состава биогаза производились в устье каждой скважины, при этом на результаты значительное влияние оказывали погодные условия (при усилении ветра выход газа из скважин значительно увеличивался).

В период с 20 июня по 2 июля была выполнена герметизация места расположения скважин путем отсыпки глиной и три скважины были объединены газосборной линией.

Для отбора газа в конце линии в специально оборудованном контейнере был установлен безмасляный пластинчато-роторный вакуумный насос Busch Seco SV 1005 D (расход 4,8 м³/ч; остаточное давление 15 кПа).

Результаты мониторинга состава биогаза представлены на рис. 6.



Рис. 5. Экспериментальная линия из трех скважин



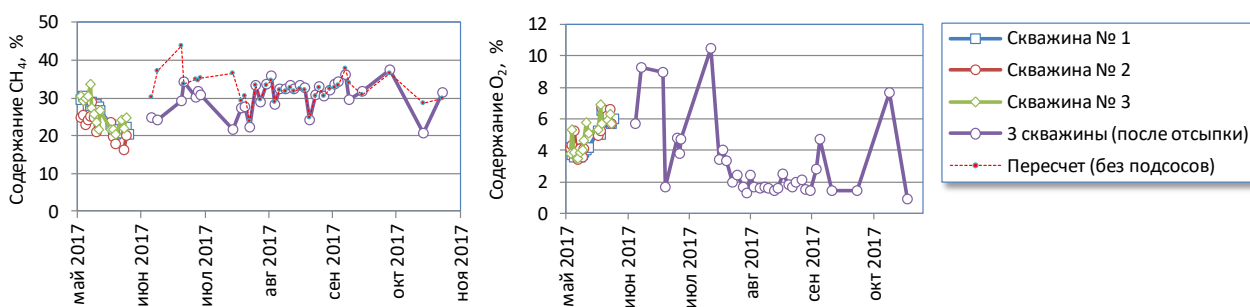


Рис. 6. Результаты замеров содержания метана и кислорода на экспериментальной линии из трех скважин

Между содержанием метана и кислородом имеется обратная линейная зависимость (рис. 7), что показывает наличие в биогазе присосов воздуха. При пересчете на содержание метана без учета присосов по выражению (1) при $O_2^{ч.бг} = 1\%$ (минимальное содержание кислорода в замерах) получается значение $CH_4^{ч.бг} = 32\%$ (коэффициент вариации 11%).



Рис. 7. Зависимость между содержанием метана и кислорода (экспериментальная линия «3 скважины»)

Обобщенные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние результаты замеров

Компонент	Место: Экспериментальная линия «3 скважины» Период 31.05- 17.11.17 Количество: 78			
	Среднее	Доверительный интервал	Пределы изменения	Вариация
CH ₄ , об. %	27,4	±1,1	16,2 – 37,5	17%
O ₂ , об. %	3,9	±0,4	0,9 – 7,7	38%
H ₂ S, мг/м ³	4,7	±1,5	0 – 30	119%
CH ₄ ^{ч.бг} (пересчет на O ₂ ^{ч.бг} = 1%), об. %	22,5	±0,8	22,5 – 39,8	12%

На следующих этапах на Северной части были сооружены газосборные поля «Север-1» (введено в эксплуатацию сентябре 2017 г.) и «Север-2» (введено в эксплуатацию сентябре 2019 г.). Расположение и характеристики полей представлены на рис. 8, результаты замеров состава биогаза – на рис. 9 и в табл. 4.





Рис. 8. Газосборные поля на северной части полигона ТКО

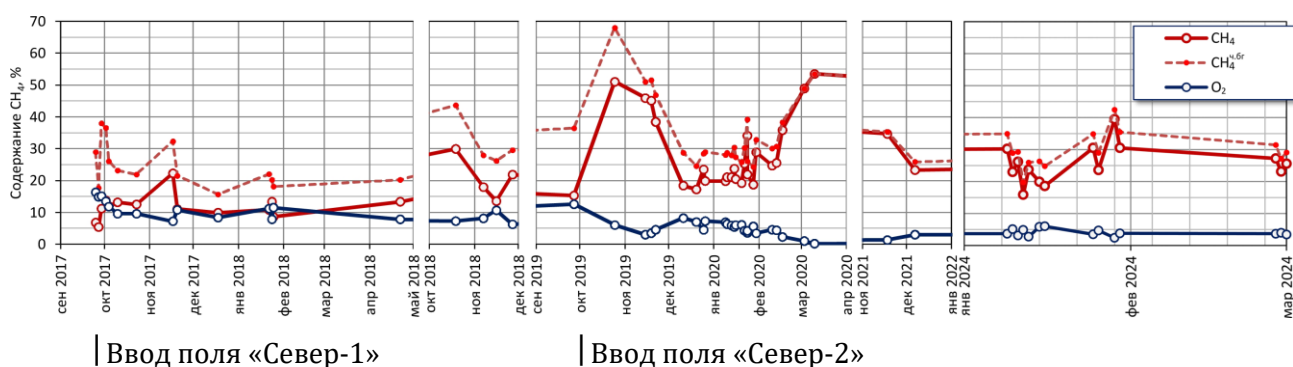


Рис. 9. Результаты замеров содержания метана и кислорода на северной части (газосборные поля «Север-1» и «Север-2»)

Таблица 4

Средние результаты замеров

Компонент	Место: газосборное поле «Север-1»			
	Период 25.09.17 – 27.11.2018 г.			
	Количество: 16			
	Среднее	Доверительный интервал	Пределы изменения	Вариация
CH ₄ , об. %	14,7	±2,7	8,6 – 29,9	28,3%
O ₂ , об. %	9,8	±1,2	6,2 – 15,1	20,5%
H ₂ S, мг/м ³	8,5	±3,7	0 – 30	64,5%
CH ₄ ^{ч.бг} (пересчет на O ₂ ^{ч.бг} = 1%), об. %	26,4	±3,7	15,7 – 43,6	23,3%
Компонент	Место: газосборные поля «Север-1» и «Север-2»			
	Период 27.09.19 – 01.03.2024 г.			
	Количество: 41			
	Среднее	Доверительный интервал	Пределы изменения	Вариация
CH ₄ , об. %	27,6	±3,0	15,3 – 53,5	28,3%
O ₂ , об. %	4,6	±0,6	0,2 – 12,6	33,9%
H ₂ S, мг/м ³	30,9	±6,8	0 – 100	49,8%
CH ₄ ^{ч.бг} (пересчет на O ₂ ^{ч.бг} = 1%), об. %	33,4	±3,0	19,8 – 68,0	21,9%



Полученные значения содержания метана в биогазе оказались меньше теоретических, что может быть вызвано или переходом участка полигона в стадию стабильного метаногенеза, или отличием состава ТКО от принятого.

Зависимость содержания метана от содержания кислорода (рис. 10) аналогична данным, полученным на экспериментальной линии (рис. 7), прогноз содержания метана при значении $O_2 = 0\%$ так же составляет около 40%.

