

Совершенствование систем дегазации свалок на основе цифрового моделирования рельефа

К.О. Шлыков, Д.В. Зайцев

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург*

Аннотация: В статье представлена методика расчета систем пассивной дегазации для рекультивации несанкционированных свалок твердых коммунальных отходов с применением BIM-технологий. Методика учитывает неоднородность рельефа свалочных тел и позволяет оптимизировать процесс проектирования. Проведено сравнение эффективности предложенного подхода с традиционными методами, показавшее экономическую выгоду в 21% и повышение эффективности отвода биогаза на 14,27%. Результаты исследования могут быть использованы для разработки проектов рекультивации свалок с учетом современных технологий и экологических требований.

Ключевые слова: рекультивация, свалочный газ, пассивная дегазация, BIM-технологии, твердые коммунальные отходы, методика расчета, экология, биогаз, несанкционированные свалки, оптимизация.

Введение

По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, ежегодно представляемым в Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации», в 2021 году на территориях Российской Федерации было образовано 48362,87 тыс. т. ТКО, что на 0,2% ниже уровня 2020 г. Захоронение на объектах размещения отходов является преимущественным способом обращения. 92% от общей массы твердых коммунальных отходов было захоронено, против 8% для обезвреживания и утилизации.

Внедрение ГИС-систем управления ТКО позволяет оптимизировать логистику вывоза отходов и повысить эффективность мониторинга свалочных тел, что особенно актуально для проектирования систем дегазации [1].

Концепция "*landfill mining*" (рекультивация свалок с извлечением полезных компонентов) может быть экономически эффективным решением [2]. Но успех таких проектов напрямую зависит от точности оценки морфологического состава отходов и газового потенциала.

Таким образом, в ближайшей перспективе, вопрос строительства, эксплуатации, рекультивации объектов захоронения отходов, остается актуальным.

Как показано в исследовании по Ростовской области [3], 90-95% ТКО направляется на захоронение, что приводит к необходимости разработки адаптивных систем дегазации для разнородных свалочных тел.

Одним из ключевых факторов, напрямую влияющих на безопасность эксплуатации и окружающей среды, является образование биогаза (свалочного газа) в результате жизнедеятельности метаногенных бактерий [4].

На этапе рекультивации применяются активные или пассивные системы дегазации (Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации на полигонах захоронения твердых бытовых отходов).

Для рекультивации несанкционированных объектов захоронения отходов, как правило, используются пассивные системы дегазации.

Для обоснования расчета параметров систем дегазации, а также для оценки эффективности систем дегазации используются ряд методик, которые были рассмотрены в статье [5]. Исходя из проведенной работы, был сделан вывод, что на данный момент не существуют методики расчета систем пассивной дегазации, учитывающей, в частности, неоднородность рельефа объектов захоронения отходов, выполненных с отклонением от действующих норм.

Исходя из потребности в рекультивации таких объектов размещения отходов, создана методика расчета систем пассивной дегазации с применением BIM-технологий, учитывающая возможность учета неоднородности рельефа, и ускоряющая процесс разработки проектной документации по организации систем дегазации и рекультивации в целом.

Материалы и методы

В качестве рассматриваемого объекта для апробации и имитации реальных условий проектирования была принята несанкционированная свалка, находящаяся на территории Российской Федерации. В перечень исходных данных входят инженерно-геологические, инженерно-геодезические, а также инженерно-экологические изыскания.

Участок площадью 9 га представляет собой поверхность с нарушенным рельефом, с около 40 площадками различного размера, где размещены твердые коммунальные отходы высотой от 0,5 до 8,0 м.

Подобная неоднородность характерна для многих несанкционированных свалок Ростовской области, где, как отмечает Беспалов [3], отсутствие системного подхода к размещению отходов усложняет последующую рекультивацию.

Исходя из полученных результатов изысканий, а также отсутствия водоносных горизонтов вплоть до глубины 15 м, целесообразно не производить извлечение свалочного грунта с площадки для дальнейшего вывоза на санкционированные объекты захоронения отходов. В соответствии с требованиями нормативных документов по объектам размещения отходов, отметка ложе свалочного тела должна быть не менее 2 м от горизонта подземных вод и не менее 5 м от водоносных горизонтов.

Описываемая методика состоит из шести этапов.

Первым этапом является моделирование и получение цифровой модели местности, при помощи ПО для информационного моделирования Autodesk Civil 3D. Методы цифрового моделирования, применяемые для оценки морфологии и расчета объемов тела полигона, доказали свою эффективность [6]. Подобный пространственный подход, успешно апробированный в системе управления ТКО Ростова-на-Дону [3], подтверждает эффективность ГИС-технологий для задач рекультивации нестандартных свалочных тел.

