

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2024, Том 11, № 3 / 2024, Vol. 11, Iss. 3 <https://resources.today/issue-3-2024.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/05NZOR324.pdf>

DOI: 10.15862/05NZOR324 (<https://doi.org/10.15862/05NZOR324>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Котов, Ф. В. Оценка устойчивости откоса полигона твёрдых коммунальных отходов при частичном водонасыщении / Ф. В. Котов, М. П. Саинов // Отходы и ресурсы. — 2024. — Т. 11. — № 3. — URL: <https://resources.today/PDF/05NZOR324.pdf> DOI: 10.15862/05NZOR324

For citation:

Kotov F.V., Sainov M.P. Assessment of slope stability of municipal solid waste landfill slope at partial water saturation. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2024;11(3): 05NZOR324. Available at: <https://resources.today/PDF/05NZOR324.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/05NZOR324

УДК 699.88

Котов Филипп Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

Старший преподаватель кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства»

E-mail: KotovFV@mgsu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=675643

Саинов Михаил Петрович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Заведующий кафедрой «Энергетических и гидротехнических сооружений»

Доктор технических наук, доцент

E-mail: SainovMP@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-3164>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506150284>

Оценка устойчивости откоса полигона твёрдых коммунальных отходов при частичном водонасыщении

Аннотация. Одной из проблем эксплуатации и рекультивации полигонов твёрдых коммунальных отходов является опасность потери устойчивости откосов. Оценить эту опасность можно методами, которые применяются для расчётов грунтовых сооружений.

Сложность выполнения расчётов устойчивости откосов полигонов твёрдых коммунальных отходов заключается в неопределённости свойств слагающего их материала. Для назначения физико-механических свойств твёрдых коммунальных отходов был выполнен анализ исследований, описанных в зарубежных публикациях. По результатам анализа были назначены расчётные значения прочностных свойств материала полигона: угол внутреннего трения 26° , сцепление 20 кПа.

Расчётная оценка устойчивости откоса выполнялась на примере реального полигона твёрдых коммунальных отходов, в котором отходы складированы на высоту 77 м. Особенностью полигона является то, что он расположен под уклоном в скальном ущелье, в которое возможен приток поверхностных и грунтовых вод. Расчёты устойчивости откосов выполнялись с помощью программного комплекса PLAXIS 2D на основе решения задачи о напряжённо-деформированном состоянии. Расчёты проводились для широкого диапазона

плотности твёрдых коммунальных отходов и нескольких расчётных случаев положения депрессионной кривой.

Расчёты показали, что откосы рассмотренного полигона обладают достаточным запасом устойчивости благодаря пологому уклону (1:3,28). Наибольшее влияние на устойчивость откоса оказывает уровень грунтовых вод в сооружении, минимальный запас устойчивости наблюдается при самом высоком уровне воды из возможных. Плотность отходов не оказывает большого влияния на устойчивость, что связано с наличием в сооружении упорной дамбы, выполненной из щебенистого грунта с суглинистым заполнителем.

Ключевые слова: твёрдые коммунальные отходы; полигон отходов (свалка); устойчивость откосов; плотность; сопротивление сдвигу; численное моделирование; коэффициент устойчивости

Введение

Актуальность темы безопасности полигонов твёрдых коммунальных отходов (ТКО) не подлежит сомнению. Ежегодно миллиарды тонн коммунальных отходов складированы на полигонах [1]. Десятки ранее активно использовавшихся полигонов ТКО расположены на территории Москвы и Московской области.

В соответствии с СП 320.1325800.2017 «Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация» полигон твёрдых коммунальных отходов определяется как «специально оборудованное сооружение, предназначенное для размещения отходов и включающее объекты хранения отходов и объекты захоронения отходов». Многие из полигонов представляют собой внушительные сооружения большой высоты. Например, высота насыпи полигона «Кучино» после рекультивации достигает 70 м.

Захоронение отходов на полигонах по СП осуществляется путём послойного чередования ТКО и грунтов (а также других инертных материалов), поэтому полигоны схожи по устройству и принципам работы с грунтовыми сооружениями. Большинство полигонов представляют собой насыпь с откосами.

Однако полигоны ТКО как сооружения имеют свои особенности. Они связаны с тем, что в теле полигона активно происходят деструктивные процессы, процессы разложения органических и минеральных веществ, которые составляют отходы. Проникновение в тело насыпи воды приводит к образованию фильтрата, водного раствора полуразложившихся органических и минеральных веществ. Этот фильтрат выносит продукты разложения за пределы насыпи, в дренажные сооружения. Поэтому свойства материала полигона постоянно изменяются, изменяется и геометрия самой насыпи.

Как и для всех насыпей, для полигонов ТКО характерна опасность потери устойчивости. В мировой практике известны десятки случаев потери устойчивости насыпей полигонов ТКО: например, на полигонах Maine (США, 1989), Payatas (Филиппины, 2000), Cincinnati (США, 1996) [2]. 20 октября 2022 г. произошло обрушение откоса на полигоне ТКО в г. Гатчина.

Однако вопрос об устойчивости насыпей полигонов мало изучен в России. Мы не нашли в научно-технических журналах ни одной отечественной публикации, посвящённой этой теме. Информация есть только в монографии [3]. Однако публикации на эту тему есть зарубежом [2; 4–8]. Эти публикации посвящены исследованиям устойчивости откосов полигонов в разных странах мира.