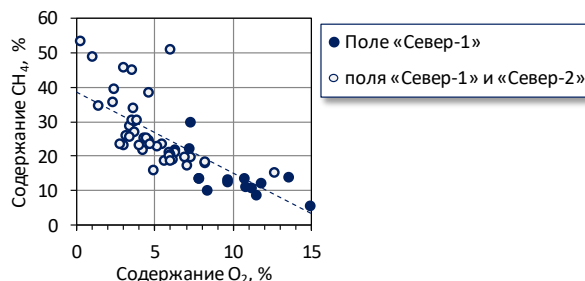


Рис. 10. Зависимость между содержанием метана и кислорода (газосборные поля «Север-1» и «Север-2»)

При сооружении газосборного поля «Север-1» согласно рекомендациям методики [12] (аналогичные рекомендации были включены и в ГОСТ Р 59415-2021 «Система сбора свалочного газа на полигонах твердых коммунальных отходов, состоящая из специальных вертикальных газовых скважин») герметизация полиэтиленовой пленкой производилась только вокруг скважин путем размещения полосы из пленки поверх газосборных линий, и выполнялась общая герметизация поля путем насыпкой слоя глины. Как показал опыт эксплуатации поля «Север-1» такое решение не обеспечивает ликвидацию присосов в биогаз атмосферного воздуха. Содержание кислорода составляло 6,2 – 15,1%, что соответствует 30-70% присосов. При сооружении поля «Север-2» было принято решение о герметизации пленкой всего поля, и количество присосов воздуха после этого значительно сократилось. Эффективность решения в дальнейшем была подтверждена при эксплуатации следующих газосборных полей, в которых присосы атмосферного воздуха практически отсутствуют.

3.2. Исследование естественного выхода биогаза на газосборном поле «Север-2»

В процессе сооружения газосборного поля «Север-2» на этапе, когда в теле полигона были выполнены 572 скважины глубиной 10...12 м со средним расстоянием между ними 4 м, в которые были опущены перфорированные пластиковые трубы диаметром 50 мм, но еще не произведено их соединение горизонтальными газосборными линиями, было произведено измерение естественного выхода биогаза в 471 скважине (часть рядов скважины внутри поля была в обследовании не включена). Полностью полученные результаты приведены в работе [13].

Результаты показывают неравномерный характер газообразования (рис. 11). Содержание метана в двух соседних скважинах может изменяться от полного отсутствия до 50...60 об. %.

Содержание метана в биогазе было пересчитано на условия отсутствия присосов (рис. 12). В отличие от данных рис. 9, 10, при свободном выходе биогаза содержание метана в нем в 11% скважин составляет больше 50%, а в 3% – выше 60%.

Для определения, влияют ли на показания погодные условия, в течение замеров, которые длились 8 дней, в пяти скважинах с высоким выходом метана производился ежедневный мониторинг (рис. 13), который показал, что состав биогаза в период замеров был стабилен.



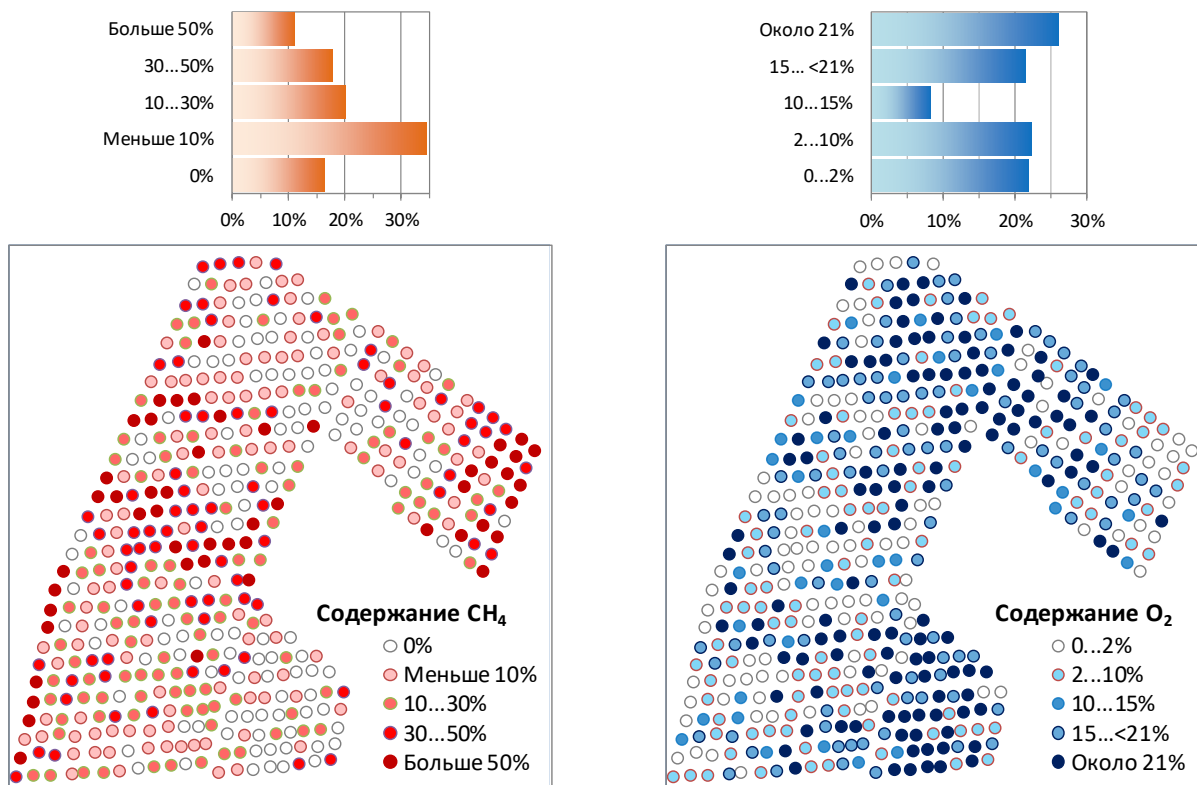


Рис. 11. Результаты мониторинга содержания биогаза в скважинах

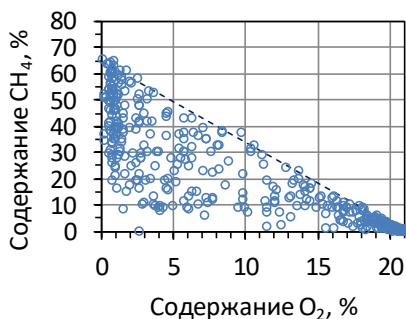


Рис. 12. Зависимость между содержанием кислорода и метана

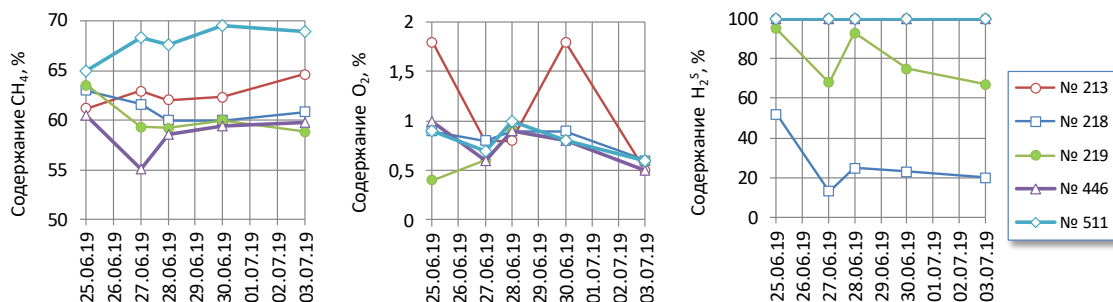


Рис. 13. Ежедневный мониторинг состава биогаза



Средний состав биогаза по измерениям приведен в табл. 5.