Исходными данными для данной процедуры являются данные топосъемки из инженерно-геодезических изысканий и данные инженерно-геологических изысканий. Ключевой информацией к последующей обработке на данном этапе является информация о планово-высотном положении навалов грунта для дальнейшего упорядочивания свалочного тела и информация о нижележащих инженерно-геологических элементах в визуальном виде для оценки ситуации.

Использование цифровых моделей рельефа (DEM) требует четкого понимания их типов и ограничений. Как отмечается в международном исследовании [7], ключевое различие между цифровыми моделями поверхности (DSM) и цифровыми моделями рельефа (DTM) особенно важно для задач рекультивации, где необходимо учитывать как естественный рельеф, так и антропогенные объекты.

Вторым этапом является создание из цифровой модели местности существующего рельефа упорядоченного свалочного тела, в соответствии с требованиями нормативных документов. При этом нужно учитывать ряд принципов:

- Свалочное тело должно формироваться с минимальным объемом перемещаемых отходов, при этом откосы должны иметь уклон не более 1:4 для снижения сметной стоимости;
- Рельеф рекультивируемой территории должен увязываться с существующим;
- Минимальная высота ТКО должна составлять не менее 3 м.

В результате второго этапа получена цифровая модель местности упорядоченного свалочного тела, которое в дальнейшем используется для подсчета объемов образуемого биогаза и разработки мероприятий по дегазации в составе рекультивации.

Третьим этапом является подсчет объемов грунта. Возможности ПО Autodesk Civil 3D позволяют при помощи визуального программирования ускорить процесс подсчета объема грунта на основании выполненной модели местности.

В рамках данного этапа выполнен скрипт, позволяющий выполнить автоматический подсчет объема грунта в зависимости от шага разбивки сетки вычисления объемов. Расчетная модель данного скрипта формализована следующим образом:

$$V_{\text{св.тело}} = \sum_0^n \iiint_0^V f(x, y, z) dx dy dz, \quad (1)$$

где n – количество одиночных 3D-тел для расчета объема свалочного грунта; V – объем 3D-тела; x, y, z – декартовы координаты точек, составляющих 3D-тело.

Критерием правильности расчета является сравнение суммы полученных объемов с первоначальной, рассчитанной на первом этапе, формирования цифровой модели местности существующего рельефа.

Диаграмма распределения 3D-тел по объему свалочного грунта представлена на рис.1.

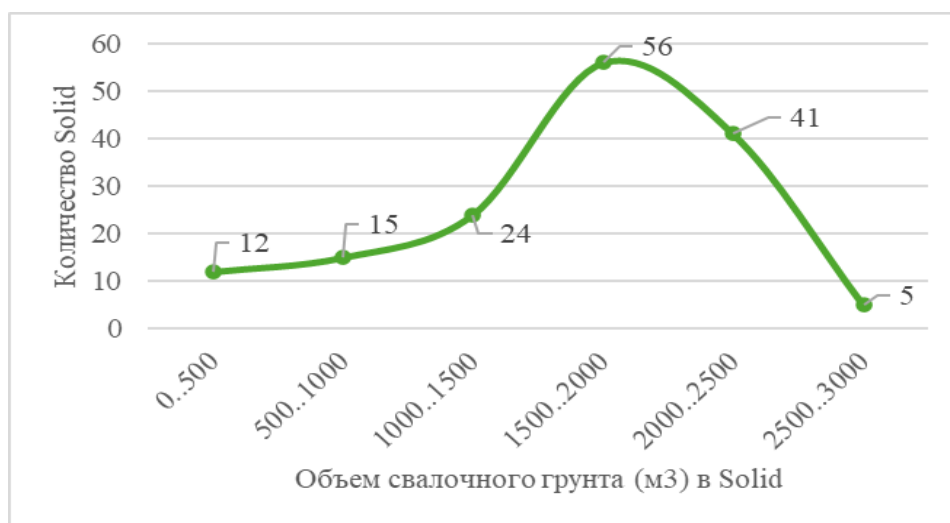


Рис. 1. – Диаграмма распределения 3D-тел по объему свалочного грунта

Большинство участков, полученных в результате разбиения с шагом 20x20 м находится в диапазоне 1500..2500 м³, в то же время имеется большое количество участков с меньшим объемом грунта. Это объясняется двумя причинами: рассчитывались 3D-тела с откосами (края свалочного тела), а также неравномерностью рельефа в толще свалочного тела.

Четвертым этапом является расчет образования газа во времени свалочного тела.

Метаногенез зависит от морфологического состава отходов. В исходных данных по несанкционированной свалке отсутствовала информация о возрасте и морфологическом составе отходов. Для определения возраста свалки и периода накопления отходов использовались архивные спутниковые снимки сервиса «Google Планета Земля». По результатам анализа снимков выяснено, что период накопления составлял 9 лет (с 2009 по 2018 год). Для более точного расчета образования газа необходимо проводить лабораторные исследования конкретных проб грунта.

