



Техногрунт на основе свалочного фильтрата для послойной изоляции полигонов твердых коммунальных отходов

В. А. Матвеева¹, Ю. А. Куликова²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Протех Лаб», Санкт-Петербург, Россия; yuliyakulikova1997@mail.ru

В статье описаны негативные аспекты складирования твердых коммунальных отходов (ТКО) на полигонах и обоснована необходимость их послойной засыпки с инертными материалами. Рассмотрены основные применяемые для послойной изоляции материалы и предложена идея использования техногрунта на основе стабилизированного шлаками доменного производства свалочного фильтрата с массовым отношением компонентов 1:1:0.027 (фильтрат, доменный шлак, коагулянт). Проведены лабораторные исследования для обоснования возможности применения техногрунта в качестве послойно изолирующего материала: определен химический и фазовый состав; установлен IV класс опасности; доказано, что содержание токсичных веществ в водной вытяжке из техногрунта ниже или на уровне их содержания в свалочном фильтрате; определен интегральный показатель окисляемости, равный 260 мгО₂/л. В рамках эксперимента также установлены крупность частиц техногрунта, его хорошая уплотняемость, газопроницаемость к свалочным газам, а также водопроницаемость к инфильтрующимся атмосферным осадкам. Растворимость техногрунта составила менее 3 мас. %. Комплексом лабораторных исследований доказана возможность использования техногрунта на основе стабилизированного доменным шлаком свалочного фильтрата в качестве инертного материала при эксплуатации полигонов ТКО.

Ключевые слова: коммунальные отходы, полигон ТКО, свалочный фильтрат, доменный шлак, техногрунт, изоляция полигона ТКО

Techno-soil based on landfill leachate for layer-by-layer isolation of solid municipal waste landfills

V. A. Matveeva¹, Yu. A. Kulikova²

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² Protech Lab LLC, St. Petersburg, Russia

The article describes the main negative aspects of storing municipal waste at landfills and substantiates the need for their layer-by-layer backfill with inert materials. The main materials used for layer-by-layer isolation were considered and the idea of using techno-soil based on landfill leachate stabilized with blast furnace slag with a mass ratio of components of 1: 1: 0.027 (filtrate, blast furnace slag and coagulant) was proposed. Invitro studies were conducted to substantiate the possibility of using techno-soil as a layer-by-layer insulating material: the chemical and phase composition of the techno-soil was determined; hazard class IV of the waste-based material was established; it was proven that the content of toxic substances in the aqueous extract from the material was lower than or equal to their content in the leachate of landfill; the integral oxidation index was measured and equal to 260 mgO₂/l; the particle size of the material, its good compactibility and gas permeability to landfill gases, as well as water permeability to infiltrating atmospheric precipitation were established; the solubility of the material was less than 3 % by weight. Thus, the possibility of using techno-soil based on landfill leachate stabilized with blast furnace slag as an inert material in the operation of solid municipal waste landfills was proven.

Keywords: municipal waste, solid municipal waste landfill, landfill leachate, blast furnace slag, techno-soil, solid municipal waste landfill isolation

Введение

По мере развития цивилизации происходит постоянный рост объемов образования твердых коммунальных отходов (ТКО). Ежедневно в мире растет количество предметов и товаров, используемых в целях удовлетворения личных и бытовых нужд, которые, потеряв свои потребительские свойства, поступают на свалку. Отсутствие надлежащего обращения с такими отхода-

ми становится причиной загрязнения атмосферного воздуха, почвенного покрова и водных ресурсов.

Несмотря на развитие технологий переработки ТКО, в большинстве стран мира основным способом обращения с коммунальными отходами остается их размещение на полигонах. Согласно данным государственного доклада за 2024 год, объем образования ТКО в России превысил 47.7 млн тонн, подавляющая часть

Для цитирования: Матвеева В. А., Куликова Ю. А. Техногрунт на основе свалочного фильтрата для послойной изоляции полигонов твердых коммунальных отходов // Вестник геонаук. 2026. 4(376). С. 25–32. DOI: 10.19110/geov.2026.4.4

For citation: Matveeva V. A., Kulikova Yu. A. Techno-soil based on landfill leachate for layer-by-layer isolation of solid municipal waste landfills. Vestnik of Geosciences, 2025, 4(376), pp. 25–32. DOI: 10.19110/geov.2026.4.4

которых (83 %) была размещена на свалках¹. Негативным аспектом складирования отходов является нерациональное использование земель: под свалки в России отведено более 4 млн га.

Помимо использования территорий под хранение отходов, полигоны ТКО становятся источником масштабного загрязнения окружающей среды (Кирильчук и др., 2021). Происходит выделение в атмосферу отравляющего биогаза и образование токсичных сточных вод, загрязняющих почвы и водоёмы (Петров, Данилов, 2023; Мор, Ravindra, 2023). В целях предотвращения распространения загрязняющих веществ за пределы полигона ТКО существует необходимость проведения промежуточной изоляции складированных отходов в течение всего срока эксплуатации полигона.