Таблица 5

Средние результаты замеров

Компонент	Место: газосборное поле «Север-2», свободный выход биогаза			
	Период 25.06 – 03.07.2019 г.			
	Количество: 471			
	Среднее	Доверительный интервал	Пределы изменения	Вариация
CH ₄ , об. %	18,2	±1,8	0,0 – 65,5	94,5
O ₂ , об. %	11,8	±0,8	0,1 – 21,0	66,3
H ₂ S, мг/м ³	25,4	±3,3	0 – 100	117,7
CH ₄ ^{ч.бг} (пересчет на O ₂ ^{ч.бг} = 1%), об. %	30,6	±1,8	0,0 – 65,8	58,2

Сравнивая полученные данные со средним составом биогаза, полученным после запуска в эксплуатацию поля «Север-2» (табл. 6) можно заключить, что состав биогаза при его свободном выходе близок к составу, который откачивался после ввода поля в эксплуатацию (после исключения точек, в котором биогаз отсутствует, то есть где O₂ >20%).

Таблица 6

Сравнение состава биогаза при свободном выходе и в системах газосбора (об. %)

Компонент	Поле «Север-1» до объединения с полем «Север-2»	Поля «Север-1» и «Север-2»	Свободный выход	
			Все замеры (471)	Замеры при O ₂ ≤ 20% (328)
CH ₄	14,7	27,6	18,2	26,0
O ₂	9,8	4,6	11,8	7,8
CH ₄ ^{ч.бг} (пересчет на O ₂ ^{ч.бг} = 1%)	26,4	33,4	30,6	33,7

Таким образом, измерение состава биогаза при его свободном выходе может применяться при обследовании полигонов ТКО для определения их биогазовых потенциалов. Отбор проб при этом необходимо производить с глубины более 2 м, так как в верхней части тела полигона (на глубине до 2 м) имеется большое количество кислорода, которое создает поверхностный биофильтр, где происходит частичное окисление метана до диоксида углерода [14].

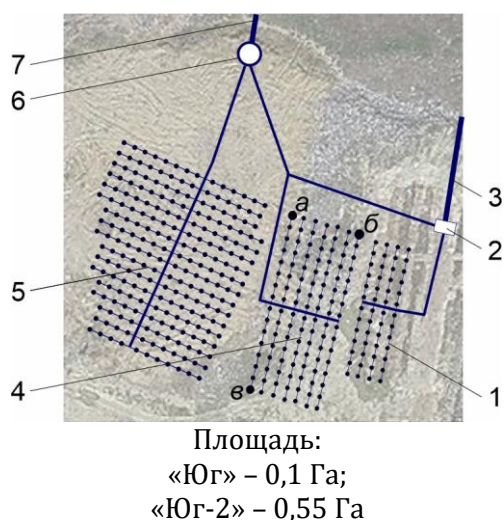
Так же по наличию значительного количества скважин с выходом биогаза с содержанием метана более 50% можно заключить, что низкое содержание биогаза при эксплуатации система газосбора показывает неравномерность образования биогаза в различных частях полигона, что объясняется неравномерность свойств захороненных отходов.

3.3. Измерение состава биогаза на южной части полигона ТКО

Южная часть полигона ТКО является эксплуатируемой, ее закрытие запланировано на 2024 г. В этой части полигона сооружены два газосборных поля (рис. 14).

В июле 2017 г. на южной части полигона ТКО была выполнена экспериментальная скважина глубиной 12 м и в течение 4,5 месяцев производился мониторинг выхода биогаза из скважины. Результаты 35 замеров показали стабильный выход биогаза со средним составом CH₄ = 30,5% (CH₄^{ч.бг} = 34,5%), O₂ = 3,2%.





- 1 – Газосборное поле «Юг»: 52 скважины, 4 газосборные линии
- 2 – Коллектор и конденсатосборник
- 3, 7 – Линии транспортировки собранного биогаза
- 4 – Газосборное поле «Юг-2», участок 1: 112 скважин, 7 газосборных линий
- 5 – Газосборное поле «Юг-2», участок 2: 225 скважин, 17 газосборных линий
- 6 – Коллектор
- а, б, в – скважины, в которых производились замеры температуры тела полигона

Рис. 14. Газосборные поля на южной части полигона ТКО

Исходя из успешного опыта использования биогаза такого состава с северной части полигона в отопительных котлах было принято решение о начале строительства газосборного поля «Юг» из 52 скважин. В процессе сооружения поля измерение состава биогаза на сооружаемых скважинах и линиях продолжалось.

9 августа 2018 г. закончилось сооружение всех скважин и их объединение газосборными линиями, и поле было запущено в эксплуатацию. Первоначально для откачки газа использовалась вихревая газодувка GreenTech 2RB 510-016, установленная в контейнере около поля (поз. 2 рис. 14). 13 августа 2019 г. была введена в эксплуатацию газоперекачивающая станция в конце линии транспортировки (на территории мусоросортировочного комплекса и производственного участка по переработке вторичного сырья), где была установлена более мощная газодувка GreenTech 2RB 710-040 с частотным преобразователем.

Результаты измерения состава биогаза (рис. 15, табл. 7) показали, что содержание метана (53,5%) значительно превышает показания, полученные с использованием экспериментальной скважины ($CH_4^{ч.бр} = 34,5\%$). Это объясняется неравномерностью состава отходов и еще раз подтверждает большую погрешность определения состава биогаза полигона ТКО по результатам его измерения в отдельных скважинах.