Расчёты устойчивости откосов выполнялись как инженерными методами, так и с помощью численного моделирования. Например, в публикации [2] выполнен анализ причин

потери устойчивости полигона ТКО в США путём применения численного моделирования в пространственной постановке. В работе [5] исследована устойчивость откосов биореакторного полигона, в котором процессы разложения отходов искусственно интенсифицированы. В [9] выполнялись исследования по оценке влияния на коэффициент устойчивости откоса полигона свойств ТКО (плотности, угла внутреннего трения и сцепления). Авторы [4] в результате исследований выделили несколько наиболее значимых для обеспечения устойчивости полигона ТКО факторов: сдвиговая прочность ТКО, высота и угол откоса наклона полигона, положение депрессионной поверхности.

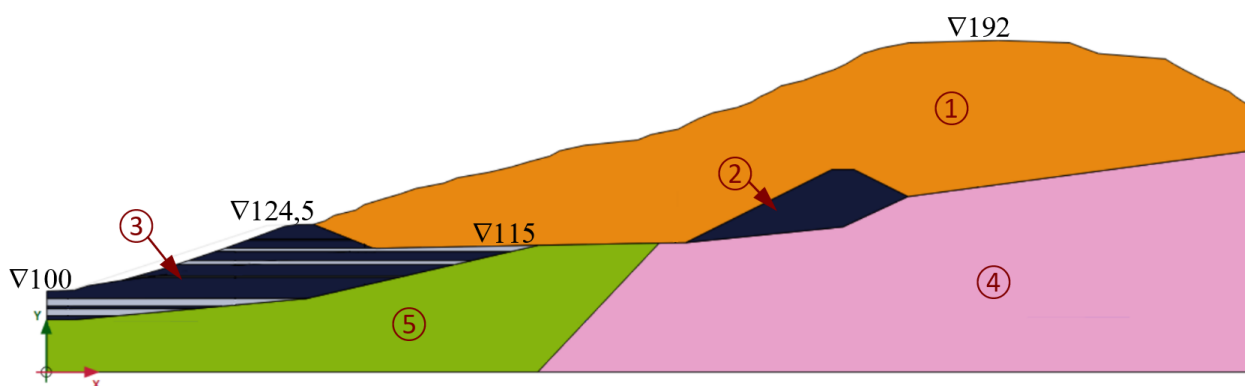
Целью этого исследования является выявление на примере конкретного полигона факторов, которые оказывают наибольшее влияние на обеспечение его устойчивости. Это позволит лучше понимать работу сооружения и принимать обоснованные инженерные решения при проектировании эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО.

Однако для достижения поставленной цели необходимо предварительно решить и другие важные задачи. Сложность расчётного обоснования устойчивости откоса полигона ТКО состоит в неопределённости физико-механических свойств слагающего материала и действующих на него нагрузок.

Материалы и методы

Расчёты устойчивости откосов полигона ТКО были выполнены путём численного моделирования методом редукции показателей сдвиговой прочности. Все расчёты выполнялись методом конечных элементов с помощью программного комплекса PLAXIS 2D. Методика расчёта базируется на определении напряжённо-деформированного состояния (НДС) сооружения. Сначала моделируется формирование НДС сооружения от действующих нагрузок при реальных прочностных показателях материалов. Затем, путём постепенного снижения показателей прочности сооружение доводится до разрушения. Коэффициент устойчивости определяется как отношение исходных показателей прочности к тем, которые привели к потере несущей способности сооружения.

Расчёты проводились на примере сооружения, схема поперечного сечения которого показана на рисунке 1. Сооружение относится к овражно-балочному типу и располагается в наклонном скальном ущелье. Поверхность подошвы сооружения имеет большой уклон в сторону низового откоса. Максимальная высота насыпи отходов составляет 77 м, но общая высота насыпи достигает 112 м. Средний уклон низового откоса составляет 1:3,28.



1 — насыпь твердых коммунальных отходов; 2 — внутренняя дамба; 3 — низовая дамба; 4 — песчаник основания; 5 — алевролит основания

Рисунок 1. Схема устройства рассматриваемого полигона твердых коммунальных отходов (составлено авторами)

Из-за наклона дна ущелья ёмкость полигона была образована двумя упорными грунтовыми дамбами (внутренней и низовой). Каждая из дамб сложена щебенистым грунтом с суглинистым заполнителем. Основание сооружения сложено алевритом и песчаником.

Учитывая расположение полигона в балке временного водотока, в неё возможен приток поверхностных и грунтовых вод. Во избежание водонасыщения мусора вокруг полигона выполняется дренаж, а для предотвращения проникновения в полигон его подошва гидроизолируется. Однако эти мероприятия не исключают полностью проникновения воды, при сильных ливнях в теле полигона возможен существенный подъём уровня грунтовых вод, это зафиксировано натурными измерениями. При расчётах устойчивости рассматривались несколько расчётных случаев действия нагрузок:

№ 1 — полигон полностью сухой;

№ 2 — в насыпи полигона установился средний уровень грунтовых вод;

№ 3 — в насыпи полигона установился высокий уровень грунтовых вод.

Для выполнения расчётов сооружения была составлена его конечно-элементная модель. Она включает 8 919 треугольных конечных элемента с квадратичной аппроксимацией перемещений, элементы соединены 71 695 узлами.