Согласно инструкции по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО, изоляция осуществляется инертными материалами после достижения уплотненным слоем отходов мощности 2 м (Инструкция..., 1996). Изоляцию необходимо проводить не реже одного раза в течение 1–3 дней в зависимости от времени года слоем 0.15–0.25 м.

К традиционным материалам, используемым для послойной изоляции складированных отходов, относятся природные грунты. При добыче природного грунта происходит загрязнение почвенного покрова, а также в ряде случаев наблюдается изменение гидрологического режима водных объектов. Помимо этого, процесс извлечения природных грунтов требует существенных финансовых вложений. Как следствие, создается необходимость поиска альтернативного материала для послойной изоляции, который будет соответствовать требованиям и целям полигона ТКО.

Согласно действующей нормативной базе (Инструкция..., 1996; СП 320.1325800.20, 2018; ИТС 17-2024, 2024) и на основании научных трудов (Забелина и др., 2022; Titova et al., 2022; Патент № 2600681 РФ, 2016) для изоляции полигона ТКО могут быть использованы отходы строительной, деревообрабатывающей, стекольной, металлургической и прочих отраслей промышленности. Однако рассматриваемые отходы яв-

ляются неоднородными по составу и содержат недопустимые элементы, например металлические примеси, лимитирующие их использование.

Ранее была разработана рецептура техногрунтов на основе свалочного фильтрата, стабилизированного шлаками металлургического производства (Пашкевич, Куликова, 2024; Патент № 2807336 РФ, 2023). Техногрунт на основе свалочного фильтрата и шлака доменного производства потенциально может быть использован в нуждах полигона ТКО, что одновременно решит и проблему утилизации двух типов токсичных отходов.

Целью научной работы является исследование возможности использования техногрунта на основе свалочного фильтрата, стабилизированного доменным шлаком, в качестве послойно изолирующего материала при эксплуатации полигонов ТКО. Применимость материала будет установлена посредством определения его физико-механических и химических свойств и сопоставления полученных результатов с нормативными значениями.

Материалы и методы

Объектом исследования является техногрунт на основе свалочного фильтрата, полученный по технологии литификации — отвердевания материала с помощью вяжущего компонента, представленного шлаком доменного производства (Пашкевич, Куликова, 2024). В результате происходит переход фильтрата из жидкого состояния в твердое с получением готового материала — техногрунта. Ранее рядом экспериментов авторами была установлена оптимальная по времени отвердевания рецептура техногрунта в массовом соотношении компонентов 1:1:0.027 — фильтрат плотностью 1.5 т/м³, доменный шлак крупностью 1–2 мм и сульфат алюминия в качестве коагулянта для осаждения растворенных в фильтрате органических примесей. По истечении 7–14 дней с начала эксперимента техногрунт полностью твердеет и готов к использованию (рис. 1).

При использовании отходов производства в качестве послойно изолирующего материала необходимо



Рис. 1. Схема получения техногрунта на основе свалочного фильтрата

Fig. 1. Scheme for obtaining techno-soil based on landfill leachate

¹ О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году: Проект Государственного доклада. М.: Минприроды России; ВНИИ Экология, 2025. 721 с. URL: <https://www.mnr.gov.ru/> (дата обращения: 19.09.2025 г.).



соблюдение следующих требований (Инструкция..., 1996; СП 320.1325800.2017, 2018):

- крупность частиц не более 0.25 м;
- высокая степень уплотняемости;
- газопроницаемость в сочетании с сорбционными свойствами для нейтрализации запахов разложения;
- водопроницаемость при сохранении структурной целостности под воздействием атмосферных осадков (нерастворимость);
- класс опасности отходов не выше IV;
- содержание токсичных веществ в водной вытяжке из отхода (при компонентном соотношении 1:1) ниже или наравне с теми же показателями в свалочном фильтрате;
- интегральный показатель потребляемости кислорода (БПК₂₀ и ХПК) в водной вытяжке не более 300 мгО₂/л.

Крупность частиц техногрунта определялась методом лазерной дифракции на анализаторе размеров частиц HORIBA модификации LA-950 (HORIBA, Франция), оснащенный системой сухого диспергирования.

Степень уплотняемости техногрунта определяется через коэффициент уплотнения, который рассчитывается как отношение насыпной плотности к максимальной (Чунюк и др., 2023). Насыпная плотность регламентируется ГОСТ 32721-2014 и отражает массу некоторого объема материала в естественном неуплотненном состоянии. Максимальная плотность представляет собой наибольшую возможную плотность сухого материала при его механическом уплотнении. Для определения максимальной плотности в соответствии с ГОСТ 22733-2016 необходимо найти значение оптимальной влажности техногрунта, при которой будет достигаться наибольшая плотность. Расчет производится в пересчете на сухой материал с учетом оптимальной влажности как отношение массы влажного техногрунта к занимаемому им объему (1):

$$\rho_{\text{сух}} = \frac{\rho_{\text{вл}}}{1 + 0.01\omega_{\text{опт}}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{сух}}$ – максимальная плотность техногрунта, г/см³; $\rho_{\text{вл}}$ – плотность влажного техногрунта, г/см³; $\omega_{\text{опт}}$ – оптимальная влажность техногрунта, %.

