ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(1):47-65
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.12 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_47

ВЛИЯНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТВАЛОВ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ ОСНОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (ГЕОМЕМБРАН)

Н.А. Кутепова[1], Ю.И. Кутепов[1], А.Д. Васильева[1], Ю.Ю. Кутепов[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vasileva_ad@pers.spmi.ru

Аннотация: В соответствии с требованиями строительных правил в области проектирования объектов размещения отходов производства (СП 127.13330.2023) отвалы вскрышных пород и других твердых отходов при наличии угрозы загрязнения подземных и поверхностных вод должны быть изолированы от породных массивов посредством противофильтрационных экранов. Использование полимерных изолирующих материалов в основании отвалов предопределяет необходимость постановки специальных исследований, моделирующих работу этих материалов в контакте с породным массивом. Представлены результаты изучения контактных взаимодействий двух видов грунтов с геомембранами HDPE (ПНД) с различными типами поверхности (гладкая, текстурированная и с прикатанным геотекстилем). Испытания проведены по стандарту ISO 12957-1:2018 «Geosynthetics – Determination of friction characteristics – Part 1: Direct shear test» методом прямого сдвига в приборе с большой площадью среза (500 см^2). Параметры сопротивления сдвигу контакта «грунт / геомембрана» зависят от шероховатости поверхности геосинтетического материала, но в любом случает ниже, чем у чистого грунта. Геомеханическими расчетами показано, что гидроизоляция в основании отвалов с использованием геосинтетических материалов снижает устойчивость откосов сооружений за счет появления искусственного ослабленного контакта при отсыпке пород на прочное основание и формирования избыточного порового давления в водонасыщенных отложениях при отсыпке на слабое основание.

Ключевые слова: отходы производств, отвалы, противофильтрационный экран, геосинтетические материалы, контакт «грунт / геомембрана», сдвиговые испытания, параметры сопротивления сдвигу, устойчивость отвалов, влияние геомембраны.

Для цитирования: *Кутепова Н. А., Кутепов Ю. И., Васильева А. Д., Кутепов Ю. Ю.* Влияние на устойчивость отвалов гидроизоляции основания с применением геосинтетических материалов (геомембран) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1. – С. 47–65. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_47.

Impact exerted on stability of dump bottoms by waterproofing using geosynthetic materials (geomembranes)

N.A. Kutepova[1], Yu.I. Kutepov[1], A.D. Vasilieva[1], Yu.Yu. Kutepov[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: vasileva_ad@pers.spmi.ru

© Н.А. Кутепова, Ю.И. Кутепов, А.Д. Васильева, Ю.Ю. Кутепов. 2025.

Abstract: In conformity with the construction regulations in the field of design of production waste facilities (SP 127.13330.2023), in case of risk of ground and surface water pollution, dumps of overburden rocks and other solid waste should be isolated from the subsoil by impervious screens. The use of polymeric sealing materials at the bottoms of dumps requires special research to be carried out to model interaction of these materials with rock masses. This article presents the studies into contact interaction between two types of soils and HDPE geomembranes with different surfaces (smooth, textured, geotextile). The testing followed standard ISO 12957-1:2018 Geosynthetics–Determination of Friction Characteristics–Part 1: Direct Shear Test, at a large area of shearing (500 cm^2). The shear resistance of the ground–geomembrane contact depends on the roughness of the geosynthetic material surface, but is at all accounts smaller than soil has. The geomechanical calculations show that waterproofing of dump bottoms using geosynthetic materials decreases stability of dump slopes since a weak contact is induced when rocks are dumped on a firm foundation and an excessive pore pressure forms in water-bearing rocks when dumped on a weak foundation.

Key words: production waste, dumps, impermeable screen, geosynthetic materials, ground–geomembrane contact, shear tests, shear resistance, dump stability, geomembrane influence.

For citation: Kutepova N. A., Kutepov Yu. I., Vasilieva A. D., Kutepov Yu. Yu. Impact exerted on stability of dump bottoms by waterproofing using geosynthetic materials (geomembranes). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(1):47-65. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_47.

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых, обогащение и переработка минерального сырья сопровождаются образованием большого количества твердых и жидких отходов, размещаемых на земной поверхности в специальных сооружениях. Несмотря на активное развитие исследований в области вторичного использования минеральных ресурсов и наличия положительного опыта их внедрения на практике, например, в дорожной [1] и строительной отраслях [2—4], для улучшения плодородия почв [5, 6], в качестве техногенных месторождений [7—8], востребованность отходов как полезного продукта весьма невелика, и основная их масса поступает на постоянное хранение в отвалы, гидроотвалы и хвостохранилища.

Долговременная эксплуатация объектов размещения отходов ведет к ухудшению экологической обстановки в районах их расположения, вызывая накопление токсичных элементов в почвах [9] и грунтах [10—11], атмосфере [12], речной системе [13], подземных водах [14]. Лидирующие позиции в части экологического ущерба элементам поверхностной и подземной гидросферы занимают объекты промышленной гидротехники [15—17]. Предотвращение утечек загрязненных вод из накопителей жидких промышленных отходов возможно за счет внедрения в их конструкции элементов из искусственных водонепроницаемых материалов. Соответствующие требования закреплены строительными правилами в области проектирования объектов размещения отходов производства (СП 127.13330.2023). Эффективность использования водонепроницаемых синтетических покрытий для экранирования ложа и откосов ограждающих дамб хвостохранилищ, а также гидротехнических сооружений водохозяйственного

назначения подтверждается многолетним опытом эксплуатации подобных объектов в зарубежной [18] и отечественной практике [19 — 21].

Ужесточение природоохранных требований в рамках общей государственной политики по снижению техногенно-загрязненных территорий распространяется также на объекты складирования сухих отходов, включая отвалы вскрышных пород, золоотвалы и шлакоотвалы ТЭЦ, мелоотвалы и др. В соответствии с п. 6.44 СП 127.13330.2023 основание отвалов должно быть подготовлено с соблюдением таких же защитных мер, как в отношении накопителей жидких отходов (п. 6.38). В случае распространения в пределах земельного участка подземных вод, незащищенных естественным геологическим барьером и имеющих гидравлическую связь с поверхностью земли, должны быть предусмотрены технические решения по гидроизоляции основания отвала. В качестве противофильтрационного экрана приоритет следует отдавать геосинтетическим материалам.