Для определения морфологического состава отходов использовались статистические данные, представленные АКХ им. К. Д. Памфилова в «Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации на полигонах захоронения твердых бытовых отходов». Исходными данными для расчета являются морфологический состав биоразлагаемой части ТБО, зольность отходов, начальная влажность ТБО.

Морфологический состав биоразлагаемой части ТБО представлен в табл.1. Зольность отходов по статистическим данным принята 0,3. Начальная влажность отходов ТБО принимается 45%.

Таблица № 1

Морфологический состав биоразлагаемой части ТБО

Фракция	Содержание в отходах, %
Бумага, картон	32,72
Пищевые отходы	37,18
Дерево	1,45
Текстиль	4,25
Кости	1,5
Кожа, резина	1,58
Полимерные материалы	4,98

На примере одного участка габаритами 20х20 м было рассчитано количество образуемого биогаза и метана в единицу времени, исходя метанового потенциала для каждой фракции отходов.

Из п. 3.2.2. (Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации на полигонах захоронения твердых бытовых отходов) метановый потенциал L_{oi} (нм³/т сухих отходов) для каждой фракции отходов рассчитывается на основе морфологического состава ТБО по формуле:

$$L_{oi} = 11088 \cdot \frac{n_c}{\mu_i} \cdot (1 - A) \cdot B_f \quad (2)$$

где n_c – число киломолей углерода, содержащееся в 1 тонне фракции; μ_i – молярная масса фракции; A – зольность фракции, кг/кмоль, определяется по приложению 1; B_f – коэффициент биоразложения.

Ввиду отсутствия данных по коэффициенту биоразложения в «Рекомендациях», коэффициент принимался по [8].

Полный потенциал генерации метана L_o (нм³/т сухих отходов) учитывает только органически разлагаемые фракции определяется по формуле:

$$L_o = \sum (L_{oi} \cdot x_i) \quad (3)$$

где x_i – доли биоразлагаемых фракций.

В данном случае для расчета системы пассивной дегазации нас интересует скорость образования метана, определяемая по формуле:

$$V_{CH_4} = (1 - w)L_o M_{dk} k_2 e^{-k_2 \tau} \quad (4)$$

где τ – время разложения ТБО; w – влажность отходов, поступающих на полигон, доли ед.; M_{dk} – масса захороненных отходов; k_2 – константа разложения, принимаемая по табл.4.

При этом объем образования биогаза принимается в два раза выше скорости образования метана.

Масса захороненных отходов принимается, в зависимости от плотности отходов, которая в свою очередь зависит от коэффициента уплотнения типа применяемой техники для уплотнения, в соответствии с табл.8 (Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов).

Таким образом, масса отходов единичного участка будет равна:

$$M_{dk} = V_{ТБО} \cdot \rho_{ТБО} \cdot K_1 \quad (5)$$

где $V_{ТБО}$ – объем твердых бытовых отходов рассматриваемого участка, м³; $\rho_{ТБО}$ – начальная насыпная плотность отходов (принимается 0,2 т/м³); K_1 – коэффициент, учитывающий уплотнение ТБО.

Константа разложения принимается для средних условий для среднеразлагаемого типа отходов, как преобладающего в морфологическом составе отходов.

Проведем расчет образования биогаза и метана для пищевых отходов.

Результаты расчета метанового потенциала рассматриваемых фракций (нм³/т) на выделенном участке представлены в табл.2.

Таблица № 2

Результаты расчета метанового потенциала

Фракция	Пищевые отходы	Бумага, картон	Дерево	Текстиль	Кости	Кожа, резина	Полимерные материалы
L_{oi}	179,634	271,270	71,513	218,881	71,903	261,490	949,136
x_i	0,3718	0,3272	0,0145	0,0425	0,015	0,0158	0,0498
L_o	222,451						

Подобную операцию требуется повторить по количеству рассматриваемых участков, получившихся при разбиении всего свалочного тела. Расчеты были автоматизированы с помощью Microsoft Excel.

Пятым этапом расчета является расстановка скважин дегазации по площади свалочного тела. В рамках исследования дополнительно производится размещение скважин из принципа расчета скорости образования биогаза по осредненному показателю, с целью сравнения эффективности дегазации.

За основу расчета принята методика АО ВНИИ Галургии, представленной в статье «Расчетное обоснование дегазации полигона ТКО» [9].

На данном этапе требуется совместная работа с моделью свалочного тела, а также с результатами расчетов удельного газообразования, полученных на прошлых этапах.

В соответствии с данной методикой, рассматривается три участка:

- внешний – от границы влияния данной скважины, определяемой радиусом ее влияния R ;
- входной – от контура внешнего фильтра до внутренней поверхности трубы скважины;

- внутренний – в полости трубы скважины до выхода в нее: на данном участке потери напора заставят стотысячные доли м. вод. ст., поэтому ими можно пренебречь.