Газопроницаемость техногрунта зависит от его пустотности, то есть объема межчастичного пространства, поскольку именно через эти пустоты газ будет проходить сквозь материал (Kiru et al., 2022). Таким образом, чем больше пустот, тем выше газопроницаемость. Значение пустотности исходя из ГОСТ 32721-2014 определяется по формуле (2):

$$V_{\text{мат}} = \left(\frac{\rho_{\text{ист}} - \rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{ист}}} \right) \cdot 100, \quad (2)$$

где $V_{\text{мат}}$ – пустотность техногрунта, %; $\rho_{\text{ист}}$ и $\rho_{\text{нас}}$ – истинная и насыпная плотность техногрунта соответственно (г/см³).

Истинная плотность техногрунта, в отличие от насыпной, определяется при условии абсолютно плотного состояния, исключая наличие пустот, и в соответствии с ГОСТ 32722-2014 рассчитывается по следующей формуле (3):

$$\rho_{\text{ист}} = \frac{(m - m_1) \cdot \rho_{\text{в}}}{m - m_1 + m_2 - m_3}, \quad (3)$$

где m – масса пикнометра с техногрунтом, г; m_1 – масса пустого пикнометра, г; m_2 – масса пикнометра с дистиллированной водой, г; m_3 – масса пикнометра с техногрунтом и дистиллированной водой, г; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, г/см³.

Растворимость техногрунта определялась гравиметрическим методом по потере массы. Для этого из техногрунта готовилась водная вытяжка в массовом соотношении твердого к жидкому 1:5, а далее полученная смесь перемешивалась в течение часа и фильтровалась. Оставшийся на фильтре нерастворившийся осадок был высушен и взвешен без учета массы фильтра. По отношению массы растворившегося осадка к первоначальной массе навески техногрунта можно определить его растворимость.

Для характеристики проницаемости техногрунта по отношению к фильтрующей воде согласно ГОСТ 25584-2023 используют такой показатель, как коэффициент фильтрации, показывающий скорость прохождения воды через полностью насыщенный материал при единичном градиенте напора. Определение проводится с использованием трубки Г. Н. Каменского (рис. 2).

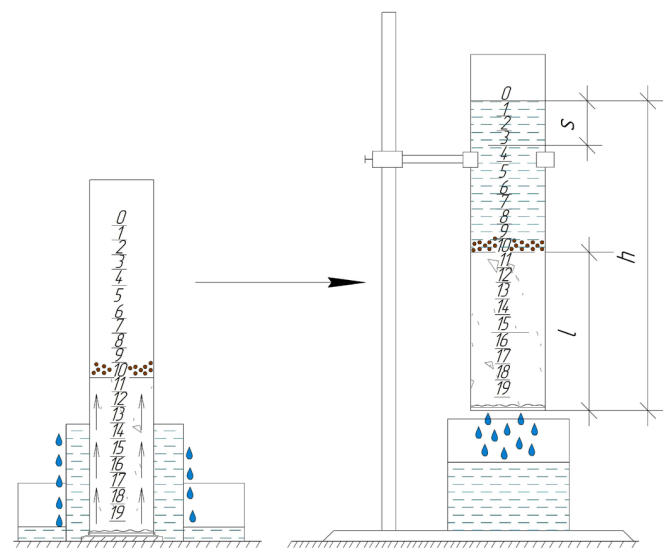


Рис. 2. Определение коэффициента фильтрации техногрунта в трубке Г. Н. Каменского

Fig. 2. Determination of the filtration coefficient of technosoil in the G. N. Kamensky tube

После полного насыщения техногрунта на нем формируют слой воды и засекают время ее прохождения определенного пути (рисок). Согласно стандартизированной документации коэффициент фильтрации рассчитывается по следующей формуле (4):

$$K_{\phi} = \left(\frac{l}{t} \right) \cdot f\left(\frac{S}{h} \right), \quad (4)$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, см/с; l – высота столба техногрунта, см; t – время прохождения водой столба техногрунта l , с. Величина $f(S/h)$ является табличным значением, где S – высота столба воды, прошедшая через техногрунт за время t , см; h – первоначальная высота столба воды (напор), см.