Проектирование отвалов осуществляется исходя из требований обеспечить максимальную вместимость объекта на площади задействованного земельного отвода, долговременную устойчивость его откосов, промышленную и экологическую безопасность отвальных работ. Обоснование оптимальных параметров сооружений, отвечающих указанным требованиям, базируется на результатах инженерно-геологических изысканий и многовариантных расчетах устойчивости [22 — 23], оценках геомеханического риска возникновения аварийных ситуаций [24, 25], разработках проектов мониторинга для контролирования основных показателей состояния сооружений в процессе последующей их эксплуатации [26].

Инженерные изыскания для разработки проектных решений строительства объектов размещения отходов, помимо изучения природных условий территории (физико-географических, инженерно-геологических, гидрогеологических и т.д.), должны включать специальные исследования по определению характеристик складируемых материалов. Производственные отходы, являясь техногенными минеральными образованиями, зачастую имеют весьма специфические свойства, не характерные для естественных грунтов аналогичного гранулометрического состава. К их числу относятся, например, отходы химических предприятий, флотационного обогащения углей и руд, продукты сжигания твердого топлива, которые по гранулометрическому составу соответствуют разновидностям дисперсных песчано-глинистых грунтов естественного генезиса, но по физико-механическим свойствам могут иметь существенные отличия [27]. Поэтому основные характеристики грунтов для расчетного обоснования безопасных параметров объектов складирования отходов должны определяться испытаниями непосредственно того материала, который будет поступать в отвал.

Использование в качестве конструктивного элемента в отвалах полимерных изолирующих покрытий (геомембран) предопределяет постановку исследований, наиболее точно моделирующих работу этих материалов в контакте с породным массивом, по результатам которых определяются прочностные характеристики, необходимые для геомеханических расчетов.

Материалы и методы

Исследования проведены на двух видах грунтовых материалов естественного и техногенного происхождения: обычном строительном песке и фосфогипсе — побочном продукте получения экстракционной фосфорной кислоты на химических производствах.

Таблица 1

Основные нормативные показатели для геомембран типа HDPE [составлено авторами]
The main normative indicators for HDPE type geomembranes [compiled by the authors]

Наименование показателя	Норма для типа	
	ПВД	ПНД
Прочность при разрыве, МПа, не менее	13,0	23,0
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	400	100
Плотность, кг/м^3	917 – 930	948 – 959
Прочность при сжатии, МПа	12	20 – 36
Модуль упругости при растяжении, МПа	–	–
Модуль упругости при изгибе, МПа	140 – 250	600 – 850
Твердость по Бринеллю, МПа	14 – 25	45 – 59
Температура морозостойкости, °С, не выше (образцы не имеют трещин при указанной температуре)	–70	–70
Температура эксплуатации, ° С	–60 +80	–60 +80
Водопоглощение за 24 ч при 20 °С, %, не более	0,01	0,01

Образцы грунтовых материалов предоставлены организациями, планирующими использовать гидроизолирующие покрытия в строительстве (песок) и при рекультивации отвалов фосфогипса. Рассматривалась возможность применения геомембраны HDPE, выпускаемой в двух модификациях ПНД (полиэтилен низкого давления) и ПВД (полиэтилен высокого давления).

Для испытаний использовалась геомембрана HDPE (ПНД), предназначенная для проведения гидроизоляционных работ разной степени сложности. Данная геомембрана представляет собой жесткий и прочный геосинтетический материал, паро- и влагонепроницаемый, устойчивый к агрессивным средам (pH от 2 до 12), маслам и другим химическим реагентам (табл. 1).

В зависимости от целевого назначения геомембрана выпускается с гладкой или тисненой (текстурированной) поверхностью, а также с прикатанным к ней геотекстилем (рис. 1). При испытаниях песков использовались все три типа мемб-

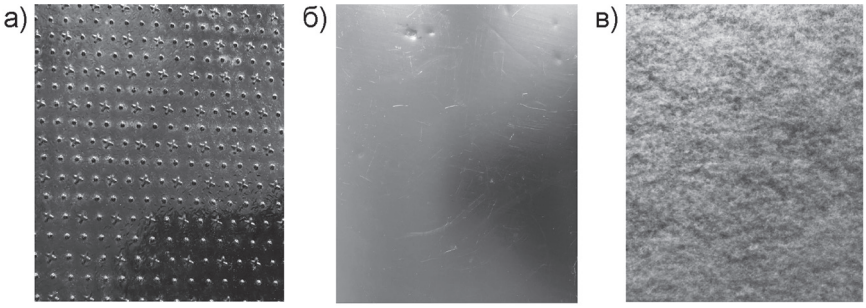

Рис. 1. Внешний вид геомембраны с текстурированной (а) и гладкой (б) и с прикатанным геотекстилем (в) [составлено авторами]

Fig. 1. Appearance of a geomembrane with textured (a) and smooth (b) and with rolled geotextile (v) [compiled by the authors]

ран, для фосфогипсов — гладкая и текстурированная.

В связи с отсутствием отечественной нормативной базы в области изучения геомембран, а также исследования контактных взаимодействий грунтов с геомембранами следует ориентироваться на зарубежные разработки в области исследований прочности [28] и проницаемости [29] геосинтетических материалов.

В качестве методической основы для исследований принят стандарт ISO 12957-1:2018 «Geosynthetics — Determination of friction characteristics — Part 1: Direct shear test», который регламентирует методику определения характеристик трения геосинтетических материалов по контакту со стандартным песком (по EN 196-1) и другими дисперсными грунтами. Испытания проводятся в устройстве прямого сдвига с использованием грунта с заданной плотностью и влажностью, при определенной нормальной нагрузке и постоянной скорости деформирования.