Для выполнения расчётов необходимо знать комплекс физико-механических свойств материала насыпи: плотность в сухом и водонасыщенном состоянии, показатели сдвиговой прочности и показатели деформируемости. При расчётах использовалась модель Кулон-Мора. В ней деформируемость материала выражается модулем линейной деформации E и коэффициентом Пуассона ν . Показателями сдвиговой прочности являются угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c .

Чтобы назначить расчётные значения физико-механических свойств материала полигона, нами был выполнен анализ зарубежной научно-технической литературы.

Результаты

Назначение физико-механических свойств материала полигона

Материал полигона представляет смесь грунта, органических и неорганических отходов. Эта смесь крайне разнородна по своему составу, поэтому свойства материала полигона могут изменяться в широких пределах.

Нами был выполнен поиск и анализ информации о плотности сложения и прочностных свойствах материала полигона.

Плотность ТКО может изменяться в широких пределах. Согласно российским нормам (СП 320.1325800.2017), плотность ТКО при укладке в сооружение должна составлять: не менее 650–800 кг/м³ при уплотнении бульдозером и 900–1 100 кг/м³ при уплотнении компрессором. Однако эти значения соответствуют минимальным, со временем происходит уплотнение ТКО и увеличение их плотности, о чём свидетельствуют опубликованные результаты экспериментов.

Обобщению информации о плотности мусора посвящена публикация [10]. По результатам экспериментов удельный вес отходов составляет от 5 до 17 кН/м³. При этом с глубиной удельный вес ТКО увеличивается за счёт уплотнения под действием веса вышележащих слоёв. В [11] рекомендуется принимать примерно следующие значения удельного веса: на поверхности 7 кН/м³, на глубине 20 м — 10 кН/м³, на глубине более 20 м — 12–13 кН/м³. В [10] отмечается, что эти рекомендованные значения близки к минимальным.

Как видим, плотность ТКО может принимать различные значения. Поэтому нами было принято решение выполнять расчёты устойчивости откоса полигона для широкого диапазона значений плотности ТКО. Были рассмотрены три варианта плотности в сухом состоянии: 0,52; 0,80; 1,20 т/м³.

Для назначения показателей сдвиговой прочности ТКО был выполнен анализ большого количества публикаций, посвящённых экспериментальным и расчётным исследованиям.

Экспериментальные исследования прочностных свойств складываемых отходов выполнялись с конца XX в. Информацию об исследованиях XX в. можно получить в [11]. Эмпирическим путём было установлено, что поведение мусорных отходов при сдвиге подобно поведению грунтов — мусор обладает сцеплением, а его сопротивление сдвигу увеличивается с ростом нормальных напряжений.

Для нас наибольший интерес представляют исследования, выполненные в XXI в., т. к. в современный период произошли существенные изменения в составе ТКО — возросло содержание пластика. В XXI в. исследованиями механических свойств мусорных отходов занимались несколько групп авторов.

Бразильские исследователи О.М. Vilar, М. F. Carvalho и др. опубликовали результаты своих исследований в [12; 13]. Испытания ТКО проводились в приборах трёхосного сжатия диаметром 150 или 200 мм, высотой 300 или 400 мм. Испытывали материал, который хранился на полигоне в течение 15 лет. В его составе 35 % занимают сухие отходы и камни, а 65 % — паста из золы и органических отходов [12]. Крупность частиц грунта достигала 100 мм. Отходы подвергались давлению обжатия 100, 200, 400 кПа.

Под действием нагрузок мусорные отходы получали значительные деформации уплотнения. До испытаний удельный вес мусора в сухом состоянии составлял от 4,9 до 8,6 кН/м³, после испытаний — от 9,7 до 12,4 кН/м³.

Было установлено, что деформативные и прочностные свойства материала полигона сильно зависят от содержания пластика. По результатам испытаний угол внутреннего трения составил 17–21°, удельное сцепление 30–90 кПа.

Исследователи из Мичиганского университета [14; 15] выполняли испытания ТКО полигона, расположенного в Калифорнии (США). На крупноразмерных приборах разного типа было выполнено большое количество сдвиговых испытаний. По результатам испытаний были рекомендованы следующие прочностные показатели при давлении 100 кПа (1 атмосфера): $\varphi = 36^\circ$, $c = 15$ кПа. При этом было показано, что угол внутреннего трения уменьшается при с ростом нормального напряжения.

В более поздних исследованиях свойства ТКО были изучены на приборах трёхосного сжатия диаметром 300 мм и высотой 600–630 мм [16]. Исследования показали, что свойства ТКО сильно зависят от наличия волокнистых отходов (пластика, текстиля, бумаги). Авторы [16] рекомендовали принимать угол внутреннего трения ТКО от 34° до 44° при нулевом сцеплении.

Публикации исследователей из Чикагского университета [17; 18] посвящены изучению геотехнических свойств материала биореакторного полигона. Показано, что в таких полигонах при деградации отходов происходит уменьшение их сдвиговой прочности.

Комплексные исследования физико-механических свойств мусорных отходов полигона Laogang проводили китайские исследователи [19]. Исследуемый мусор при укладке содержал 22 % органических отходов и 19 % пластика. Плотность мусора в сухом состоянии при отсыпке составила 7,2–7,5 кН/м³, а по прошествии 4 лет увеличилась до 10,5–12,5 кН/м³.

Исследованиями проницаемости мусора была установлена зависимость коэффициента от его плотности. Для уложенных отходов коэффициент фильтрации составил от $5 \cdot 10^{-5}$ до $7 \cdot 10^{-3}$ см/с.