При проведении расчетов необходимо учитывать реальные среднегодовые температурные условия фильтрационных вод, поэтому коэффициент фильтрации $K_{\phi 10}$ пересчитывается с учетом температурной поправки ТП для предполагаемой (10 °С) и реальной температур по следующей формуле (5):

$$TP = 1 + 0.0337 \cdot T + 0.000221 \cdot T^2. \quad (5)$$

Расчет итогового коэффициента фильтрации техногрунта производится с учетом температурных поправок по формуле (6):

$$K_{\phi 10} = \frac{K_{\phi} \cdot TP_{10}}{TP_{\text{реал}}}. \quad (6)$$

Для установления безопасности применения техногрунта на основе отходов (доменного шлака и свалочного фильтрата полигонов ТКО) проводилось определение его класса опасности методом биотестирования на культуре водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris*) по ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04. Для этого рассчитывалась кратность разбавления вытяжки из техногрунта (ТКР), при которой происходит изменение оптической плотности относительно дистиллированной воды — снижение более чем на 20 % или повышение свыше 30 %. При подавлении прироста более чем на 20 % ТКР рассчитывается по следующей формуле (7):

$$TKP = 10 \frac{(lgP_6 - lgP_M) \cdot (I_M - 0,2)}{I_M - I_6} + lgP_M, \quad (7)$$

где P_6 — кратность разбавления (наибольшая), при которой процент отклонения был ниже критерия токсичности (20 %); P_M — кратность разбавления (меньшая), при которой процент отклонения был выше критерия токсичности; I_6 и I_M — отклонения от контроля, соответствующие этим разбавлениям, выраженные в долях.

Помимо определения кратности разбавления вытяжки из техногрунта был выполнен расчет степени опасности отхода для окружающей среды (К) в соответствии с приказом Минприроды России № 536 (Об утверждении..., 2015).

Определение химического состава техногрунта проводилось методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием сканирующего рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 (Shimadzu, Япония). Фазовый состав техногрунта был получен методом рентгеновской порошковой дифрактометрии с использованием дифрактометра «Колибри» (ИЦ «Буревестник», Россия) и параметрами съемки: анод — Cu; 40kV_10mA. Идентификация данных порошковой дифрактометрии проводилась с использованием базы данных COD.

Содержание токсичных веществ в водной вытяжке из техногрунта при соотношении 1:1 определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии с использованием спектрометра AA-7000 (Shimadzu, Япония). Для установления содержания в водной вытяжке из техногрунта органических веществ были определены показатели химического и биологического потребления кислорода (ХПК и БПК₂₀). ХПК определялось спектрофотометрическим методом с использованием спектрофотометра DR 5000 (HACH-LANGE, Германия) (ФР.1.31.2013.16588, 2013), БПК₂₀ — манометрическим методом с помощью системы БПК OxiTop (WTW, Германия) (ФР.1.31.2015.20690, 2015).

Результаты и обсуждение

Рассмотрим возможность использования полученного на основе свалочного фильтрата техногрунта, стабилизированного шлаком доменного производства, в качестве изоляционного материала при эксплуатации полигона ТКО.

Физико-механические характеристики техногрунта

Крупность. Для эффективной изоляции полигона ТКО необходимо, чтобы размер частиц используемого материала не превышал 0.25 м. Техногрунт на основе свалочного фильтрата является хрупким материалом и легко самоизмельчается после отвердевания при контакте с ним. Анализ размеров частиц техногрунта показал, что наибольшая крупность включений материала составила 1.3 мм, что сопоставимо с частицами природного грунта, размер которых варьируется в пределах 0.01–2.0 мм в соответствии с ГОСТ 12536-2014 (рис. 3).