Стандарт ISO 12957-1:2018 устанавливает требования к размерам прибора: верхняя часть сдвигового устройства должна иметь внутренние размеры не менее 300×300 мм при ширине обеих частей не менее 50% от их длины. Ящик должен быть достаточно глубоким для размещения слоя грунта и системы нагружения или жесткой опоры, к которой должен быть прикреплен верхний геосинтетический слой. Поскольку на отечественном рынке серийно выпускаемые приборы такого размера отсутствуют, авторами был использован одноплоскостной сдвиговой прибор с площадью сдвига 500 см^2, изготовленный на опытно-экспериментальном заводе ВНИМИ для изучения крупнообломочных пород отвалов. Диаметр срезной камеры прибора составляет 250 мм, высота верхней и нижней кареток равняется также 250 мм, что достаточно близко соответствует требованиям стандарта ISO 12957-1:2018 и исключает возможный «масштабный эффект» ввиду незначительного различия размеров требуемой и использованной нами установок.

Стандарт ISO 12957-1:2018 также устанавливает требования к скорости сдвига в зависимости от водопроницаемости грунтов, определяемой по характеристике гранулометрического состава d_{10} — диаметр частиц, мельче которых в грунте содержится 10% (по массе). Испытания грунтов с низкой проницаемостью (d_{10} < 0,0075 мм) проводятся со скоростью от 1,0 до 0,005 мм/мин, что обеспечивает дренированное состояние

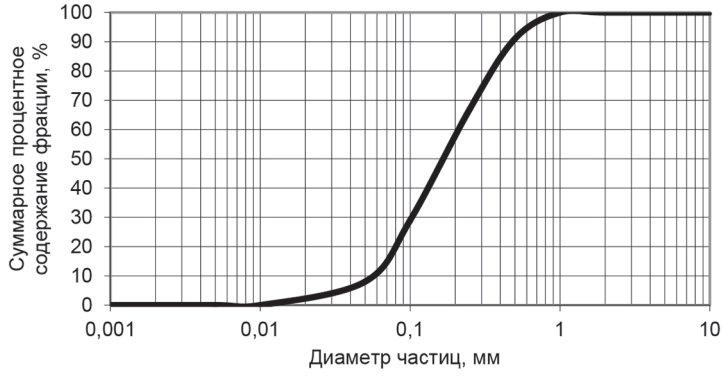

Рис. 2. Интегральная кривая гранулометрического состава песка [составлено авторами]
Fig. 2. The integral curve of the granulometric composition of sand [compiled by the authors]

материала при сдвиге. Для хорошо проницаемых дисперсных пород скорость испытаний может быть принята более 1 мм/мин.

В рамках подготовки к испытаниям пески высушивались до воздушно-сухого состояния и просеивались через сита для компоновки нужного соотношения гранулометрических фракций по ISO 12957-1:2018. Соответствующая гранулометрическому составу песка интегральная кривая приведена на рис. 2, из которого следует, что значению d_{10} соответствует размер фракции 0,06 мм. Исходя из этого, скорость сдвиговых испытаний принята 2 мм/мин, она соответствует схеме «быстрого сдвига» в отечественных нормативах, применяемой для схожих по составу песков.

Для испытаний фосфогипса использованы пробы полугидрата, взятые с технологической линии завода, а также образцы отложений, отобранные с поверхности отвала. При изучении состава полугидратного фосфогипса учитывались его специфические особенности, связанные с выраженной способностью к самоцементации [30]. Полугидратный фосфогипс ($CaSO_4 \times 0{,}5 \cdot H_2O$) является неустойчивой модификацией гипса, и сразу после своего образования вступает во взаимодействие с содержащейся в отходе свободной водой, трансформируясь в дигидрат сульфата кальция ($CaSO_4 \times 2 \cdot H_2O$). На выходе с конвейера полугидрат представляет собой дисперсную порошкообразную массу. По микроскопическим исследованиям масса состоит из кристаллов гипса игольчатой формы, соединенных в агрегаты размером 10 — 50 мкм. Со временем между агрегатами формируются жесткие кристаллизационно-цементационные связи, придающие полугидратному фосфогипсу монолитную и относительно прочную структуру.

Во избежание твердения фосфогипса определение его гранулометрического состава произведено в течение первых суток после поступления с завода в лабораторию. Для исследований использован ареометрический метод с добавлением диспергатора. По результатам анализа большую часть (более 80%) полугидратного фосфогипса на выходе с конвейера завода слагают частицы размером $0{,}25 < d \leqslant 0{,}01$ мм. Согласно инженерно-геологической классификации грунтов (ГОСТ 25100-2020), фосфогипс отнесен к супесям песчанистым. По кумулятивной кривой значению d_{10} соответствует размер фракции 0,011 мм (см. рис. 3), что позволяет отнести фосфогипс к хорошо проницаемым материа-

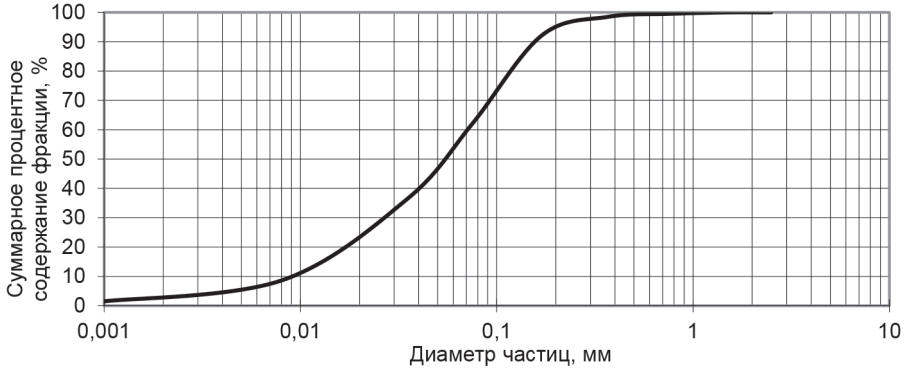

Рис. 3. Интегральная кривая гранулометрического состава фосфогипса [составлено авторами]
Fig. 3. Integral curve of the granulometric composition of phosphogypsum [compiled by the authors]

лам и провести испытания по схеме «быстрого сдвига».