Испытания на сдвиговом приборе позволили установить эффект изменения прочностных показателей ТКО в зависимости от глубины залегания. Для глубины 4 м было рекомендовано принимать $\varphi = 15,7^\circ$, $c = 29,1$ кПа, для глубины 16 м — $\varphi = 21,9^\circ$, $c = 18,3$ кПа [19].

Анализ публикаций показал, что прочностные показатели материала полигона могут находиться в широком диапазоне значений, а их сопротивление сдвигу носит сложный характер. По этой причине, как указано в [13], М. Manassero с соавторами предложили описывать сопротивление мусорных отходов сдвигу отдельно для трёх интервалов значений нормальных напряжений σ . При малых напряжениях $\sigma < 20$ кПа рекомендуется принимать, что мусор обладает только сцеплением ($c \approx 20$ кПа). При напряжениях $\sigma = 20 \div 60$ кПа рекомендуется принимать, что мусор обладает только трением, при чём $\varphi \approx 38^\circ$. При более высоких напряжениях $\sigma > 60$ кПа рекомендуется принимать $\varphi \approx 30^\circ$, $c \geq 20$ кПа. Однако реализовать такую модель в рамках современных программных комплексов затруднительно, поэтому нами было принято решение принимать обобщённые значения в рамках модели Кулона-Мора.

Результаты обзора значений показателей прочностных свойств материалов полигонов по модели Кулона-Мора сведены нами в таблице 1.

Таблица 1

Показатели сопротивления сдвигу твёрдых коммунальных отходов по данным публикаций

Источник информации	Угол внутреннего трения	Сцепление, кПа
[12]	14–26°	30–90
[15]	36°	15
[19]	15,7–21,9°	18,3–29,1

Кроме того, нами был выполнен анализ расчётных значений физико-механических свойств ТКО, которые были приняты разными исследователями при выполнении расчётов устойчивости полигонов. Эти значения собраны в таблице 2.

Таблица 2

Расчётные значения физико-механических свойств твёрдых коммунальных отходов по данным публикаций

Источник информации	Плотность в сухом состоянии, т/м ³	Угол внутреннего трения	Сцепление, кПа	Метод расчёта устойчивости
[20]	1,12	29°	0	инженерный
[2]	1,04	35°	40	численный
[4]	0,52–0,75	10–30°	0–20	численный
[6]	0,9	20°	25	инженерный
[9]	0,9	15°	10	численный
[7]	1,0	15°	25	инженерный
[8]	1,1	25°	5	инженерный

Как видим из табл. 2, угол внутреннего трения принимают в пределах 10–35°, а удельное сцепление от 0 до 40 кПа. Поэтому нами были приняты некоторые усреднённые значения. Выбранные расчётные физико-механические свойства сооружения представлены в таблице 3.

Таблица 3

Расчётные значения физико-механических свойств сооружения

Наименование материала	Плотность, т/м ³		φ	с, кПа	E, МПа	ν
	ρ _d	ρ _{sat}				
Материал полигона (вариант 1)	0,52	1,30	26°	20	10	0,35
Материал полигона (вариант 2)	0,80	1,50	26°	20	10	0,35
Материал полигона (вариант 3)	1,20	1,75	26°	20	10	0,35
Грунт № 1 дамбы	2,00	2,25	34°	19	43,6	0,3
Грунт № 2 дамбы	2,07	2,30	20°	5	17,2	0,3

Условные обозначения: ρ_d — плотность в сухом состоянии; ρ_{sat} — плотность при водонасыщении; с — удельное сцепление; φ — угол внутреннего трения; E — модуль линейной деформации; ν — коэффициент Пуассона. Составлено авторами

Результаты расчёта устойчивости откосов

Всего были выполнены 9 расчётов устойчивости откоса полигона. Для каждого из трёх расчётных случаев (с разным положением уровня грунтовых вод) выполнялись три расчёта при разной плотности ТКО.

Результаты расчёта устойчивости откосов представлены на рисунках 2–10 в виде положения массива обрушения, который выделен тёплыми цветами. Цвет (красный, оранжевый, жёлтый) выражает интенсивность смещений массива при обрушении. Применение численного моделирования позволило получать сложные по форме поверхности скольжения. В таблице 4 представлены полученные значения коэффициентов устойчивости.

Расчёты показали, что наиболее уязвимым элементом сооружения является низовая упорная дамба. Даже если полигон полностью сухой (расчётный случай 1) обрушение дамбы более вероятно, расчётный массив обрушения затрагивает только дамбу (рис. 2, 3). Только при большом удельном весе отходов в движение может прийти и насыпь полигона (рис. 4). Коэффициенты устойчивости большие (около 1,9, см. табл. 4), поэтому устойчивость полигона в этом расчётном случае обеспечена с большим запасом.