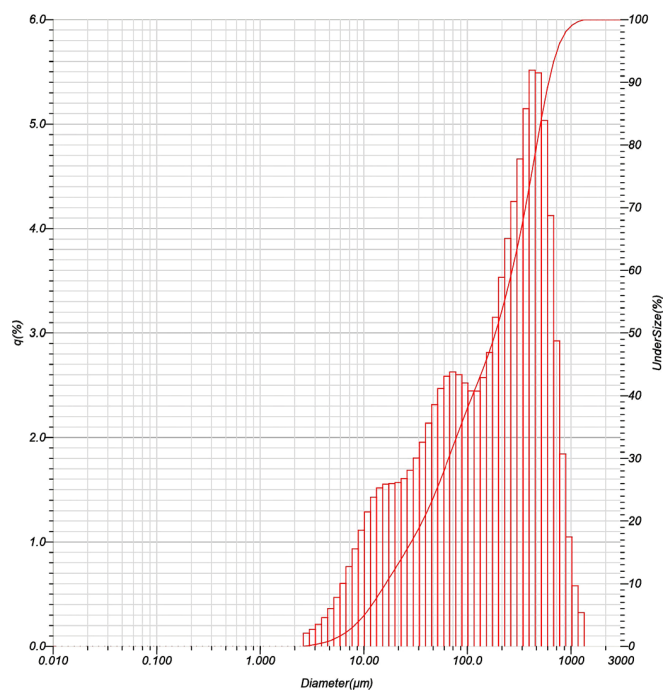


Рис. 3. Распределение размеров частиц техногрунта

Fig. 3. Distribution of particle sizes of techno-soil

Уплотняемость. Далее проводилось определение насыпной и максимальной плотности. Насыпная плотность техногрунта составила (1.58 ± 0.10) т/м³, что сопоставимо с природными грунтами, среднее значение насыпной плотности которых варьируется в диапазоне 1.0–2.0 т/м³ (от легких до плотных скальных пород). Максимальная плотность техногрунта составила (2.16 ± 0.10) т/м³. Таким образом, коэффициент уплотняемости материала составит 0.73, что является низким показателем. Однако полученного коэффициента уплотняемости техногрунта достаточно для решения поставленных задач на полигоне: недопущение проникновения животных, птиц и грызунов в изолируемые отходы. Помимо прочего, техногрунт будет находиться во влажных условиях при выпадении атмос-



ферных осадков и разложении отходов, что увеличит его уплотняемость.

Газопроницаемость. По результатам испытаний было установлено, что истинная плотность техногрунта составляет (1.90 ± 0.10) г/см³ при насыпной (1.58 ± 0.10) т/м³. Таким образом, пустотность материала составляет 17 % от общего объема материала, что подтверждает его способность к пропусканию сквозь толщу техногрунта свалочных газов (Feng et al., 2023). Однако помимо пустотности на газопроницаемость будут влиять условия эксплуатации грунта, которые необходимо подбирать с учетом свойств рассматриваемого материала.

Водопроницаемость. Для природных грунтов, используемых для изоляции полигона ТКО, коэффициент фильтрации в среднем составляет: для суглинков — менее 0.1 м/сут, а для супесей и пылеватых песков — 0.1–1.0 м/сут (ГОСТ 25100-2020). Для предлагаемого техногрунта был установлен коэффициент фильтрации в диапазоне 0.65–0.75 м/сут, что сопоставимо со значениями для используемых природных грунтов.

Растворимость. При испытании материала на растворимость было установлено, что при его взаимодействии с водой любого генезиса (атмосферные осадки, собственная влажность ТКО, очищенные фильтрационные, дренажные и технологические воды, используемые для гидроорошения полигонов ТКО) вымывается порядка 3 % от массы исходного образца. Потеря массы материала происходит за счет растворимых соединений, преимущественно кальция, натрия, калия и магния (Пашкевич, Куликова, 2024). В дальнейшем вымывание будет наблюдаться незначительное, так как общее содержание подвижных форм элементов, которые переходят в раствор в слабокислой среде, чуть выше 3 %.

Химический и фазовый состав техногрунта

Химический состав. Химический состав представлен в таблице 1, из которой видно, что основными компонентами техногрунта являются кальций, кремний, алюминий и магний.

Фазовый состав. Результаты анализа методом рентгеновской порошковой дифрактометрии показали, что основной идентифицируемой фазой в техногрунте является минерал мелилитовой группы (обобщенная формула — $(Ca,Na)_2(Al,Mg,Fe^{2+})[(Al,Si)SiO_7]$) — акерманит ($Ca_2MgSi_2O_7$), который составляет основную часть доменных шлаков, также идентифицируются натрийсодержащий мелилит ($CaNaAl(Si_2O_7)$), примеси арагонита ($CaCO_3$) и оксида алюминия (рис. 4). Фазовый состав согласуется с данными элементного состава, полученными методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

Химическая и биологическая токсичность техногрунта

Класс опасности отхода. По результатам токсикологических исследований методом биотестирования на культуре водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris*) установлена токсичная кратность разбавления водной вытяжки из полученного техногрунта (48.5), при которой происходит подавление роста величины оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris*), выращенной в водной вытяжке из техногрунта, на 20 % по сравнению с ее ростом на контрольной среде, приготовленной на дистиллированной воде. Согласно приказу Минприроды России № 536, при кратности разведения водной вытяжки от 1 до 100 отход можно отнести к IV классу опасности.

Помимо кратности разведения водной вытяжки из техногрунта расчетным методом была определена степень его опасности для окружающей среды (К), ко-

Таблица 1. Химический состав техногрунта на основе свалочного фильтрата

Table 1. Chemical composition of techno-soil based on landfill leachate

Содержание основных компонентов (в пересчете на абс. сухое состояние), %										
Content of main components (calculated on an absolute dry basis), %										
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	ППП
41.0	38.15	8.6	7.4	1.0	0.7	0.55	0.38	0.28	0.14	1.8