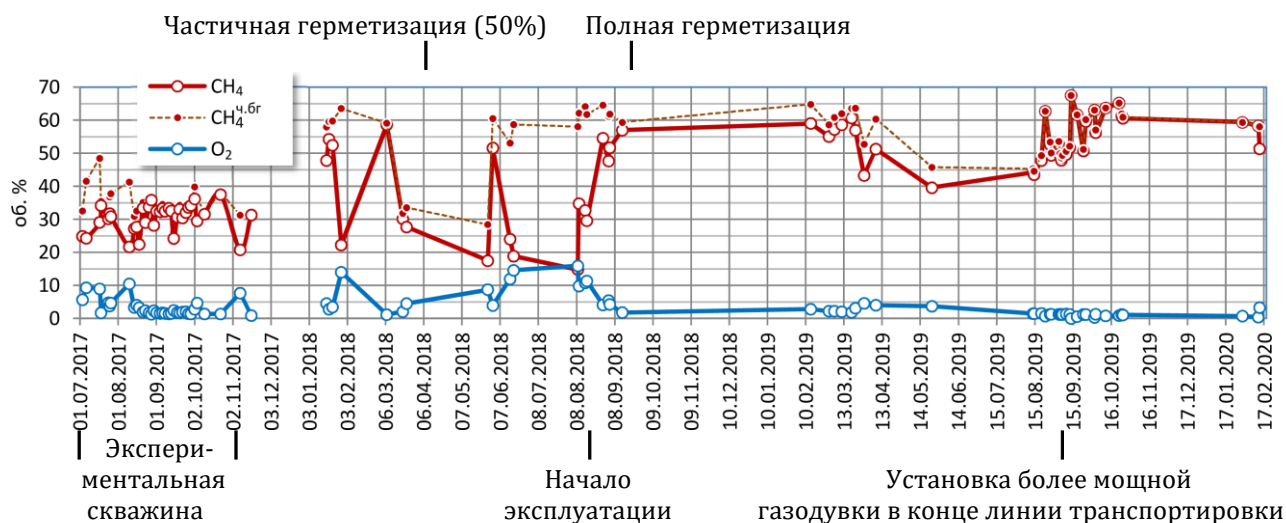


Рис. 15. Измерение выхода биогаза с газосборного поля «Юг» в процессе сооружения и эксплуатации



Таблица 7

Средние результаты замеров

Компонент	Место: газосборное поле «Юг» (период сооружения)			
	Период 17.01.18 – 29.08.2018 г.			
	Количество: 104			
	Среднее	Доверительный интервал	Пределы изменения	Вариация
CH ₄ , об. %	36,4	±6,9	14,8 – 58,6	36,1%
O ₂ , об. %	7,6	±2,2	1,2 – 15,9	56,4%
H ₂ S, мг/м ³	60,1	±15,6	1 – 100	46,0%
CH ₄ ^{н.бг} (пересчет на O ₂ ^{н.бг} = 1%), об. %	55,2	±5,4	28,5 – 64,6	15,7%
Компонент	Место: газосборное поле «Юг» (эксплуатация)			
	Период 03.09.18 – 13.02.2020 г.			
	Количество: 40			
	Среднее	Доверительный интервал	Пределы изменения	Вариация
CH ₄ , об. %	54,7	±2,2	39,6 – 67,5	10,6%
O ₂ , об. %	1,7	±0,4	0,0 – 4,6	51,0%
H ₂ S, мг/м ³	60,1	±15,6	1 – 100	20,0%
CH ₄ ^{н.бг} (пересчет на O ₂ ^{н.бг} = 1%), об. %	57,0	±2,1	44,6 – 67,5	9,8%

Между содержанием в биогазе кислорода и метана, как и в предыдущих случаях, наблюдается линейная зависимость (рис. 16). При этом ряд точек лежат ниже ее. Измерения для этих точек были в процессе сооружения системы газосбора и их наличие можно объяснить замерами на участках с низким выходом биогаза или подключением таких участков к системе.

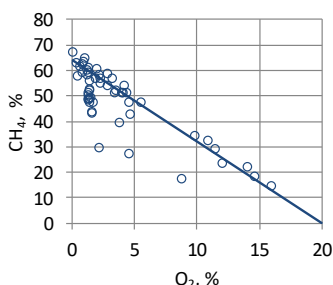


Рис. 16. Зависимость между содержанием метана и кислорода

В дальнейшем на южной части полигона было сооружено и введено в эксплуатацию еще два газосборных участка, объединенных в поле «Юг-2». Результаты мониторинга состава биогаза (рис. 17, табл. 8) показали его высокую стабильность и отсутствие присосов атмосферного воздуха.

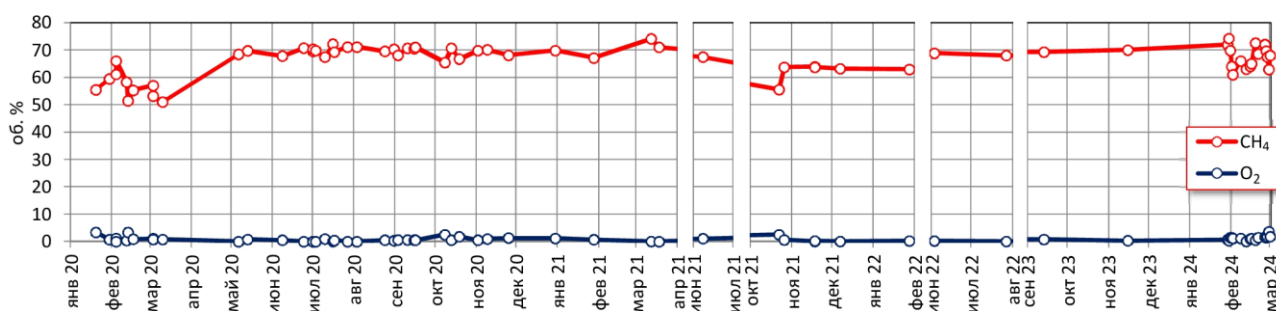


Рис. 17. Измерение выхода биогаза с газосборного поля «Юг-2» в процессе эксплуатации



Таблица 8

Средние результаты замеров

Компонент	Место: газосборные поля «Юг» + «Юг-2»			
	Период 20.01.20 – 01.03.2024 г.			
	Количество: 65			
	Среднее	Доверительный интервал	Пределы изменения	Вариация
CH ₄ , об. %	66,4	±1,3	51,0 – 74,2	6,5%
O ₂ , об. %	0,8	±0,2	0,0 – 3,6	73,4%
H ₂ S, мг/м ³	66,3	±7,8	0 – 100	42,8%
CH ₄ ^{н.бг} (пересчет на O ₂ ^{н.бг} = 1%), об. %	67,2	±1,2	51,0 – 74,2	6,0%

В процессе сооружения поля 20.12.2019 г. на поле «Юг-2» произведены замеры температуры по глубине трех скважин (рис. 14). Погодные условия при замерах: температура воздуха –1°С, легкий ветер 2 м/с. В скважины опускалась термопара типа «ХК», подсоединенная к мультиметру. Результаты замеров показаны на рис. 18. Максимальная температура газа зафиксирована на глубине не более 2 метров, что свидетельствует о том, что процесс разложения происходит только в верхних слоях засыпки.

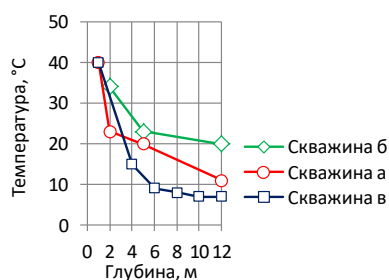


Рис. 18. Температура газа по глубине скважин

В результате измерений можно заключить, что нестабильность содержания метана в биогазе вызывается в основном наличием присосов атмосферного воздуха, ликвидация которых обеспечивается полной герметизацией поверхности полигона. Результаты измерений состав биогаза в отдельных скважинах могут не соответствовать среднему составу биогаза в теле полигона ТКО.