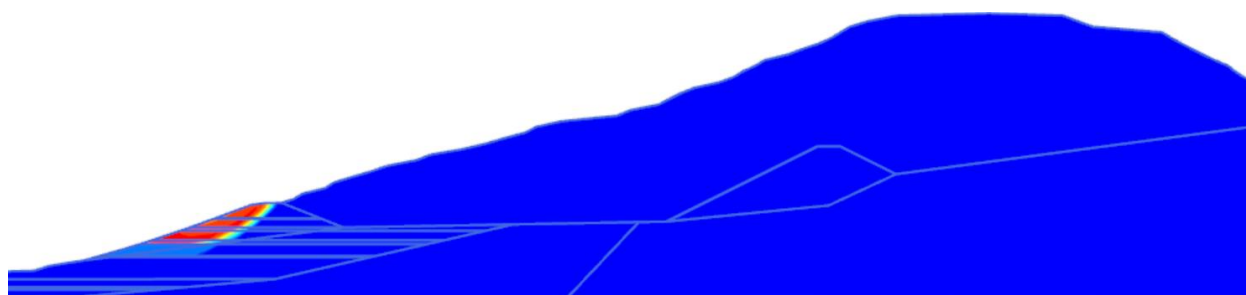


Рисунок 2. Положение массива обрушения для расчётного случая 1 (сухой полигон) при плотности отходов ρ_d = 0,52 т/м³ (вариант № 1) (получено авторами)

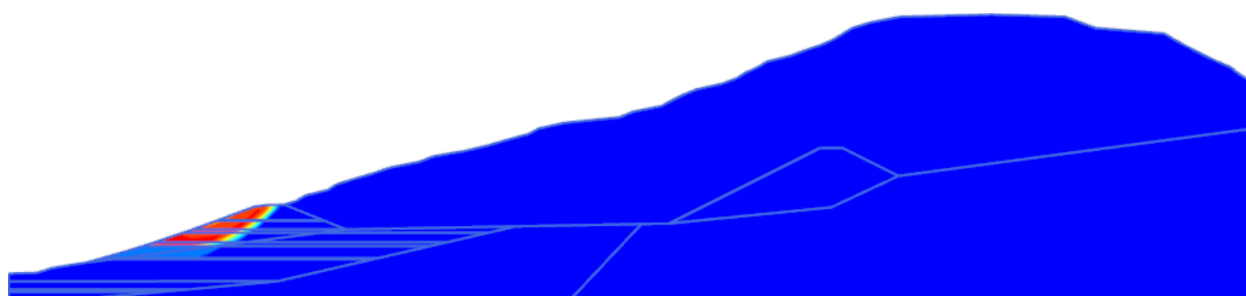


Рисунок 3. Положение массива обрушения для расчётного случая 1 (сухой полигон) плотности отходов ρ_d = 0,8 т/м³ (вариант № 2) (получено авторами)

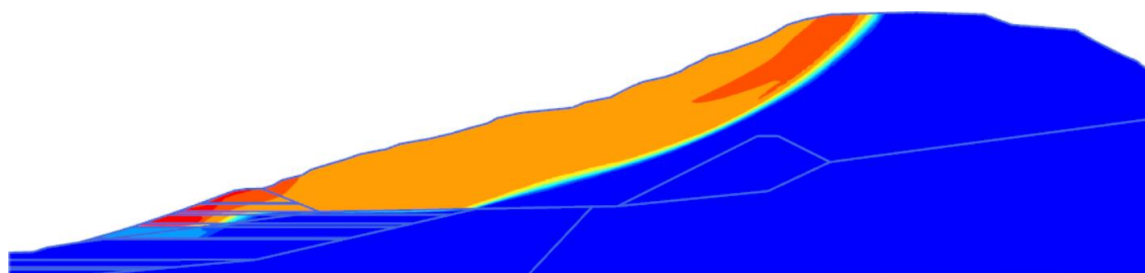


Рисунок 4. Положение массива обрушения для расчётного случая 1 (сухой полигон) при $\rho_d = 1,2 \text{ т/м}^3$ (вариант № 3) (получено авторами)

Расчётный случай № 1 — наиболее благоприятный, он соответствует случаю полной гидроизоляции полигона. Однако в реальности полигон всегда будет содержать воду, так как он располагается в овраге, на пути временного водотока. Наиболее вероятным является расчётный случай № 2, при котором в полигоне устанавливается фильтрационный поток, направленный в сторону уклона местности. Депрессионная поверхность была принята по натурным данным, она не высачивается на низовой откос. В случае № 2 коэффициент устойчивости откоса меньше, чем в случае № 1.

Однако и в этом случае коэффициенты устойчивости велики (около 1,7–1,8). Было установлено, что его значение мало зависит от плотности мусора (табл. 4). При больших значениях плотности (варианты № 2, № 3) массив обрушения затрагивает не только упорную дамбу, но и массив ТКО (рис. 5–7). В массиве ТКО поверхность скольжения — криволинейная.

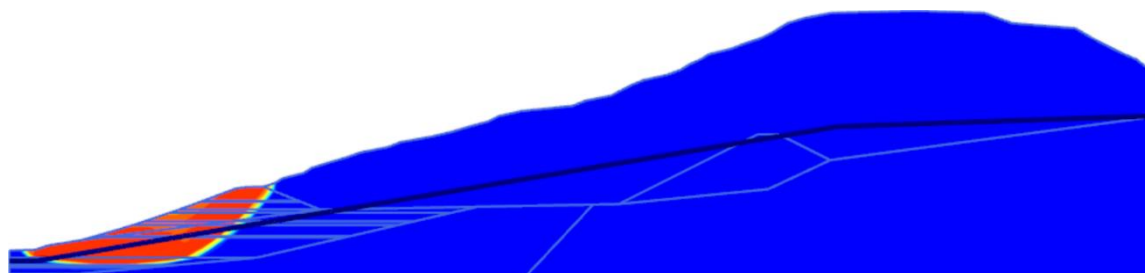


Рисунок 5. Положение массива обрушения для расчётного случая 2 при плотности отходов $\rho_d = 0,52 \text{ т/м}^3$ (вариант № 1) (получено авторами)