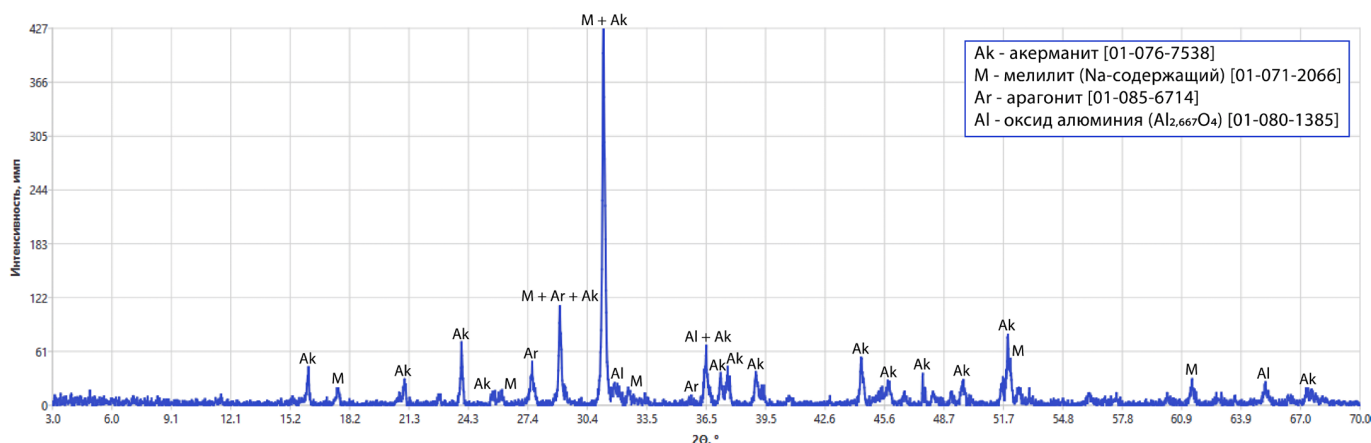


Рис. 4. Дифрактограмма техногрунта

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of of techno-soil

торая составила менее 10, что соответствует V классу опасности согласно приказу Минприроды России № 536.

Таким образом, для полученного материала по двум показателям установлен IV класс опасности отхода, так как при несовпадении определенного методом биотестирования и рассчитанного классов опасности присваивается установленный исходя из кратности разведения водной вытяжки из отхода.

Содержание токсичных веществ. Применение полученного техногрунта для послойной изоляции полигонов ТКО допускается при условии содержания токсичных веществ в его водной вытяжке на уровне или ниже, чем в свалочном фильтрате. В таблице 2 приведен сравнительный анализ параметров водной вытяжки из техногрунта и свалочного фильтрата, из которого был приготовлен образец техногрунта.

Таблица 2. Содержание токсичных веществ (мг/дм³) в водной вытяжке из техногрунта и свалочном фильтрате

Table 2. Content of toxic substances (mg/dm³) in aqueous extract from industrial soil and landfill leachate

Компонент Component	Водная вытяжка из техногрунта (1:1) Water extract from techno-soil (1:1)	Фильтрат с полигона ТКО Landfill leachate
Cu	0.30	0.35
Cd	<	0.27
Hg	<	<
Pb	<	<
As	<	<
Zn	0.10	6.50
Ni	0.40	0.48

Из полученных данных следует, что концентрации токсичных веществ, в частности тяжелых металлов, в техногрунте на уровне и ниже, чем в свалочном фильтрате, что позволяет использовать его в качестве пересыпного изолирующего материала на полигоне ТКО.

Помимо этого, использование техногрунта ограничено суммарным показателем окисляемости в его водной вытяжке (не более 300 мгО₂/л). По результатам анализа интегральная потребляемость кислорода в водной вытяжке из техногрунта ниже в 25 раз по сравнению с тем же показателем в свалочном фильтрате и составляет 260 мгО₂/л, где ХПК — 173 мгО₂/л, а БПК₂₀ — 87 мгО₂/л.

Заключение

Проведённые исследования свидетельствуют о соответствии физико-механических и химических свойств полученного на основе свалочного фильтрата техногрунта ключевым требованиям, предъявляемым к материалу для послойной изоляции полигонов ТКО. Результаты лабораторных исследований показали, что техногрунт преимущественно состоит из соединений кремния, кальция, алюминия и магния; основными фазами в техногрунте являются акерманит, мелилит, арагонит и оксид алюминия; крупность частиц мате-

риала не превышает 1.3 мм; уплотняемость техногрунта ниже, чем у природного грунта, однако для целей полигона является оптимальной (коэффициент уплотняемости 0.73); техногрунт является газопроницаемым благодаря своей пористой структуре (пустотность 17%), однако конечное значение будет зависеть от степени укатки грунта и климатических условий; при прохождении осадков сквозь толщу отходов, а также при выделении ими собственной влаги в процессе разложения из техногрунта будет вымываться менее 3% компонентов по массе, что свидетельствует о его стабильности; техногрунт является водопроницаемым, что обеспечит увлажнение нижних слоев отходов для ускорения процессов их разложения и в целях пожаробезопасности (коэффициент фильтрации 0.65—0.75 м/сут); техногрунт является малоопасным и имеет IV класс опасности отхода; содержание токсичных веществ в водной вытяжке из техногрунта ниже, чем в фильтрате, а интегральный показатель окисляемости составил 260 мгО₂/л.