3.5. Средний объем биогаза, откачиваемый с полигонов ТКО

В работе [5] был оценен удельный выход биогаза по различным моделям и методикам. Результаты значительно различались. Средний общий выход биогаза составил 195 м³/т отходов при коэффициенте вариации 38%, средний выход метана – 95 м³/т отходов при коэффициенте вариации 46%. При средней плотности уплотненных отходов 800 кг/м³, высоты слоя отходов 30 м и периода выделения 17 лет, средний выход биогаза составит 315 м³/Га (или 170 м³ метана с 1 Га).

В ходе испытаний газосборных систем и был определен выход биогаза с различных полей. Расход газа определялся при рабочих режимах газодувок, которые обеспечивали потребителей нужным объемом биогаза (табл. 9).

Средний объем откачиваемого биогаза по данным фактических замеров составляет около 1 500 м³/Га или 2,5 м³/час с одной скважины, что в несколько раз выше теоретических значений.



Таблица 9

Средний выход биогаза по результатам измерений

Наименование	Дата	Расход биогаза, м ³ /ч	Состав биогаза, %			Удельный выход, м ³ /Га	
			СН ₄ (измерения)	О ₂	СН ₄ ^{ч.бр} (пересчет на биогаз без присосов)	биогаза	метана
Поле «Юг»	16.08.2018 г.	239,48	28,67	11,77	65,20	2 395	687
	06.05.2019 г.	62,00	39,60	3,70	48,07	620	246
	20.12.2019 г.	110,84	33,40	1,10	35,25	1 108	370
Поле «Север-1»	18.12.2018 г.	167,30	5,00	15,20	18,10	2 390	120
	22.04.2018 г.	180,86	10,20	10,60	20,60	2 584	264
	19.10.2018 г.	61,10	28,70	7,70	45,32	873	251
	07.11.2018 г.	77,75	17,95	8,15	29,33	1 111	199
16.11.2018 г.	100,69	13,52	10,68	27,51	1 438	194	
Поле «Север-2»	20.12.2019 г.	322,74	17,25	7,05	25,97	313	54
Среднее	–	–	21,59	8,44	35,04	1 426	308

Так как значительное количество биогаза в теле полигона накоплено быть не может (при высоте слоя 30 м объем 1 Га полигона составляет 300 тыс. м³, то есть при выходе 315 м³/ч и пористости слоя отходов 50% весь накопленный объем выйдет за 20 дней), следовательно, образование биогаза происходит более интенсивно, чем по данным теоретических моделей.

С учетом содержания кислорода 8,44% при пересчете на чистый биогаз выход составит 1,5 м³/ч. Данную величину можно принять для проектирования объема откачиваемого биогаза с одной скважины, что при расстоянии между скважинами 5 м и запасе на размещение сборных линий 20% составит около 500 м³/ч с 1 Га.

3.6. Оценка стабильности выхода биогаза

Анализируя состав биогаза, приведенный в разделах 3.1 и 3.3, можно заключить, что сезонность на выход метана влияет мало. На рис. 15 содержание метана в биогазе летом 2019 г. даже ниже, чем следующей зимой. На рис. 19 приведен средний состав биогаза по сезонам. Содержание метана, пересчитанное на чистый биогаз СН₄^{ч.бр}, для южной части полигона минимально весной и максимально летом, разница между зимними и летними показателями составляет не более 4%. Можно заключить, что в условиях климата Белгородской области сезонность на состав биогаза влияет слабо, что связано с постоянной высокой температуре в теле полигона.

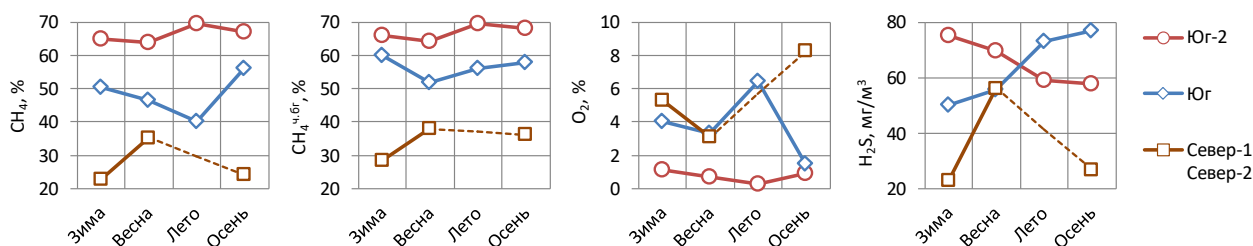


Рис. 19. Анализ сезонного состава биогаза



Для оценки влияния объема откачиваемого биогаза на содержание в нем метана был произведен ряд замеров при изменении частоты работы газодувки, что ведет к изменению создаваемого ей давления, и, вследствие этого, расхода перекачиваемого газа. Расход биогаза рассчитывался по его скорости в газопроводе, которая определялась с использованием трубки Пито и дифференциального манометра. Измерения показали линейную зависимость подачи от частоты вращения (рис. 20), при этом содержание кислорода (то есть объем присосов) изменялся незначительно, на 1,5%, что соответствует изменению величины присосов на 7%.

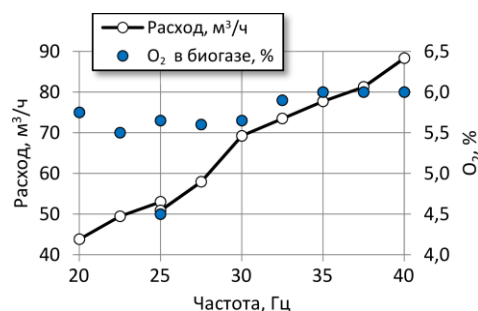


Рис. 20. Зависимость расхода и содержания кислорода в биогазе при разной частоте вращения газодувки (поле «Север-1, замеры у цеха, 12.09.2018 г., газоанализатор CH₄ в это время находился на поверке)

На рис. 21 приведены результаты мониторинга состава биогаза при изменении откачиваемого объема, задаваемого изменение частоты вращения газодувки. При увеличении объема откачиваемого газа выход метана не меняется.