Для внешнего участка, каждый газовыпуск можно рассматривать как отдельно работающую скважину с круговым контуром питания в напорных водах, дебит которой рассчитывается по формуле Дюпюи после пересчета с воды на газ. Однако, поскольку мы рассматриваем рекультивируемый объект, то разгрузка биогаза будет осуществляться только через скважины. Поверхность свалочного тела будет закрыта противодиффузионным экраном, который обладает фактически нулевой газопроницаемостью.

Таким образом эффективное значение потери напора газа от границы зоны влияния до внешнего фильтра скважины вычисляется по формуле 4 [9]:

$$S_1 = k_n \left(\frac{10^{-5}}{K_{\phi o}} \right) \rho_o q_{\phi r} F (0,5 \lg (F) - \lg (r_{\phi}) - 0,25) \left(\frac{M_r}{M_1} \right); \quad (6)$$

где $F = L_c^2$ – площадь поверхности отходов на одну скважину; L_c – средний шаг скважин, расположенных по прямоугольной сетке, м; ρ_o – плотность отходов в теле полигона, т/м³; $q_{\phi r}$ – удельное газообразование м³/год на 1 т накопленных отходов; k_n – коэффициент неравномерности. С учетом имеющихся данных о распределении интенсивности газообразования по глубине свалочного тела $k_n \approx 3$; r_{ϕ} – радиус внешнего фильтра скважины, м; M_r – мощность газоносной толщи, равная суммарной толщине слоев отходов, прорезаемых скважиной, м; M_1 – суммарная мощность слоев, выполняющих функции горизонтального коллектора на пути движения газа к скважине, м.

Средний шаг скважин принимаем в первом приближении равным 40 м. Таким образом единичная скважина будет иметь радиус влияния, захватывающий четыре квадрата сетки габаритами 20x20 м.

В качестве защитного покрытия принимаем противодиффузионный экран, эскиз которого показан на рис.2.

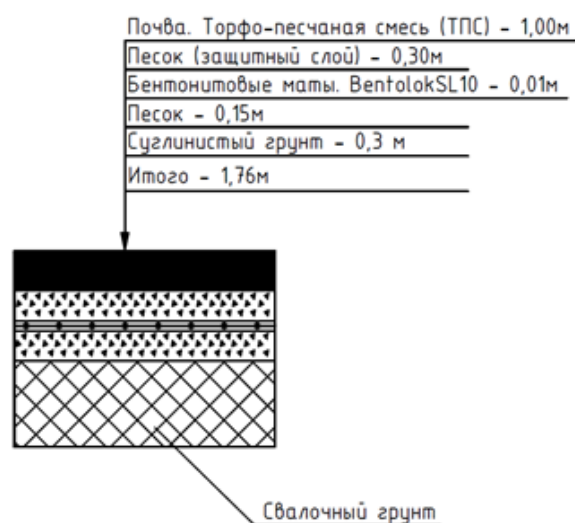


Рис. 2. – Эскиз противифльтрационного экрана

В качестве дегазационной скважины принимаем эскиз, изображенный на рис.3.

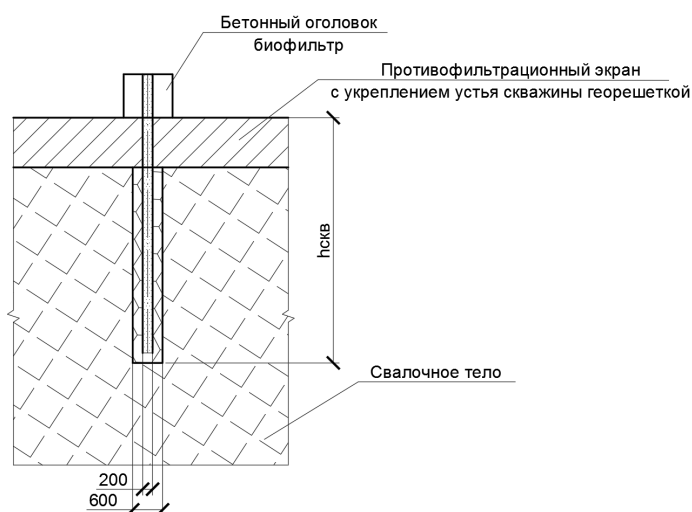


Рис. 3. – Эскиз дегазационной скважины

Мощность газоносной толщи принимается, исходя из анализа полученных в результате расчета ячеек.

В качестве исходных данных для расчета системы пассивной дегазации приняты следующие параметры:

$$- \rho_o = 0,6 \frac{\text{т}}{\text{м}^3};$$

$$- q_{бг} = 23,33 \frac{\text{м}^3}{\text{год}};$$

- $r_{\Phi} = 0,6$ м;
- L_c – варьируется;
- M_r, M_1 – варьируется.