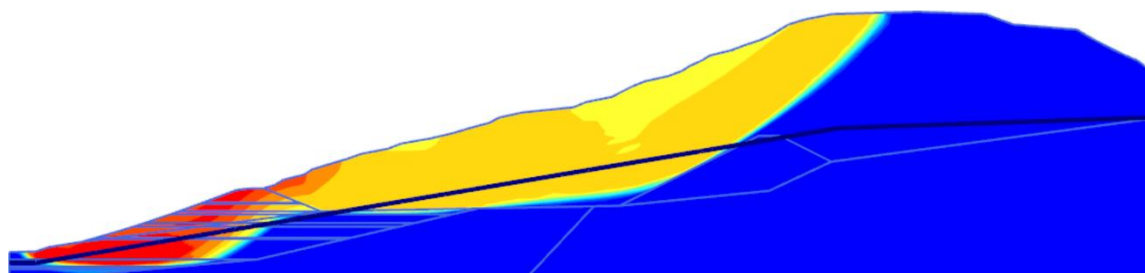


Рисунок 6. Положение массива обрушения для расчётного случая 2 при плотности отходов $\rho_d = 0,8 \text{ т/м}^3$ (вариант № 2) (получено авторами)

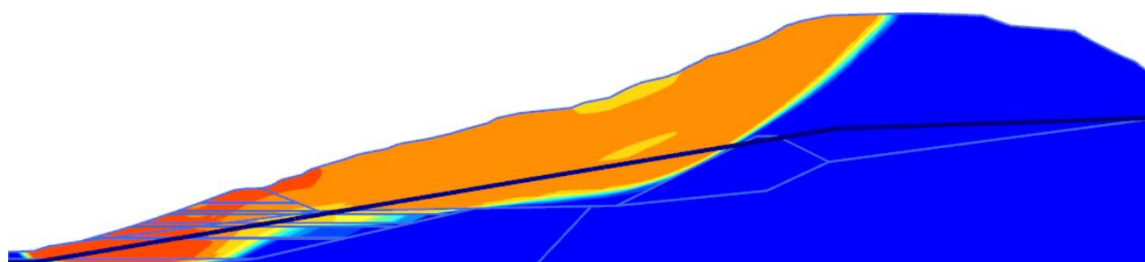


Рисунок 7. Положение массива обрушения для расчётного случая 2 при $\rho_d = 1,2 \text{ т/м}^3$ (вариант № 3) (получено авторами)

Самым опасным расчётным случаем является случай № 3, в котором положение депрессионной кривой максимально высокое из возможных. В этом случае за счёт взвешивающего действия воды силы трения резко уменьшаются, соответственно снижается запас устойчивости. Массив обрушения охватывает большую часть ТКО и упорной дамбы (рис. 8–10). Коэффициенты устойчивости составляют 1,25–1,34 в зависимости от плотности ТКО (табл. 4). Чем меньше плотность ТКО, тем ниже коэффициент устойчивости.

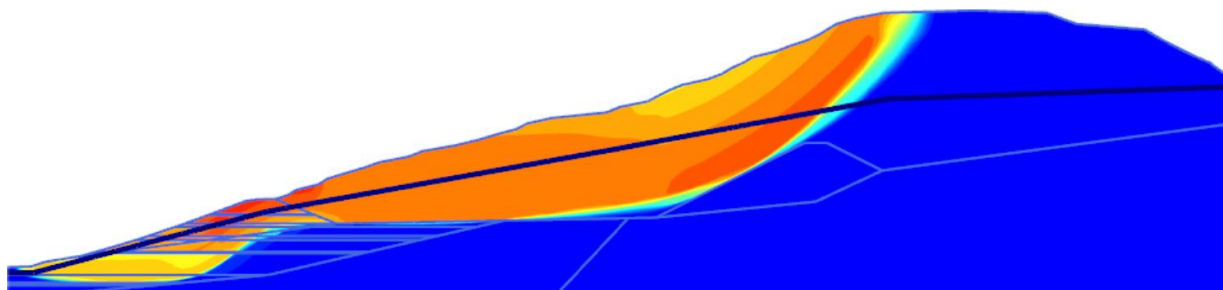


Рисунок 8. Положение массива обрушения для расчётного случая 3 при плотности отходов $\rho_d = 0,52 \text{ т/м}^3$ (вариант № 1) (получено авторами)

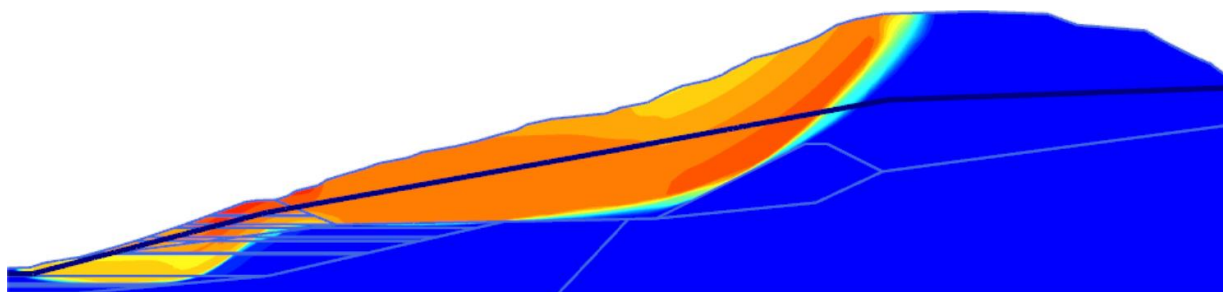


Рисунок 9. Положение массива обрушения для расчётного случая 3 при плотности отходов $\rho_d = 0,8 \text{ т/м}^3$ (вариант № 2) (получено авторами)