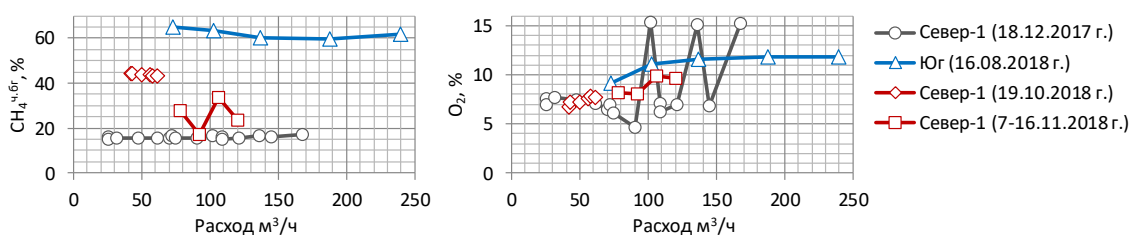


Рис. 21. Изменение содержания метана при изменении расхода биогаза (при разной частоте вращения газодувки)

На рис. 22 приведены результаты мониторинга содержания метана при постоянном наблюдении в течение от одного часа до 6 часов после начала (запуска) откачки биогаза. Снижение объема выделения метана с течением времени так же не наблюдается.

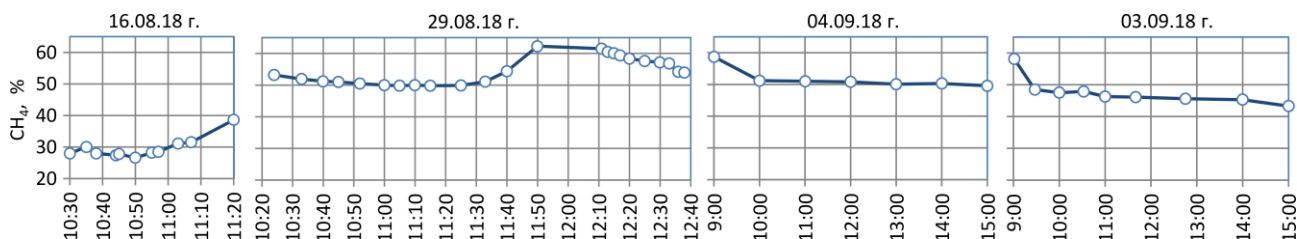


Рис. 22. Мониторинг выхода биогаза (поле «Юг», интервал измерений – 10 мин и 1 час)

Можно заключить, что состав биогаза является стабильным и обследование для определения его среднего состава в климатических условиях, подобных Белгородской области (мягкая зима и продолжительное лето), возможно проводить в любое время года.



3.7. Оценка содержания CO₂ в биогазе

В газоанализаторе ФП-34, используемом для мониторинга состава биогаза, датчик CO₂ имел диапазон измерений 0...2,5% и во время измерений постоянно показывал выход измеряемой величины за пределы диапазона. Для анализа содержания в биогазе CO₂ были произведены разовые замеры на южном и северном участках с использованием газоанализаторов MRU Vario Plus и Dräger X-am 7000, оборудованных датчиками для определения содержания O₂, CO₂, CH₄ (табл. 10).

Таблица 10

Содержание компонентов в биогазе, объёмные, %

Место отбора проб	Результаты измерений			Предположительное значение N ₂ = = (100 - CH ₄ -CO ₂ -O ₂)		Пересчет на отсутствие присосов			
	CH ₄	O ₂	CO ₂	N ₂	$\frac{N_2}{O_2}$	CH ₄ ^{ч.бг}	CO ₂ ^{ч.бг}	N ₂ ^{ч.бг}	$\frac{N_2^{ч.бг}}{CH_4^{ч.бг}}$
<i>MRU Vario Plus, северная часть полигона, 17.11.2017 г.</i>									
Газосборное поле «Север-1»	26,4	5,25	23,8	44,22	8,5	35,2	31,7	33,1	0,94
	32,8	0,99	38,3	27,91	28,2	34,4	40,2	25,4	0,74
	32,8	1,42	38,3	27,48	19,3	35,2	41,1	23,7	0,67
Среднее	30,8	2,4	35,0	31,8	13,0	34,8	39,6	25,5	0,73
<i>Dräger X-am 7000, южная часть полигона, 14.09.2018 г.</i>									
Газосборное поле «Юг» (средние значения)	57	1,8	38	3,2	1,8	-	-	-	-

По результатам измерения при низком содержании метана (северный участок полигона) сумма среднего содержания трех газов CH₄ + O₂ + CO₂ = 68,2%. Предположительно, остальной объем 31,8% в биогазе занимает азот N₂. Соотношение содержания азота и кислорода в биогазе значительно выше, чем в атмосферном воздухе (где оно составляет 79/21 = 3,76), поэтому он содержится в биогазе как один из его компонентов (остался после окисления кислорода, поступившего в слой с атмосферным воздухом). Если считать, что кислород, находящийся в биогазе поступил с атмосферным воздухом при откачке газа, после исключения из состава азота, содержащегося в этом воздухе, может быть получен приведенный к 100% состав биогаза без присосов (для условий O₂ = 0). Азот в составе имеет объемную долю в среднем 0,73 от объемной доли метана.

Для биогаза с высоким содержанием метана сумма трех измеренных компонентов равна 96,8%, что показывает отсутствие азота в биогазе.

3.8. Оценка среднего состава биогаза полигонов ТКЮ

В табл. 11 приведен состав биогаза в соответствии с нормативными источниками и полученный в результате фактических замеров.

Отдельно остановимся на необходимости очистки биогаза от сероводорода. Согласно табл. 11 среднее содержание H₂S в биогазе не превышает 100 мг/кг. В дизельных топливах согласно ГОСТ 32511-2013 допускается содержание серы, не более: экологический класс К3 – 500 мг/кг; К4 – 50 мг/кг; К5/Евро5 – 10 мг/кг. Содержание сероводорода в свалочном газе незначительно и сопоставимо с его содержанием в дизельных топливах экологического класса К4, поэтому специальной очистки биогаза для предотвращения коррозии оборудования при образовании серной кислоты не требуется.



Таблица 11

Состав свалочного газа

№	Тип биогаза	Состав биогаза, об. %					H ₂ S, мг/м ³ (мг/кг)	СН ₄ ^{н.бг.} , % (пересчет на биогаз без присосов воздуха)
		СН ₄	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S		
1.	Теоретический состав [11]							
1.1.	Чистый биогаз, полученный в анаэробных условиях	55	-	45	-	-	-	55
1.2.	В биогазе присутствуют присосы воздуха, кислород и азот в соотношении, свойственном атмосферному воздуху	40	6	30	24	-	-	56
1.3.	Воздух поступает в слой отходов, кислород воздуха участвует в микробиологическом процессе	45	1	35	18	-	-	45
1.4.	Комбинации типов п. 1.2 и 1.3	35	5	30	30	-	-	46
2.	Средний статистический состав, рекомендуемый при проектировании [15]	52,915	н/д	н/д	н/д	0,026	46...108 (35...84)	-
3.	Выход биогаза по стехиометрическому уравнению, рассчитанный по средним составам ТКО [5]	53...56	-	41...44	-	0,26...0,37 (так же 1,8-2,6% NH ₃)	40005700 (31004400)	-
4.	Система сбора биогаза на полигон ТБО «Преображенка», г. Самара (стационарные газоанализаторы, 01.03.2017 г.)	60,6	0,2	н/д	н/д	0,0062	95 (74)	61,2
5.	Средние значения по результатам замеров на полигоне «Стрелецкое» (г. Белгород)							
5.1.	«Север-1» и «Север-2», 41 замер, 27.09.19 – 01.03.24 г.	27,6	4,6	н/д	н/д	0,002	30,9 (24)	33,4
5.2.	«Юг», 40 замеров, 03.09.18 – 13.02.20 г.	54,7	1,7	н/д	н/д	0,004	60,2 (47)	57,0
5.3.	«Юг-2», 65 замеров, 20.01.20 – 01.03.24 г.	66,4	0,8	н/д	н/д	0,004	66,3 (51)	67,2
6.	Определение содержания CO₂							
6.1.	«Север-1», 17.11.2017 г.	30,8	2,4	35	н/д	н/д	н/д	-
6.2.	«Юг», 14.09.2018 г.	57,0	1,8	38,0	н/д	0,007	100 (78)	58,0