Таким образом, результаты исследования подтверждают возможность использования полученного на основе свалочного фильтрата техногрунта, стабилизированного доменным шлаком, на полигонах ТКО для послойной изоляции складированных коммунальных отходов. При этом полученные характеристики техногрунта сопоставимы с показателями применяемого на сегодняшний день на полигонах ТКО природного грунта. Данная технология позволит сократить затраты на добычу грунта, не нарушать гидрологический режим при его добыче, а также снизить экологическую нагрузку от многотоннажного образования доменного шлака и фильтрата полигонов ТКО путем их совместной утилизации.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

Литература / References

- ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.
GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standartinform; 2019. 23 p. Russian.
- ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.
GOST 22733-2016. Soils. Laboratory method for determining of maximum density. Moscow: Standartinform, 2019; 14 p. Russian.
- ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 41 с.
GOST 25100-2020. Soils. Classification. Moscow: Standartinform; 2020. 41 p. Russian.
- ГОСТ 25584-2023. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 19 с.
GOST 25584-2023. Soils. Laboratory methods for determining the filtration coefficient. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. 19 p. Russian.
- ГОСТ 32721-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дробленый. Определение



- насыпной плотности и пустотности. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
- GOST 32721-2014. Public roads. Natural and crushed sand. Determination of bulk density and void content. Moscow: Standartinform; 2019. 8 p. Russian.
- ГОСТ 32722-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дробленый. Определение истинной плотности. М.: Стандартинформ, 2019. 9 с.
- GOST 32722-2014. Public roads. Natural and crushed sand. Determination of true density. Moscow: Standartinform; 2019. 9 p. Russian.
- Забелина А. В., Молодкина Н. Р., Сергиенко О. И. Особенности применения технологического грунта, полученного методом компостирования твердых коммунальных отходов // Московский экономический журнал. 2022. № 6. С. 293—301. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_6_388 Zabelina A. V., Molodkina N. R., Sergienko O. I. Features of the application of technological soil obtained by composting municipal solid waste. Moscow Economic Journal. 2022;6:293—301. Russian.
- Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. М.: Министерство строительства Российской Федерации, 1996. 56 с.
- Guidelines for Design, Operation, and Remediation of Solid Consumption Waste Disposal Sites. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation; 1996. 56 p. Russian.
- ИТС 17-2024. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Размещение отходов производства и потребления: Утв. Приказом Росстандарта от 24.12.2024 № 3070. М.: Стандартинформ, 2024. 156 с.
- ITR 17-2024. Information technology reference book on accessible technologies. Waste disposal. (approved by Order of Rosstandart dated 24.12.2024 No. 3070). Moscow: Standardinform; 2024. 156 p. Russian.
- Кирильчук И. О., Иорданова А. В., Филлист С. А. Совершенствование методов оценки негативного воздействия объектов размещения отходов на окружающую среду и здоровье населения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11. № 1. С. 82—97.
- Kiriichuk I. O., Iordanova A. V., Filist S. A. Improving Methods for Assessing the Negative Impact of Waste Disposal Facilities on the Environment and Public Health. Proceedings of the Southwest State University. Series: IT Management, Computer Science, Computer Engineering. Medical Equipment Engineering. 2021;11(1):82—97. Russian.
- Об утверждении «Критериев отнесения отходов к I—V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду»: Приказ Минприроды России от 04.12.2014 № 536 (зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2015 № 40330)
- Approval of the criteria for classifying waste into I—V hazard classes according to the degree of negative impact on the environment. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 04.12.2014 No. 536. Russian.
- Патент № 2600681 РФ. Материал для промежуточной изоляции уплотненных слоев твердых коммунальных отходов на полигоне / Я. И. Вайсман, М. Ф. Гайдай, К. Г. Пугин, Л. В. Рудакова, И. С. Глушанкова. Опубл. 27.10.2016. Бюл. № 30.
- Vajsman Ya. I., Gajdaj M. F., Pugin K. G., Rudakova L. V., Glushankova I. S. Patent No. 2600681 RU. Material for intermediate insulation of compacted layers of solid community wastes at landfill. Publ. 27.10.2016. Bul. No. 30 Russian.
- Патент № 2807336 РФ. Способ получения инертного грунта / В. А. Матвеева, И. М. Валиулин, М. А. Чукаева, Ю. Д. Смирнов. Опубл. 14.11.2023. Бюл. № 32.
- Matveeva V. A., Valiulin I. M., Chukaeva M. A., Smirnov Yu. D., inventors. Method of obtaining inert soil. Patent 2807336 RU. Publ. 2023 Nov 14. Bul. No. 32. Russian.
- Пашкевич М. А., Куликова Ю. А. Литификация доменным шлаком фильтрата полигонов ТКО // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 477—487.
- Pashkevich M. A., Kulikova Yu. A. Lithification of leachate from municipal solid waste landfills with blast furnace slag. Journal of Mining Institute. 2024;267:477—487. Russian.
- Петров Д. С., Данилов А. С. Гидрохимическая характеристика и экологическое состояние водных экосистем в зоне влияния предприятия по производству минеральных удобрений // Горный журнал. 2023. № 9. С. 83—88. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.12
- Petrov D. S., Danilov A. S. Hydrochemistry and ecology of aquatic ecosystems in influence zones of mineral fertilizers production. Mining Journal. 2023;9:83—88. Russian.
- ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04/Т 16.1:2:2.2:2.3:3.7-04. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, донных отложений, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. М.: ФЦАО, 2021. 38 с.
- PND FT 14.1:2:3:4.10-04/Т 16.1:2:2.2:2.3:3.7-04 Toxicological control methods. Methodology for measuring the optical density of the chlorella algae culture (*chlorella vulgaris beijer*) to determine the toxicity of drinking, fresh natural and waste water, aqueous extracts from soils, sewage sludge, production and consumption waste. Moscow: FCAO; 2021. 38 p. Russian.
- СП 320.1325800.2017. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018. 21 с.
- SP 320.1325800.2017. Polygons for solid communal waste. Projecting, operation and reclamation. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2018. 21 p. Russian.
- Чунюк Д. Ю., Коптева О. В., Сельвиан С. М. Определение характеристик уплотняемых песчаных и глинистых грунтов полевыми и лабораторными методами // Новые технологии в строительстве. 2023. Т. 9. № 4. С. 183—193. DOI: 10.24412/2409-4358-2023-4-183-193
- Chunyak D. Y., Kopteva O. V., Selviyan S. M. Determination of characteristics of compacted sandy and clay soils using field and laboratory methods. New Technologies in Construction. 2023;9:183—193. Russian.
- ФР.1.31.2013.16588. Методика выполнения измерений биохроматной окисляемости воды (ХПК) в питьевой, поверхностной природной, сточной, морской воде, в во-