Входной участок

Потеря напора при прохождении расхода газа через противифльтрационный экран рассчитывается по формуле:

$$S_2 = k_n \cdot 10^{-5} F \rho_o q_{ог} \left(\frac{M_r}{M_1} \right) / (K_{др} \pi \eta (D_{гв})^{0,5}); \quad (7)$$

где $K_{др}$ – коэффициент фильтрации дренирующей обсыпки (внешнего фильтра) скважины, м/сут; $D_{гв}$ – диаметр трубы скважины (газовыпуска), м; η – коэффициент эффективности экрана, принимаем равным 0,13, в соответствии с [8].

Диаметр трубы определяем по диаметру обсадки скважины, равный 0,6 м.

Для подбора шага скважин на том или ином участке, по данной методике требуется построить для конкретного грунта график зависимости от высоты отходов, как основного влияющего фактора при прочих постоянных.

При этом необходимо ограничивать избыточное давление под противифльтрационным экраном во избежание неблагоприятных процессов.

Для определения предельного избыточного давления под противифльтрационным экраном, предлагается использовать за основу расчет оснований на сдвиг по подошве фундамента, в соответствии с формулой 5.36 (СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений):

$$\sum F_{s,a} \leq \frac{\gamma_c \sum F_{s,r}}{\gamma_n} \quad (8)$$

где $\sum F_{s,r}$ – сумма проекций на плоскость скольжения соответственно расчетных удерживающих сил, кН; $\sum F_{s,a}$ – сумма проекций на плоскость скольжения расчетных сдвигающих сил, кН; γ_c – коэффициент условий работы, принимаемый для глинистых грунтов в нестабилизированном состоянии 0,85; γ_n – коэффициент условий работы, принимается для данного случая 0,5.

В данном случае сдвигом будет являться обрушение пласта грунта. Сдвигающей силой будет являться избыточное давление, равное сумме потерь напора входного и внешнего участка. Удерживающими силами будут собственный вес грунта, а также удельное сцепление грунта по контуру пласта грунта.

Размеры пласта грунта принимаются по аналогии с карстовыми воронками. Их диаметр принимаем равным 5 м, как для суглинистых грунтов в соответствии с [10].

Таким образом, максимальное избыточное давление будет равняться:

$$p_{\text{итmax}} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot \left(\gamma_g \cdot h + \frac{p_v \cdot h \cdot c}{A} \right) \quad (9)$$

где γ_g – собственный вес грунта (для суглинка в среднем принимается 2 т/м³); h – высота слоя грунта, м; p_v – периметр проекции пласта грунта, м; c – нормативное значение удельного сцепления грунта, кПа, для суглинков принимаем по табл. А.2. (СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений) равным $31/1,5=20,66$ кПа для $e = 0,65$, $0 \leq I_l \leq 0,25$.

Таким образом, максимальное избыточное давление грунта:

$$p_{\text{max}} \leq \frac{0,85}{0,5} \cdot \left(2000 \cdot 0,3 + \frac{15,708 \cdot 0,3 \cdot 2066}{19,635} \right) = 465,73 \text{ мм. вод. ст.}$$

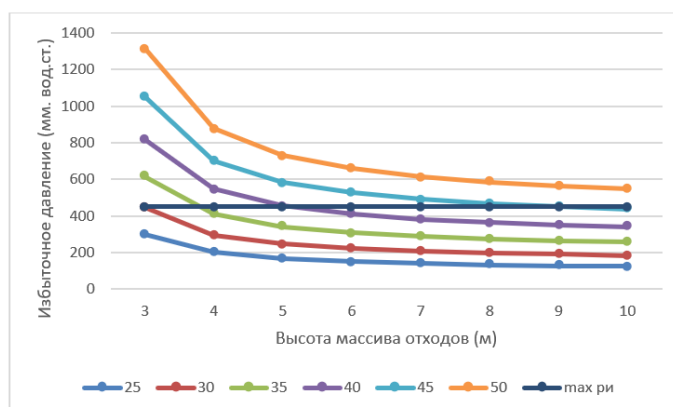


Рис. 4. – График зависимости избыточного давления от высоты массива отходов и шага скважин для рассматриваемого участка

Проанализировав график, видно, что максимальный шаг скважин возрастает с увеличением массива отходов.

По полученному графику производится расстановка скважин по условию ограничения избыточного давления в свалочном теле, в зависимости от высоты отходов.

Эскиз расстановки скважин, в соответствии с полученным графиком с учетом высот отходов показан на рис.5.