Примечание: «н/д» – компонент имеется, но измерения не производились или данные не приведены



4. Выводы

1. Основным компонентом, определяющим свойства биогаза, является содержание метана (CH_4), которое может изменяться от 30 до 70% и зависит, в том числе, и от присосов в биогаз атмосферного воздуха. Содержание метана без учета присосов составляет от 35 до 70% и постоянно для каждого газосборного поля. Содержание сероводорода в свалочном газе незначительно и сопоставимо с его содержанием в дизельных топливах экологического класса К4.

2. Состав биогаза с низким содержанием метана включает основные компоненты (без учета присосов воздуха): CH_4 , CO_2 , N_2 , содержание углекислого газа может быть принято в размере 0,73 от содержания метана. В биогазе с высоким содержанием метана азот в составе отсутствует.

3. В результате мониторинга естественного выхода свалочного газа с тела полигона ТКО в 471 скважине с расстоянием между точками отбора 4 метра подтвержден неравномерный характер газообразования. Содержание метана в двух соседних скважинах может изменяться от полного отсутствия до 50...60 об. %. По наличию значительного количества скважин с выходом биогаза с содержанием метана более 50% можно заключить, что низкое содержание биогаза при эксплуатации система газосбора объясняется неравномерность свойств захороненных отходов. Состав биогаза при его свободном выходе близок к составу, который откачивался после ввода поля в эксплуатацию (после исключения точек с содержанием O_2 более 0%, в котором биогаз отсутствует). Результаты измерений состава биогаза в отдельных скважинах могут не соответствовать среднему составу биогаза в теле полигона ТКО.

4. Для определения содержания биогаза на конкретном полигоне ТКО необходима его оценка с сооружением экспериментальных скважин и проведением замеров.

Проведенные исследования показали, что ГОСТ 59417-2021 «Определение биогазового потенциала полигонов твердых коммунальных отходов с откачкой биогаза из вертикальных скважин и утилизацией на факельной установке. Общие технические условия» не позволяет проводить эффективное определение потенциала, так как:

а) исследования состава и выхода биогаза в течение длительного времени показали стабильность показателей и их зависимость только от технических характеристик участка полигона (состав отходов, период накопления), поэтому установленный в документе период мониторинга от 3 до 12 мес. являются избыточным;

б) мониторинг естественного выхода свалочного газа с тела полигона ТКО с расстоянием между точками отбора 4 метра показал неравномерный характер газообразования в различных точках, поэтому обустройство отдельных наблюдательных и рабочих газовых скважин может не позволить определить средние показатели по полигону, кроме того отсутствие герметизации поверхности полигона приведен к большому количеству присосов.

Так же из-за больших финансовых затрат (сооружение скважин, системы газосбора) метод не позволяет проводить оперативные обследования полигонов. Для решения этой задачи предлагается экспресс-метод обследования с обустройством временных скважин и определением параметров биогаза с использованием переносного оборудования (газонализатор, газодувка, зонд), при этом при разных режимах откачки биогаза определяется количество присосов и прогнозируется состав биогаза без присосов.

5. Практика эксплуатации систем газосбора показывает большую важность герметизации тела полигонов для предотвращения присосов атмосферного воздуха, которые могут снижать содержание метана ниже пределов, допустимых для работы газопоршневых установок. Частичная герметизация поверхности только вокруг скважин не обеспечивает ликвидацию присосов атмосферного воздуха в биогаз. Поэтому необ-



ходима герметизация пленкой всего газосборного поля и, при наличии, откосов по краям полигона. Эффективность этого решения была подтверждена в ходе эксплуатации газосборных полей.

Информация о финансировании

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Библиографический список

1. Оценка качества техногенно-нарушенных земель территории полигона ТБО г. Белгорода / Е.А. Пендюрин, Л.М. Смоленская, И.В. Старостина, С.Ю. Рыбина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С. 173-176. EDN: [PKRWOL](#)
2. Корнилова Н.В. Анализ опыта и перспектив энергетической утилизации твердых коммунальных отходов // Научные технологии и инновации (XXV Научные чтения). – Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – С. 894-898. EDN: [SXZSRW](#)
3. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году [Электронный ресурс]. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. – 684 с. URL: <https://2021.ecology-gosdoklad.ru/>
4. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году [Электронный ресурс]. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023. – 687 с. URL: <https://2022.ecology-gosdoklad.ru/>
5. Трубаев П.А. Оценка энергетического потенциала свалочного газа // Энергетические системы. – 2021. – № 1. – С. 91-105. EDN: [HCTPTI](#). DOI: [10.3403/es.2021.1.009](https://doi.org/10.3403/es.2021.1.009).
6. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2020 гг. / А.А. Романовская, А.И. Нахутин, В.А. Гинзбург и др. – М.: Росгидромет; ФГБУ «ИГКЭ», 2022. – 468 с. URL: http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022.zip.
7. Бажин Н.М. Метан в окружающей среде. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2010. – 56 с. (Сер. Экология. Вып. 93).
8. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing / P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen et al. // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. s. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. – Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007. – P. 129-234. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
9. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing / G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon et al // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. – New York: Cambridge University Press, 2013. – P. 659-740. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
10. Вострецов С.П. Оптимизация использования биогаза полигонов ТКО // Твердые бытовые отходы. – 2017. – № 9. – С. 46-49. EDN: [ZPFEOJ](#)
11. Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации полигонов захоронения твердых бытовых отходов разработаны в соответствии с нормативными материалами по охране окружающей среды / Н.Ф. Абрамов, Я.И. Вайсман, С.В. Максимова и др. – М.: АКХ им. К.Д. Памфилова; Пермский технический университет, 2003. – 27 с.
12. Технологический регламент получения биогаза с полигонов твердых бытовых отходов. – М.: АКХ им. К.Д. Памфилова, 1990. – 12 с.
13. Мониторинг выхода биогаза с тела полигона ТКО / П.А. Трубаев, А.С. Клепиков, О.В. Веревкин О.В. и др. // Энергетические системы. – 2019. – № 1. – С. 252-259. EDN: [KERBAQ](#).