Процедура сдвиговых испытаний в приборе с большой площадью среза состояла их двух этапов: на первом этапе опыты проводились без геомембраны для получения характеристик сопротивления сдвигу грунтов, на втором — определялись параметры контакта «геомембрана / грунт». При этом на втором этапе в нижнюю каретку закладывались жесткие подложки, соответствующие диаметру прибора, на которые укладывался образец геомембраны таким образом, чтобы обеспечить неподвижность материала и поместить контакт «геомембрана / грунт» в зону сдвига. Верхняя каретка заполнялась грунтом с заданной плотностью: для песка — 1,75 г/см^3, для фосфогипса — 1,60 г/см^3 (по плотности отложений в отвале). Зазор между верхней и нижней каретками составлял 2 мм. Испытания проводились при вертикальных нагрузках 50, 100 и 150 кПа (нагрузка 100 кПа повторялась дважды, согласно требованиям ISO 12957-1:2018) с определением касательных напряжений.

Таблица 2

Результаты сдвиговых испытаний песка с различными типами геомембран [составлено авторами]

The results of shear tests of sand with various types of geomembranes [compiled by the authors]

№ пробы	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.	Максимальные касательные напряжения, кПа	Средние максимальные касательные напряжения, кПа	Коэффициент трения f_g
Песок/песок					
1	8,1	37,6	118	120,8	–
2	2,7	38,7	121		
3	16,0	35,4	128		
4	8,3	36,5	116		
Контакт «песок / геомембрана с текстурированой поверхностью»					
5	7,8	31,0	95,0	99,8	0,83
6	6,8	32,2	100,0		
7	2,5	33,4	101,0		
8	10,8	31,8	103,0		
Контакт «песок / геомембрана с приклеенным текстилем»					
9	9,5	23,3	73	81,0	0,67
10	6,3	24,2	74		
11	11,8	25,6	86		
12	11,8	26,6	91		
Контакт «песок / геомембрана с гладкой поверхностью»					
13	3,8	22,3	68	67,3	0,56
14	11,3	18,3	65		
15	7,2	21,8	73		
16	7,8	20,3	63		

Камеральная обработка испытаний для построения паспортов прочности не отличается от отечественных требований. Расчет коэффициента трения $f_g(\sigma)$ согласно ISO 12957-1:2018 определяется как отношение максимальных касательных напряжений на контакте «геомембрана/песок» $\tau_{max}(\sigma)$ к максимальным касательным напряжениям в исходном грунте $\tau_{max,s}$ (σ). Для расчетов $f_g(\sigma)$ использовались средние значения максимальных касательных напряжений, определенные по результатам четырех аналогичных сдвигов.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты сдвиговых испытаний песка в чистом виде и по контакту с различными типами геомембран сведены в табл. 2, в которой указаны полученные параметры сопротивления сдвигу, а также промежуточные характеристики $\tau_{max,s}$ и τ_{max}, на основании которых выполнялся расчет коэффициента трения f_g контакта «геомембрана / песок» согласно ISO 12957-1:2018.

Анализ результатов сдвиговых испытаний (см. табл. 2) позволяет отметить, что при любом типе геомембраны сопротивление сдвигу песка по контакту с ней снижается относительно чистого песка за счет уменьшения сил трения. При этом сцепление (зацепление) можно считать неизменным — примерно 8±2 кПа. В линейке исследованных типов геомембран величина угла внутреннего трения (φ) по контакту с песком закономерно снижается в зависимости от степени шероховатости поверхности материала. При среднем значении φ = 37° для чистого песка наименьшее снижение (до 32°) отмечается при сдвиге по контакту с текстурированной геомембраной, а наибольшее (до 17°) — по гладкой поверхности. Соответственно, наибольшим коэффициентом трения обладает контакт песка с текстурированой геомембраной (f_g = 0,83), а наименьшим — с гладкой поверхностью (f_g = = 0,56). Промежуточный результат показал контакт песка и геомембраны с приклеенным геотекстилем (f_g = 0,67).

Результаты сдвиговых испытаний образцов фосфогипса, отобранных непосредственно на заводе и с поверхности отвала, в чистом виде и при контактных взаимодействиях с тисненой и гладкой геомембранами, приведены в табл. 3 и 4.

Фосфогипс, идентифицированный по гранулометрическому составу как «супесь песчанистая», относится к связанным дисперсным грунтам, сопротивление сдвигу которых обусловлено сцеплением и силами трения. Как показали результаты испытаний, сопротивление сдвигу фосфогипса по контакту с геомембраной снижается относительно однородного материала за счет уменьшения обоих параметров — сцепления (c) и угла внутреннего трения (φ).

Сцепление фосфогипса снижается примерно на 40% при сдвиге по контакту с текстурированной геомембраной и до 60% — по контакту с гладкой относительно сцепления чистого фосфогипса

Таблица 3

Прочностные параметры фосфогипса полугидрата [составлено авторами]
Strength parameters of phosphogypsum semihydrate [compiled by the authors]

Место отбора	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.	Средние максимальные касательные напряжения, кПа
С конвейера завода	23	33	108,3
С поверхности существующего отвала	29	31	123,5

Таблица 4

Результаты сдвиговых испытаний фосфогипса с различными типами геомембран [составлено авторами]

Results of shear tests of sand with various types of phosphogypsum geomembranes [compiled by the authors]

№ испытания	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.	Максимальные касательные напряжения, кПа	Средние максимальные касательные напряжения, кПа	Коэффициент трения f_g
Геомембрана с текстурированой поверхностью / полугидрат с завода					
1	12,5	20	71	71,8	0,66
2	17,1	18	59		
3	10,8	21	82		
4	14,0	20	75		
Геомембрана с гладкой поверхностью / фосфогипс полугидрат с завода					
13	12,5	15	47	52,3	0,48
14	9,3	14	39		
15	8,8	18	65		
16	9,1	16	58		
Геомембрана с текстурированой поверхностью / фосфогипс полугидрат с поверхности отвала					
9	18,6	19	74	80,5	0,65
10	15,4	20	83		
11	20,7	21	87		
12	19,1	21	78		
Геомембрана с гладкой поверхностью / фосфогипс полугидрат с поверхности отвала					
5	8,2	19	66	64,8	0,52
6	15,0	15	53		
7	11,2	18	71		
8	11,8	17	69		

(23÷29 кПа). Примерно такая же количественная тенденция отмечается при анализе изменений угла внутреннего трения: значение φ контакта с тисненой поверхностью на 35—40% ниже, чем у чистого фосфогипса (31÷33°), а с гладкой мембраной — примерно на 50%.