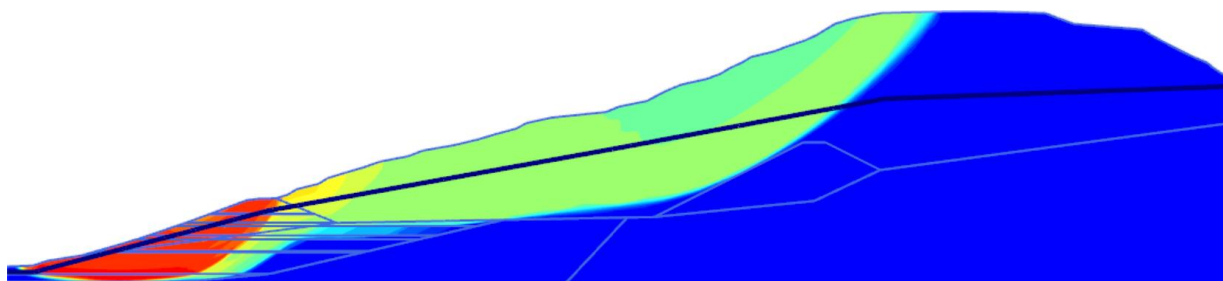


Рисунок 10. Положение массива обрушения для расчётного случая 3 при плотности отходов $\rho_d = 1,2 \text{ т/м}^3$ (вариант № 3) (получено авторами)

Таблица 4

Значения коэффициента устойчивости откоса для различных вариантов

Расчётный случай	Коэффициент устойчивости откоса при сухой плотности отходов		
	0,52	0,80	1,20
№ 1 — полигон без фильтрата	1,92	1,92	1,87
№ 2 — низкое положение депрессионной кривой	1,76	1,78	1,73
№ 3 — высокое положение депрессионной кривой	1,25	1,30	1,34

Как ясно из таблицы 4, плотность ТКО не оказала существенного влияния на устойчивость откоса полигона ТКО. Это входит в противоречие с результатами исследований, описанных в [9]. Однако это различие объясняется различием в конструкции рассматриваемых сооружений. В нашем случае устойчивость сооружения в большей степени определяется

несущей способностью упорной дамбы, в которой имеются слои с пониженной сдвиговой прочностью.

При оценке устойчивости сооружения по результатам расчётов также имеется некоторая сложность. Это связано с тем, что в России отсутствует отдельный нормативный документ, который бы регламентировал требования к устойчивости полигонов ТКО. Мы исходили из того, что упорную дамбу можно классифицировать как противооползневой сооружение. В этом случае к ней применяются требования СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения». В этом документе для сооружений уровня ответственности 1а коэффициент надёжности установлен равным 1,20. Кроме того, дополнительно может быть применён коэффициент условий работы, который повышает нормативный запас ещё на треть. Если принять нормативный коэффициент устойчивости равным 1,20, то устойчивость сооружения можно считать обеспеченной в любом из рассмотренных случаев.

Заключение

1. Рассмотренный полигон твёрдых коммунальных отходов обладает достаточным запасом устойчивости, коэффициент устойчивости выше нормативного. Высокий запас устойчивости объясняется пологостью его откоса (заложение 3,28).
2. Наибольшее влияние на устойчивость откоса рассматриваемого полигона оказывает уровень грунтовых вод в сооружении. При самом высоком уровне воды из возможных запас устойчивости откоса резко снижается и приближается к нормативному. Для обеспечения устойчивости откоса необходимо не допускать высокого подъёма уровня грунтовых вод. С этой целью необходимо дренажных сооружений достаточной пропускной способности.
3. Плотность отходов в рассмотренном сооружении не оказывает большого влияния на его устойчивость. Это связано с тем, что в составе сооружения имеется упорная дамба из глинистого грунта, которая и определяет устойчивость всего сооружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шилкина С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». — 2020. — № 1. — URL: <https://resources.today/PDF/05ECOR120.pdf> (доступ свободный). DOI: 10.15862/05ECOR120 (дата обращения 19.08.2024)
2. Chugh A.K., Reanalysis of a municipal landfill slope failure near Cincinnati, Ohio, USA. / A.K. Chugh, T.D. Stark, K.A. DeJong // Canadian Geotechnical Journal. — 2007. — № 44. — С. 33–53. DOI: 10.1139/T06-089.
3. Управление отходами. Полигонные технологии захоронения твердых бытовых отходов. Рекультивация и постэксплуатационное обслуживание полигона: монография / Я.И. Вайсман [и др.]; под ред. Я.И. Вайсмана. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. — 244 с.
4. Fang R. Analysis of Stability and Control in Landfill Sites Expansion. R. Fang, Z. Guo, T. Feng // Procedia Engineering. — 2011. — № 24. — С. 667–671. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2715.