14. Аудит для «углеродных» инвестиций в энергетическое использование полигонов твердых бытовых отходов / М.П. Федоров, В.В. Кораблев, В.И. Масликов, Е.О. Иокша. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 44 с.
15. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов; издание дополненное и переработанное. Разр. НПП «Экопром», АКХ им. К.Д. Памфилова, НИИ ЭЧ и ГОС им А.Н.Сысина, НИИ Атмосфера, ЗАО «НПП «ЛОГУС» / Абрамов Н.Ф., Сонников Э.С., Русаков Н.В. и др. – М., 2004. – 20 с.

References

1. Pendyurin, E. A., Smolenskaya L. M., Starostina I. V., & Rybina S. Yu. (2012). Ocenka kachestva tehnogenno-narushenny`x zemel` territorii poligona TBO g. Belgoroda [Assessment of the quality of technogenically disturbed lands in the territory of the solid waste landfill in Belgorod]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo texnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhov*, 4, 173-176. [In Russian]
2. Kornilova, N. V. (2023). Analiz opy`ta i perspektiv e`nergeticheskoy utilizacii tverdyy`x kommunal`ny`x otxodov [Analysis of experience and prospects for energy recycling of municipal solid waste]. In *Proc. Naukoemkie texnologii i innovacii (XXV Nauchny`e chteniya)* (pp. 894-898). Izd-vo BGTU. [In Russian]
3. Minprirody of Russia, Lomonosov Moscow State University (2023). *Gosudarstvenny`j doklad o sostoyanii i ob oxrane okruzhayushhej sredy` Rossijskoj Federacii v 2021 godu* [State report on the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021]. Minprirody of Russia. Retrieved April 01, 2024 from <https://2021.ecology-gosdoklad.ru/> [In Russian]
4. Minprirody of Russia, Lomonosov Moscow State University (2024). *Gosudarstvenny`j doklad o sostoyanii i ob oxrane okruzhayushhej sredy` Rossijskoj Federacii v 2022 godu* [State report on the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022]. Minprirody of Russia. Retrieved April 01, 2024 from <https://2022.ecology-gosdoklad.ru/> [In Russian]
5. Trubaev, P. (2021). Evaluation of the energy potential of landfill gas. *Energy Systems*, 1, 91-105. <http://j-es.ru/index.php/journal/article/view/2021-1-009> [In Russian]
6. Romanovskaia, A. A., Nakhutin, A. I., Ginzburg, V. A., Grbar, V. A., Imshennik, E. V., Karaban, R. T., Korotkov, V. N., Vertiankina, V. Iu., Grigurina, T. V., Govor, I. L., Litvinchuk, G. G., Lytov, V. M., Polumieva, P. D., Popov, N. V., Trunov, A. A., & Prokhorova, L. A. (2022). *Nacional`ny`j doklad o kadastre antropogenny`x vy`brosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyy`x gazov ne reguliruemyy`x Monreal`skim protokolom za 1990 – 2020 gg.* [National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990 – 2020]. Rosgidromet, FGBU IGKE. http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022.zip [In Russian]
7. Bazhin, N. M. (2010). *Metan v okruzhayushhej srede* [Methane in the environment]. GPNTB SO RAN. [In Russian]
8. Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz M., & Van Dorland, R. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor, & H.L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 129-234). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
9. Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., & Bex, V. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 659-740). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>



10. Vostreczov, S. P. (2017). Optimizaciya ispol'zovaniya biogaza poligonov TKO [Optimizing the use of biogas from MSW landfills]. *Tverdy'e by'tovy'e otxody*, 9, 46-49. [In Russian]
11. Abramov, N. F., Vaysman, Ya. I., Maksimova, S. V., Glushankova, I. S., Batrakova, G. M., Vaysman, O. Ya., Korotayev, V. N., & Rudakova, L. V. (2003). *Rekomendatsii po raschetu obrazovaniya biogaza i vyboru sistem degazatsii poligonov zakhroneniya tverdykh bytovykh otkhodov razrabotany v sootvetstvii s normativnymi materialami po okhrane okruzhayushchey sredy* [Recommendations for the calculation of biogas generation and the selection of degassing systems for municipal solid waste disposal sites have been developed in accordance with regulatory materials for environmental protection]. AKKh im. K. D. Pamfilova, Permskiy tekhnicheskii universitet. [In Russian]
12. Abramov, N. F., Bukreev, E. M., & Proskuryakov, A. F. (1990). *Texnologicheskij reglament polucheniya biogaza s poligonov tverdy'x by'tovy'x otkhodov* [Technological regulations for the production of biogas from solid waste landfills]. AKKh im. K. D. Pamfilova. [In Russian]
13. Trubaev, P. A., Klepikov, A. S., Verevkin, O. V., Grishko, B. M., Suslov, D. Yu., & Ramazanov, R. S. (2019). Monitoring vy'xoda biogaza s tela poligona TKO [Monitoring the biogas output from the solid waste landfill body]. *Energy Syste.ms*, 1, 252-259. [In Russian]
14. Fedorov, M. P., Korablev, V. V., Maslikov, V. I., & Ioksha, E. O. (2007). *Audit dlya «uglerodny'x» investitsij v e`nergeticheskoe ispol'zovanie poligonov tverdy'x by'tovy'x otkhodov* [Audit for "carbon" investments in the energy use of municipal solid waste landfills]. Izd-vo Politexn. un-ta. [In Russian]
15. Abramov, N. F., Sannikov, E. S., Rusakov, I. V., Milyaev, M. B., Xalevin, R. G., Lifanov, A. V., Burenin, N. S., & Turbin, A. S. (2004). *Metodika rascheta kolichestvenny'x xarakteristik vy'brosov zagryaznyayushhix veshhestv v atmo-sferu ot poligonov tverdy'x by'tovy'x i promy'shlenny'x otkhodov* [Methodology for calculating the quantitative characteristics of pollutant emissions into the atmosphere from solid domestic and industrial waste landfills]. NPP «E`koprom», AKX im. K.D. Pamfilova, NII E`Ch i GOS im A.N.Sy`sina, NII Atmosfera, ZAO «NPP «LOGUS». [In Russian]

Сведения об авторах

Трубаев Павел Алексеевич, д-р техн. наук, профессор кафедры Энергетики теплотехнологии БГТУ им. В.Г. Шухова. SPIN-код: [5743-7260](https://orcid.org/5743-7260). E-mail: trubaev@gmail.com.

Веревкин Олег Викторович, начальник отдела внедрения систем энергосбережения и газификации ООО «ТК «Экотранс», г. Белгород, e-mail: energy_olver@mail.ru.

Authors about

Pavel Trubaev, Dr. of Tech. Sciences, Professor of Department of Energy Engineering of Heat Technologie, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. ORCID: [0000-0003-1710-1599](https://orcid.org/0000-0003-1710-1599). E-mail: trubaev@gmail.com.

Oleg Verevkin, Head of the Department for Implementation of Energy Saving and Gasification Systems, Transport Company Ecotrans LLC, Belgorod, e-mail: energy_olver@mail.ru