Для фосфогипса, как и для песчаного грунта, характерна зависимость коэффициента трения f_g от типа поверхности геомембраны, а именно: контакт с текстурированой поверхностью отличается более высоким трением ($f_g \approx 0{,}65$) в сравнении с гладкой пленкой ($f_g \approx 0{,}50$). Впрочем, этот результат, вытекающий из законов физики, был очевиден и до испытаний, важным являлась количественная оценка контактных взаимодействий геомембран с разными видами грунтов, а также определение параметров сопротивления сдвигу, которые необходимы для решения практических инженерных задач.

Практические примеры

Из результатов лабораторных исследований следует, что внедрение геосинтетических материалов в основание откосных горнотехнических сооружений в виде противофильтрационных эле-

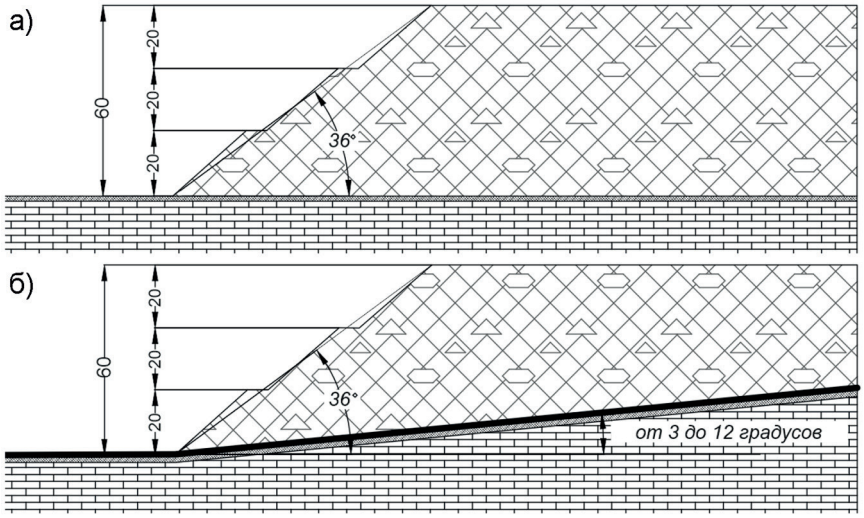

Рис. 4. Проектируемый отвал на горизонтальном (а) и наклонном (б) основании [составлено авторами]
Fig. 4. Projected Rock Dump on a horizontal (a) and inclined (b) base [compiled by the authors]

ментов изменяет условия устойчивости этих сооружений за счет появления так называемого «слабого» контакта. Чтобы ответить на вопрос, насколько ощутимое влияние на состояние отвалов оказывает данное конструктивное решение, и какие еще факторы следует учитывать при обосновании их долговременной устойчивости, рассмотрим два тестовых примера.

Пример 1. Отвал вскрышных пород на «прочном» основании

При разработке месторождения полезных ископаемых открытым способом под отвал вскрышных пород выделен земельный отвод, геологическое строение которого представлено выветрелыми скальными породами (песчаниками), перекрытыми в верхней части разреза небольшим по мощности слоем элювия супесчаного состава. Рельеф в границах земельного отвода изменяется от полого — практически горизонтального (рис. 4, *а*), до наклонного — с крутизной склонов до 12° (рис. 4, *б*). К толще коренных пород приурочен водоносный горизонт трещинно-пластовых подземных вод, которые из-за отсутствия естественного геологического

Таблица 5

Расчетные характеристики пород [составлено авторами]
Calculated characteristics of rocks [compiled by the authors]

Расчетный элемент	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.	Объемный вес, кН/м^3
Отвальные породы	9	37	17,5
Породы основания — слой элювия	10	35	19,0
Породы основания — песчаник	100	37	25,0
Контакт пород отвала с гладкой геомембраной	8	21	—
Контакт пород отвала с текстурированной геомембраной	7	32	—

барьера имеют прямую гидравлическую связь с поверхностью земли. В целях защиты подземных вод от вредного влияния техногенных стоков предусмотрено создание в основании отвала противофильтрационного экрана с использованием геомембраны.

Для разработки технико-экономического обоснования проектных решений выполнены расчеты устойчивости отвала с учетом рельефа местности и разных видов геомембран. Использованные в тестовом примере расчетные характеристики пород и материалов приведены в табл. 5. Для отвальных пород они приняты по результатам испытаний песчаного материала в чистом виде и по контактам с гладкой и текстурированной (тисненой) геомембранами (см. табл. 2). Учитывая, что принятые параметры сопротивления сдвигу песка близко соответствуют обломочным скальным породам без глинистого заполнителя в отвалах сухой вскрыши, результаты расчетов с большой степенью достоверности будут отражать состояние устойчивости реальных сооружений.

Геомеханические расчеты выполнены средствами программного комплекса RS2 (RocScience inc.) с использованием метода конечных элементов (МКЭ). По результатам расчетов определен оптимальный результирующий угол откоса сооружения (α), соответствующий нормативному коэффициенту запаса устойчивости $k_{п}$ = 1,2 (согласно ФНП «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов»). Для отвала высотой 60 м на горизонтальном и наклонном основаниях значение α составило 36°. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что при результирующем угле откоса 36° для случаев отсыпки на естественном прочном основании и при укладке текстурированной геомембраны устойчивость будет обеспечена с коэффициентом запаса выше нормативного значения для всех вариантов наклона основания.