5. Ismail S. Slope Stability of Landfill with Waste Degradation / S. Ismail, A. Mohd Taib, N.A. Rahman, D. Zulaika, A. Hasbollah, A. Bukhari Ramli // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 393–398. DOI: 10.35940/ijitee.A4148.119119.
6. Koda E. Landfill slope stability improvement incorporating reinforcements in reclamation process applying observational method / E. Koda, A. Kiersnowska, J. Kawalec, P. Osinski // Applied Sciences. 2020 — № 10. — С. 1572. DOI: 10.3390/app10051572.
7. Zondo S. Review of the waste slope stability design of a landfill site in Gauteng // E3S Web of Conferences. — 2023. — 368, 02004. DOI: 10.1051/e3sconf/202336802004.
8. Chropeňová D. Stability analysis of waste landfills on potentially unstable territory / D. Chropeňová, I. Slávik, L. Hruštinec // Civil and Environmental Engineering. — 2024. — Т. 20, № 1. — С. 283–292. DOI: 10.2478/cee-2024-0022.
9. Keskin M.S. Stability of MSW Landfill Slopes Reinforced with Geogrids / M.S. Keskin, S. Kezer // Applied Sciences. — 2022. — № 12. — 11866. DOI: 10.3390/app122211866.
10. Zekkos D. Unit Weight of Municipal Solid Waste / D. Zekkos, J.D. Bray, E. Kavazanjian, N. Matasovic, E.M. Rathje, M.F. Riemer, K.H. Stokoe II // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — 2006. — Т. 132, № 10. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:10(1250).
11. Kavazanjian E. Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis / E. Kavazanjian, N. Matasovic, R. Bonaparte, G.R. Schmertman // Geoenvironmental 2000, Geotechnical Special Publication. — 1995. — Т. 2, № 46. — С. 1126–1142.
12. Machado S.L. Constitutive Model for Municipal Solid Waste S.L. Machado, M.F. Carvalho, O.M. Vilar // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. — 2002. — № 11. — С. 940–951. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:11(940).
13. Vilar O.M. Mechanical Properties of Municipal Solid Waste / O.M. Vilar, M.F. Carvalho // Journal of Testing and Evaluation. — 2004. — Т. 32, № 6. — JTE11945.
14. Bray J.D. Shear Strength of Municipal Solid Waste / J.D. Bray, D. Zekkos, E. Kavazanjian, G.A. Athanasopoulos, M.F. Riemer // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. — 2009. — Т. 135, № 6. С. 709–722. DOI: 10.1061/ASCEGT.1943-5606.0000063.
15. Zekkos D. Large-scale direct shear testing of municipal solid waste / D. Zekkos, G.A. Athanasopoulos, J.D. Bray, A. Grizi, A. Theodoratos // Waste Management. — 2010. — № 30. — С. 1544–1555. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.01.024.
16. Zekkos D. Drained response of municipal solid waste in large-scale triaxial shear testing / D. Zekkos, J.D. Bray, M.F. Riemer // Waste Management. — 2012. — № 32. — С. 1873–1885. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.05.004.
17. Reddy K.R. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation / K.R. Reddy, H. Hettiarachchi, J. Gangathulasi, J.E. Bogner // Waste Management. — 2011. — Т. 31, № 11 — С. 2275–2286. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.06.002.

18. Reddy K.R. Effects of Degradation on Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste from Orchard Hills Landfill, USA / K.R. Reddy, H. Hettiarachchi, R.K. Giri, J. Gangathulasi // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. — 2015. — Т. 1, № 3. — С. 1–14. DOI: 10.1007/s40891-015-0026-2.
19. Feng S.J. Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China / S.J. Feng, K.W. Gao, Y.X. Chen, Y. Li, L.M. Zhang, H.X. Chen // Waste Management. — 2017. — № 63. — С. 354–365. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.016.
20. Chopra M., Reinhart D., Vajirkar M., Koodhathinkal B. Stability of slopes of municipal solid waste landfills with co-disposal of biosolids. WIT Transactions on Ecology and the Environment. Geo-Environment and Landscape Evolution II. — 2006. — Т. 89. — С. 215–222. DOI: 10.2495/GEO060221.

Kotov Filipp Viktorovich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
E-mail: KotovFV@mgsu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=675643

Sainov Mikhail Petrovich

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
E-mail: SainovMP@mpei.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-3164>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506150284>

Assessment of slope stability of municipal solid waste landfill slope at partial water saturation

Abstract. One of the problems in operation and recultivation of municipal solid waste landfills is the danger of slope stability loss. This danger may be estimated by the methods used for designing embankment structures.

The complexity of landfill slope stability analysis is in uncertainty of properties of the material composing it. The studies described in foreign publications were analyzed for assigning physical-mechanical properties of solid waste. By the results of analysis there were assigned design values of strength properties of the landfill: angle of internal friction 26° , cohesion 20 kPa.

Design assessment slope stability was made on the example of the existing landfill, where wastes were stored for the height of 77 m. The specific feature of the landfill is the fact that it is located downhill in rock canyon, where inflow of surface and ground water is probable. Slope stability analyses were carried out with the aid of the software package PLAXIS 2D based on solving the problem of stress-strain state. Analyses are conducted for a wide range of solid waste density and several design cases of depression curve position.

Analyses showed that the slopes of the considered landfill have sufficient stability factor due to the flat slope (1:3,28). The greatest effect on the slope stability is caused by the groundwater level in the structure; minimum stability factor is observed at the highest possible ground water level. Density of wastes does not greatly affect stability, which is related to presence in the structure of the retaining dike built of crushed stone with loam fill.

Keywords: municipal solid waste; landfill; slope stability; density; shear strength; numerical analysis; safety factor