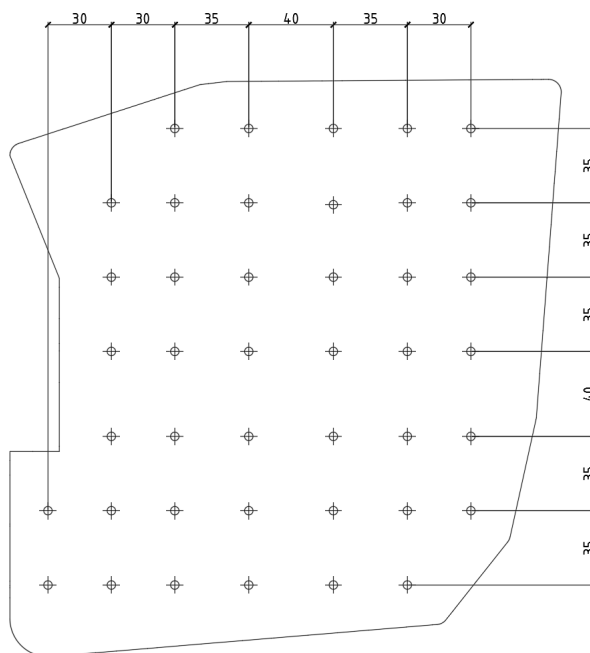


Рис. 5. – Схема расположения скважин пассивной дегазации, рассчитанных по новой методике

Далее проведем расстановку дегазационных скважин по осредненной методике, при которой количество дегазационных скважин назначается из расчета 1 скважина на 7500 м^3 , в соответствии с п.4.7. (Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов). Таким образом, шаг дегазационных скважин:

$$s_{\text{скв}} = \frac{V_{\text{ТБО}}}{7500} = \frac{244507,2}{7500} = 32,6 \text{ м} \cong 30 \text{ м}; \quad (10)$$

где $V_{\text{ТБО}}$ – общий объем отходов.

Шаг скважин, рассчитанный по осредненному показателю, назначается равным 30 м.

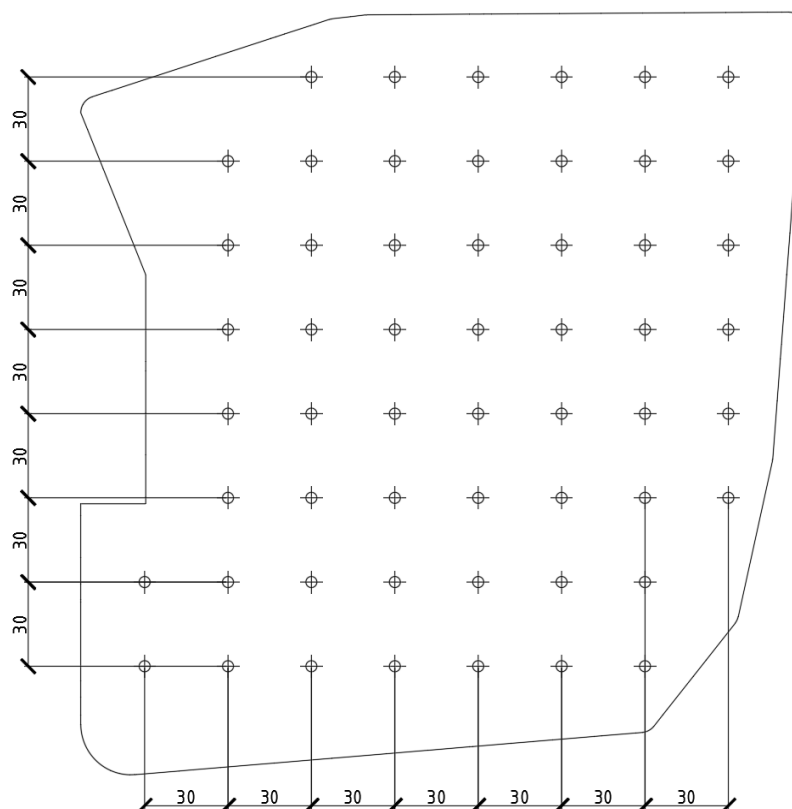


Рис. 6. – Схема расположения скважин пассивной дегазации, рассчитанной по осредненной методике

Дальнейшими шагами являются расчет ведомости объема работ, сметной стоимости строительства.

Результаты

Для оценки эффективности системы дегазации были выделены два критерия: технико – экономическая целесообразность; соотношение образуемого и отводимого биогаза.

На основании полученных результатов расчетов были рассчитаны трудозатраты и сметная стоимость устройства систем дегазации для двух сценариев. Результаты представлены в табл.3.

Таблица № 3

Технико – экономическое сравнение систем дегазации

Расчетные показатели	Системы дегазации	
	С учетом рельефа	Осредненные показатели
Технические, конструктивные показатели		
Количество скважин	31	55
Технологические показатели		
Общая трудоемкость работ, чел.-см	94,93	120,05
Затраты машинного времени, маш.-см	13,2	16,71
Сметная стоимость, руб.	650568,72	822416,77
НДС, руб.	130113,74	164483,35
Итого с НДС, руб.	780682,46	986900,12

Система дегазации, рассчитана по представленной методике, оказалась выгоднее на 21%, чем система, рассчитанная по осредненным показателям.

Расчет проводим также по методике АО ВНИИ Галургии (в авторстве С.П. Вострецова).