В случае использования экранирующей гладкой пленки, характеризующейся меньшими параметрами сопротивления сдвигу, коэффициент запаса будет снижаться от значения 1,18 на горизонтальном основании до 1,03 (близкого к предельному состоянию) при угле наклона 12°. Поэтому, применение гладкой геомембраны в основании отвалов, формируемых как на ровной поверхности, так и на склонах, обусловливает значительные риски нарушения устойчивости сооружений, во всяком случае, для рассмотренных здесь расчетных условий.

Пример 2. Отвал на «слабом» водонасыщенном основании

Анализ причин аварийных ситуаций [24], имевших место в практике отвалообразования, показывает, что большая часть разрушительных деформаций связана с отсыпкой отвалов на слабом основании (32%), ошибочными технологическими решениями по подготовке основания и порядку формирования отвалов (25%), влиянием на устойчивость сооружений изменений гидрогеологических условий природно-технической системы «отвал — основание» (15%). Приведенные статистические данные необходимо учитывать при проектировании отвалов с применением геосинтетических материалов для изоляции слабых водонасыщенных грунтов основания. Особое внимание следует обратить на тот факт, что создаваемый пленкой противофильтрационный эффект имеет положительную направленность только в части предотвращения фильтрации из техногенного массива отвала, а для водонасыщенных пород основания, наоборот, он ухудшает их несущую способность за счет образования избыточного порового давления при нагружении отвальными массами.

В данном тестовом примере рассмотрены условия формирования отвала на слабом основании в контексте влияния противофильтрационного экрана на состояние устойчивости откосов сооружения за счет изменения условий дренирования водонасыщенных отложений основания и формирования в них избыточного порового давления.

Земельный отвод под строительство отвала фосфогипса расположен на равнинном участке, в пределах которого повсеместно распространены отложения четвертичного возраста. Инженерно-геологическое строение участка представлено слоистой толщей водо-насыщенных песчаных, супесчаных и суглинистых грунтов от мягкопластичной до полутвердой консистенции, сменяемых к основанию толщи твердыми моренными суглинками. Коренные породы представлены трещиноватыми глинистыми песчаниками, в верхней части выветрелыми до состояния щебня с суглинистым заполнителем. Гидрогеологические условия участка характеризуются распространением двух водоносных горизонтов, первый из которых приурочен к песчаным слоям и линзам в толще четвертичных отложений, второй — к трещиноватым песчаникам. Разделяющим водоупором служит слой слабопроницаемых моренных суглинков.

При разработке проекта строительства учтено, что участок расположен в области питания грунтового водоносного горизонта, а его разгрузка происходит в местную речную сеть. Во избежание загрязнения подземных вод и поверхностных водотоков принято решение о необходимости изоляции проектируемого объекта от непосредственного контакта с естественными отложениями с использованием геосинтетических материалов. Обоснование проектной конструкции включает оценку устойчивости отвала высотой 60 м при поэтапном его наращивании в течение разных сроков эксплуатации, в зависимости от объемов образования отходов в перспективе. В качестве изолирующего материала рассмотрены два вида геомембраны с

Таблица 6

Расчетные характеристики пород и материалов [составлено авторами]
Calculated characteristics of rocks and materials [compiled by the authors]

Расчетный элемент	**Объемный вес, кН/м^3**	**Модуль упругости (деформации), кПа**	**Коэффициент Пуассона**	**Угол внутреннего трения, град.**	**Сцепление, кПа**	**Коэффициент фильтрации, м/сут**
Слой 1	21,8	14 000	0,35	22	23	0,05
Слой 2	21,5	12 000	0,35	19	44	0,05
Слой 3	22,5	19 000	0,35	18	55	0,01
Слой 4	21,5	30 000	0,35	21	65	0,005
Слой 5	23,0	45 000	0,30	10	80	0,0001
Слой 6	25,1	200 000	0,25	35	100	0,1
Фосфогипс полугидрат	16,2	4000	0,32	33	29	—
Контакт с тисненой геомембраной	—	—	—	20	16	0
Контакт с гладкой геомембраной	—	—	—	16	11	0

Таблица 7

Результаты расчетов устойчивости отвала на слабом основании [составлено авторами]
The results of calculations of the stability of the rock dump on a weak basis [compiled by the authors]

Расчетные условия (подготовка основания)	Коэффициент запаса устойчивости k_{st} в зависимости от срока возведения отвала		
	5 лет	10 лет	15 лет
Без геомембраны	1,30	1,30	1,30
Геомембрана тисненая	1,17	1,21	1,25
Геомембрана гладкая	1,11	1,16	1,23

разным коэффициентом трения по контакту с фосфогипсом.

Расчеты устойчивости отвала выполнены в специализированном программном комплексе RS2 на базе численного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов при различных режимах нагружения, соответствующих срокам эксплуатации 5, 10 и 15 лет. Гидрогеомеханическая схематизация основания отвала выполнена с выделением шести расчетных элементов, в том числе: слои 1—4 — водопроницаемые отложения; слой 5 — водоупорные моренные суглинки; слой 6 — песчаники трещиноватые. Расчетные значения физико-механических и фильтрационных свойств пород и контактов с геомембраной (см. табл. 6) приняты по справочным данным и по результатам испытаний, выполненных в рамках настоящих исследований (см. табл. 2—4).

Результаты расчетов (табл. 7) показывают, что устойчивость отвала высотой 60 м на естественном основании (без противофильтрационного экрана) обеспечивается с нормативным коэффициентом запаса k_n = 1,3 (согласно ФНП «Правила обеспечения устойчивости… » для данного вида отвалов) при генеральном угле откоса α = 30°. Интенсивность нагружения водонасыщенных четвертичных отложений не влияет на устойчивое состояние откосов, т.к. возникающее избыточное давление рассеивается в процессе нарастания нагрузки от отсыпаемых отвальных масс. Создание противофильтрационного экрана в основании отвала влечет снижение коэффициента запаса устойчивости относительно допустимых нормативных значений. При этом тип поверхности геомембраны не играет столь существенной роли, как в выше рассмотренном примере отсыпки отвала на прочном основании, а преимущественное влияние на изменение коэффициента запаса оказывает срок возведения сооружения, определяющий интенсивность нагружения слабого основания. Ухудшение устойчивости откосов отвала, связанное с формированием избыточного порового давления в породной толще основания, обусловлено изменением условий фильтрационной консолидации этой толщи из-за искусственного создания верхней водонепроницаемой границы (геомембраны).