- де бассейнов и технологической воде спектрофотометрическим методом. М.: Экоинструмент. 2013. 15 с. FR.1.31.2013.16588. Methodology for measuring the dichromate oxidizability of water (COD) in drinking, surface natural, waste, sea water, in swimming pool water and process water using the spectrophotometric method. Moscow: Ecoinstrument; 2013. 15 p. Russian.
- ФР.1.31.2015.20690. Количественный химический анализ природных и сточных вод: Методика измерений биохимического потребления кислорода в пробах природных и сточных вод по изменению давления газовой фазы (манометрический метод). М.: Экоинструмент, 2015. 30 с.
- FR.1.31.2015.20690. Quantitative chemical analysis of natural and waste water. Methodology for measuring biochemical oxygen demand in samples of natural and waste water based on changes in gas phase pressure (manometric method). Moscow: Ecoinstrument; 2015. 30 p. Russian.
- Feng S., Huang S. F., Jiang J. L., Zhan L. T., Li G. Y., Guan R. Q., Guo H. W., Liu H. W. Effects of Pore-Size Distribution on the Gas Diffusion Coefficient and Gas Permeability of Compacted Manufactured Sand Tailing–Bentonite Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2023;149(11):1–23. DOI: 10.1061/JGGEFK.GTENG-1130.
- Kiuru P., Palviainen M., Marchionne A., Gronholm T., Raivonen M., Kohl L., Lauren A. Pore network modeling as a new tool for determining gas diffusivity in peat. *Biogeosciences Discussions*. 2022;2022:1–25. DOI: 10.5194/bg-19-5041-2022.
- Mor S., Ravindra K. Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries: Environmental impacts, challenges and sustainable management practices. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023;174:510–530. DOI: 10.1016/j.psep.2023.04.014.
- Titova A., Shmandiy V., Kharlamova O., Rygas T., Malovanyy M. Technological aspects of landfill reclamation using industrial waste. *Water supply and wastewater disposal: Designing, Construction, Operation and Monitoring IV*; 2022. p. 305–323.

Поступила в редакцию / Received 28.01.2026

Редакторы издательства:

О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка

А. Ю. Перетягина

Выписка из реестра средств массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 29.05.2026. Формат бумаги 60 × 84^{1/8}. Печать RISO. Усл. п. л. 4.0. Тираж 130. Заказ 1265. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издатель: Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Адрес редакции, издателя, типографии: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru.

На обложке использованы фото Е. Антроповой, А. Перетягина, М. Сокерина, Р. Шуктомова