Удельная проводимость в вертикальном направлении, 1/сут, вычисляется по формуле [9]:

$$\beta = \frac{100}{\sum f}; \quad (11)$$

$$\sum f = f_o + f_{из} + f_{п} = \frac{h_o}{K_o} + \frac{h_{из}}{K_{из}} + \frac{h_{п}}{K_{п}}; \quad (12)$$

Принимая параметры, аналогично расчету системы дегазации:

– h_o – принимается в зависимости от глубины скважины, зависящей от высоты массива отходов на данном участке;

– $h_{из} = 0$ м – т.к. мероприятия по рекультивации данного объекта не предусматривают устройства промежуточных слоев изоляции грунтом;

– $h_{п} = 0,45$ м – высота водозащитного покрытия, в соответствии с рисунком 4.12, толщина рулонной гидроизоляции условно равна нулю;

$$- K_o = 0,3 \cdot K_{\phi o} = 0,3 \cdot 8,6 \frac{\text{м}}{\text{сут}} = 2,58 \text{ м/сут};$$

– $K_{из} = 0$, т.к. мероприятия по рекультивации рассматриваемой несанкционированной свалки ТКО не предусматривают промежуточную изоляцию слоев отходов;

– $K_{п} = 0,005 \frac{\text{м}}{\text{сут}}$ – в предположении, что покрытие в виде бентонитового мата может иметь дефекты, повышающие газопроницаемость.

Сформируем таблицу значений данного параметра, в зависимости от массива отходов для данного объекта.

Таблица № 4

Значения удельной проводимости β

Высота массива отходов, м	β , 1/сут
3	1.097
4	1.096
5	1.095
6	1.093
7	1.092
8	1.090
9	1.089
10	1.088

Коэффициент пропорциональности между расходом газа и потерей напора на скважине определяется по формуле [9]:

$$\alpha = \frac{M \cdot F \cdot \rho_0 \cdot q_{\text{бг}}}{365 \cdot p_{\text{н}}} = \frac{M \cdot L_c^2 \cdot 0,6 \cdot 23,33}{365 \cdot p_{\text{н}}};$$

Сформируем таблицу значений данного параметра, в зависимости от высоты массива отходов и шага скважин для данного объекта

Таблица № 5

Значения коэффициента пропорциональности α

M , м	30	35	40
3	233	-	-
4	465	457	-
5	699	685	673
6	932	913	898
7	1165	1142	1123
8	1397	1370	1347
9	1631	1599	1572
10	1863	1827	1797

Поскольку мы имеем разреженный шаг скважин дегазации, полученный в результате расчета системы пассивной дегазации по новой методике, вычисляем диапазон процента эффективности дегазации, а затем вычислим средневзвешенное, в зависимости от количества скважин с тем или иным шагом.

При этом максимальная эффективность (в центре свалочного тела, где высота отходов составляет 7 м и шаг скважин 40 м):

$$\varepsilon\% = \frac{100Q_c}{Q_r} = \frac{100}{1 + \left(\frac{1,092}{1123}\right) 0,82 \cdot 1600} = \mathbf{43,94\%}; \quad (13)$$

Минимальная эффективность при этом (по краю свалочного тела, где высота отходов составляет минимальные 3 м и шаг скважин 30 м)

$$\varepsilon\% = \frac{100Q_c}{Q_r} = \frac{100}{1 + \left(\frac{1,097}{233}\right) 0,82 \cdot 900} = \mathbf{22,37\%};$$

В результате расчета по осредненным показателям максимальная эффективность:

$$\varepsilon\% = \frac{100Q_c}{Q_r} = \frac{100}{1 + \left(\frac{1,092}{1123}\right) 0,82 \cdot 900} = \mathbf{58,21\%};$$

Минимальная эффективность при этом равняется:

$$\varepsilon\% = \frac{100Q_c}{Q_r} = \frac{100}{1 + \left(\frac{1,097}{233}\right) 0,82 \cdot 900} = \mathbf{22,37\%};$$

Таким образом, система дегазации, рассчитанная по методике, учитывающей рельеф осредненным показателем, оказалась эффективнее по количеству отводимого биогаза на **14,27%**. Увеличенная эффективность объясняется более частым шагом скважин в местах, где предложенная методика позволяет локально увеличить шаг без превышения предельно допустимого значения давления в толще свалочного тела. Предложенная

методика расчета системы пассивной дегазации оказалась экономически более выгодной, поскольку, при обеспечении безопасности объекта в целом, требует меньшее количество денежных и трудовых затрат на ее устройство.

Заключение

На основании всех вышеприведенных исследований можно говорить о возможности рассмотрения предложенной методики для разработки мероприятий по дегазации рекультивируемых полигонов и свалок ТБО. Однако для применения данного решения на реальных объектах следует провести дополнительные исследования, а также экспертную оценку.