Формирование избыточного порового давления в толще водонасыщенных отложений идентично появлению напорных вод в этой толще, и графически может быть отражено в виде пьезометрических поверхностей, как это показано на рис. 5. Приведенные пьезометрические уровни подземных вод, соответствующие распределению избыточного порового давления на завершающем этапе его возведения, наглядно иллюстрируют характер изменения НДС водона-

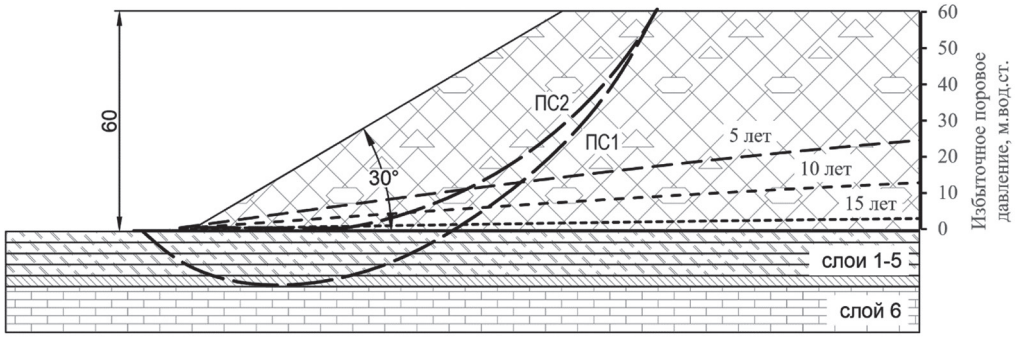

Рис. 5. Распределение избыточного порового давления в основании отвала в зависимости от срока его формирования (5, 10 и 15 лет) [составлено авторами]

Fig. 5. Distribution of excess pore pressure at the base of the dump depending on the period of its formation (5, 10 and 15 years) [compiled by the authors]

сыщенных пород основания в зависимости от интенсивности наращивания высоты сооружения (срока эксплуатации — 5, 10 и 15 лет).

Чем интенсивнее ведется наращивание высоты сооружения, тем выше величины образующего избыточного порового давления в грунтах основания, снижающего их несущую способность. Это выражается также в изменении механизма нарушения устойчивости откоса, судя по положению потенциальных поверхностей скольжения (ПС1 и ПС2) для различных расчетных условий (см. рис. 5). Так, нарушение устойчивости отвала при большой скорости наращивания высоты (12 или 6 м/год) соответствует подподошвенному типу оползней с захватом пород основания (П1). При низкой интенсивности (4 м/год) — призма возможного оползания захватывает только отвальный массив, а поверхность скольжения в нижней части проходит по контакту с противофильтрационным экраном (П2).

Выводы

Использование полимерных изолирующих материалов (геомембран) для создания противофильтрационных экранов в основании отвалов предопределяет постановку специальных инженерно-геологических исследований, моделирующих работу этих материалов в контакте с породным массивом, с целью определения характеристик контакта «грунт-геомембрана», необходимых для геомеханических расчетов.

В статье представлены результаты изучения контактных взаимодействий двух видов грунтов (песка и фосфогипса) с геомембранами HDPE (ПНД) с различным типом поверхности (гладкой, текстурированной и с прикатанным геотекстилем). Испытания проведены по стандарту ISO 12957-1:2018 «Geosynthetics — Determination of friction characteristics — Part 1: Direct shear test» методом прямого сдвига в приборе с большой площадью среза (500 см^2).

По результатам испытаний установлено, что параметры сопротивления сдвигу контакта «грунт-геомембрана» зависят от типа поверхности геосинтетического материала, но в любом случае ниже, чем у чистого грунта. Из двух видов испытанных дисперсных грунтов снижение прочности по контакту с геомембраной выражено более сильно для обладающего связностью фосфогипса, чем для несвязного песчаного грунта.

Основной характеристикой прочности контакта «грунт-геомембрана» является коэффициент трения f_g, опреде-

ляемый как отношение максимальных касательных напряжений на контакте к максимальным касательным напряжениям в исходном грунте.

По полученным величинам f_g можно сделать вывод, что сопротивление сдвигу грунтов по контакту с геосинтетическим материалом может составлять от 80% (текстурированная геомембрана) до 50% (гладкая пленка) относительно исходного грунта.

Геомеханическими расчетами на тестовых примерах показано, что гидроизоляция оснований отвалов с использованием геосинтетических материалов снижает устойчивость откосов сооружений за счет появления искусственного ослабленного контакта при отсыпке пород на прочное основание и формирования избыточного порового давления в водонасыщенных отложениях при отсыпке на слабое основание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кочетков А. В.*, *Щеголева Н. В.*, *Коротковский С. А.*, *Талалай В. В.*, *Васильев Ю. Э.*, *Шашков И. Г.* Устройство слоев транспортных сооружений из фосфогипса полугидрата (отхода — побочного продукта производства азотно-фосфорных удобрений) // Транспортные сооружения. — 2019. — № 1. DOI: 10.15862/18SATS119. URL: https://t-s.today/PDF/18SATS119.pdf.

2. *Пашкевич М. А., Патокин Д. А., Данилов А. С.* Утилизация нитроцеллюлозосодержащих отходов химической промышленности с получением минеральных почвенных добавок // Экология и промышленность России. — 2024. — Т. 28. — № 6. — С. 10—17. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-10-17.

3. *Чукаева М. А.*, *Поваров В. Г.*, *Сверчков И. П.* Железосодержащие отходы металлообработки как хемосорбент для очистки сточных вод от ионов молибдена // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. — 2020. — Т. 61. — С. 43—51.