В качестве необходимых исследований можно предложить:

1. Учет в методике расчета неравномерности образования свалочного газа по высоте, в связи с постепенным процессом накопления отходов;
2. Учет в методике расчета ограничений по предельно допустимым выбросам в воздух загрязняющих веществ (при отсутствии возможности фильтрации свалочного газа, поднимаемого на поверхность);
3. Выполнить мониторинг реально отводимого количества свалочного газа в условиях реального объекта.

Литература

1. Шеина С.Г., Бабенко Л.Л., Неделько С.С., Кобалия Н.Б. Система управления твердыми бытовыми отходами с использованием ГИС-технологий // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4(2). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1258.
 2. Krook J., Svensson N., Eklund M. Landfill mining: A critical review of two decades of research. Waste Management. 2012. Vol. 32, Iss. 3. pp. 513-520. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.10.015.
 3. Беспалов В.И., Парамонова О.Н., Лысова Е.П. Основные проблемы организации системы обращения с твердыми отходами
-

потребления на территории Ростовской области и пути их решения // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3205.

4. Балахчина Т.К. Оценка воздействия свалочного газа с полигонов твердых бытовых отходов на человека // Научный диалог. – 2012. – №1. – URL: cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozdeystviya-svalochnogo-gaza-s-poligonov-tverdyh-bytovyh-othodov-na-cheloveka (дата обращения: 10.06.2023).

5. Шлыков К.О., Запрудин А.Г. Рекультивация полигонов и свалок ТБО. Расчет эмиссии биогаза при разработке мероприятий по дегазации // Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур Safety2020: сборник статей / VI Международная конференция. – 2020. – С. 216–223.

6. Коротаев Е.В., Капранов С.В., Чупров С.Д. Использование ГИС-технологий для оценки морфологии и расчета объемов тела полигона твердых коммунальных отходов // Экология и промышленность России. — 2020. — Т. 24, № 8. — С. 60-65. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-8-60-65.

7. Guth P.L., Van Niekerk A., Grohmann C.H., Muller J.-P., Hawker L., Florinsky I.V., Gesch D., Reuter H.I., Herrera-Cruz V., Riazanoff S., López-Vázquez C., Carabajal C.C., Albinet C., Strobl P. Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. Remote Sensing. 2021. Vol. 13, Iss. 18. P. 3581. DOI: 10.3390/rs13183581.

8. Вайсман Я.И., Вайсман О.Я., Максимова С.В. Управление метаногенезом на полигонах твердых бытовых отходов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2003. – 228 с.

9. Вострецов С.П. Расчетное обоснование дегазации полигона ТКО // Твердые бытовые отходы. – 2018. – №3. – С. 11–15.

10. Лунегова М.С., Корякина А.В. Размеры поверхностных карстовых форм территории с. Усть-Кишерть Пермского края // Проблемы

геологии и освоения недр. – Томск: Нац. исслед. Томский политех. ун-т, 2017. – С. 470–471.

References

1. Sheina S.G., Babenko L.L., Nedel'ko S.S., Kobaliya N.B. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №4(2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1258.
2. Krook J., Svensson N., Eklund M. Landfill mining: A critical review of two decades of research. Waste Management. 2012. Vol. 32, Iss. 3. pp. 513-520. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.10.015.
3. Bepalov V.I., Paramonova O.N., Lysova E.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3205.
4. Balakhchina T.K. Nauchnyj dialog. 2012. №1. URL: cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozdeystviya-svalochnogo-gaza-s-poligonov-tverdyh-bytovykh-otkhodov-na-cheloveka (data obrashheniya: 10.06.2023).
5. Shlykov K.O., Zaprudin A.G. Problemy bezopasnosti stroitel'nykh kritichnykh infrastruktur Safety2020: sbornik statej. VI Mezhdunarodnaya konferentsiya. 2020. pp. 216–223.
6. Korotaev E.V., Kapranov S.V., Chuprov S.D. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2020. T. 24, № 8. pp. 60-65. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-8-60-65.
7. Guth P.L., Van Niekerk A., Grohmann C.H., Muller J.-P., Hawker L., Florinsky I.V., Gesch D., Reuter H.I., Herrera-Cruz V., Riazanoff S., López-Vázquez C., Carabajal C.C., Albinet C., Strobl P. Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. Remote Sensing. 2021. Vol. 13, Iss. 18. P. 3581. DOI: 10.3390/rs13183581.
8. Vajsman YA.I., Vajsman O.YA., Maksimova S.V. Upravlenie metanogenezom na poligonakh tverdykh bytovykh otkhodov. [Management of Methanogenesis at Landfills]. Perm': Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta, 2003. 228 p.
9. Vostretsov S.P. Tverdye bytovye otkhody. 2018. №3. pp. 11–15.



10. Lunegova M.S., Koryakina A.V. Problemy geologii i osvoeniya neдр. Tomsk: Nats. issled. Tomskij politekh. un-t, 2017. pp. 470–471.

Дата поступления: 17.08.2025

Дата публикации: 25.09.2025