4. *Isteri V., Ohenoja K., Hanein T., Kinoshita H., Holger Kletti H., Rößler C., Tanskanen P., Illikainen M., Fabritius T.* Ferritic calcium sulfoaluminate belite cement from metallurgical industry residues and phosphogypsum: Clinker production, scale-up, and microstructural characterization // Cement and Concrete Research. 2022, vol. 154, article 106715. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106715.

5. *Tayibi H., Choura M., López F. A., Alguacil F. J., López-Delgado A.* Environmental impact and management of phosphogypsum (review) // Journal of Environmental Management. 2009, vol. 90, pp. 2377—2386.

6. *Недбаев И. С.*, *Цывкунова Н. В.*, *Елсукова Е. Ю.* Обзор российского и мирового опыта решения экологических проблем производства, хранения, переработки и использования фосфогипса // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 4. URL: https://esj.today/PDF/10NZVN422.pdf.

7. *Matveeva V. A.*, *Smirnov Y. D.*, *Suchkov D. V.* Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer // Environ Geochem Health. 2022, vol. 44, pp. 1605—1618. DOI: 10.1007/s10653-021-00988-x.

8. *Макаров А. Б.*, *Хасанова Г. Г.*, *Талалай А. Г.* Техногенные месторождения: особенности исследований // Известия Уральского государственного горного университета. — 2019. — № 3(55). — С. 58—62. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-120-129.

9. *Pashkevich M. A.*, *Petrova T. A.* Technogenic impact of sulphide-containing wastes produced by ore mining and processing at the ozernoe deposit: investigation and forecast // Journal of Ecological Engineering. 2017, vol. 18, no. 6, pp. 127—133. DOI: 10.12911/22998993/76700.

10. *Mihaljevič M., Baieta R., Ettler V., Vaněk A., Kříbek B., Penížek V., Drahota P., Trubač J., Sracek O., Chrastný V.*, *Mapani B. S.* Tracing the metal dynamics in semi-arid soils near mine tailings using stable Cu and Pb isotopes // Chemical Geology. 2019, vol. 515, pp. 61—76. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.03.026.

11. *Xiaoyang Liu, Huading Shi, Zhongke Bai, Wei Zhou, Kun Liu, Minghao Wang, Yujie He* Heavy metal concentrations of soils near the large opencast coal mine pits in China // Chemosphere. 2020, vol. 244, article 125360. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125360.

12. *Батугин А. С.*, *Кобылкин А. С.*, *Мусина В. Р.* Исследование влияния геодинамической позиции углепородных отвалов на их эндогенную пожароопасность // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 526—533. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.5.

13. *Смирнов Ю. Д.*, *Сучкова М. В.* Перспективы полезного использования золы сжигания осадка сточных вод в народном хозяйстве // Вода и экология: проблемы и решения. — 2019. — № 3 (79). — С. 16—25.

14. *Бекболотова А. К.*, *Токтогулов А. Ж.* Воздействие хвостохранилищ на подземные воды горных районов // Известия КГТУ им. И. Раззакова. — 2014. — № 31. — С. 415—417.

15. *Семячков А. И.*, *Почечун В. А.*, *Семячков К. А.* Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 168—179. DOI: 10.31897/PMI.2023.24.

16. *Пашкевич М. А.*, *Петрова Т. А.*, *Сверчков И. П.* Свойства обводненных отходов обогащения угля и перспективы их рециклинга // Обогащение руд. — 2017. — № 1. — С. 46—51. DOI: 10.17580/or.2017.01.09.

17. *Терещенко С. В.*, *Марчевская В. В.*, *Павлишина Д. Н.* Пути снижения негативного воздействия горного производства на окружающую природную среду // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 4. — С. 62—66.

18. *Nathalie Touze-Foltz, Haijian Xie, Guillaume Stoltz* Performance issues of barrier systems for landfills. A review // Geotextiles and Geomembranes. 2021, vol. 49, no. 2, pp. 475—488. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2020.10.016.

19. *Глаговский В. Б.*, *Сольский С. В.*, *Лопатина М. Г.*, *Дубровская Н. В.*, *Орлова Н. Л.* Геосинтетические материалы в гидротехническом строительстве // Гидротехническое строительство. — 2014. — № 9. — С. 23—27.

20. *Саинов М. П.*, *Зверев А. О.* Противофильтрационные элементы грунтовых плотин из геосинтетических материалов // Инновации и инвестиции. — 2018. — № 1. — С. 201—210.

21. *Сольский С. В.*, *Гладштейн О. И.*, *Зеленский И. Г.* Современные решения применения геосинтетических материалов на грунтовых сооружениях // Гидротехника. — 2023. — № 4. — С. 62—66. DOI: 10.55326/22278400_2023_4_62.

22. *Жабко А. В.* О проблемах и современных методах оценки устойчивости откосов на открытых горных работах // Проблемы недропользования. — 2018. — № 3(18). — С. 96—107. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.096.

23. *Павлович А. А.*, *Хорева А. Ю.* Определение прочностных свойств отвальной массы для оценки устойчивости откосов отвалов // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 55—61. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.08.

24. *Бахаева С. П.*, *Гурьев Д. В.* Прогноз устойчивости насыпных дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных свойств суглинистых грунтов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 1. — С. 23—32. DOI: 10.15372/FTPRPI20200103.

25. *Шабаров А. Н.*, *Носков В. А.*, *Павлович А. А.*, *Черепов А. А.* Понятие геомеханического риска при ведении открытых горных // Горный журнал. — 2022. — № 9. — С. 22—28. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.

26. *Ческидов В. В.*, *Маневич А. И.*, *Липина А. В.* Получение и анализ больших данных в практике мониторинга состояния горнотехнических сооружений // Горная промышленность. — 2019. — № 2 (144). — С. 86—88.

27. *Маринин М. А.*, *Карасев М. А.*, *Поспехов Г. Б.*, *Поморцева А. А.*, *Кондакова В. Н.*, *Сушкова В. И.* Комплексное изучение фильтрационных свойств окомкованных песчано-глинистых руд и режимов фильтрации в штабеле кучного выщелачивания // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 30—40. DOI: 10.31897/PMI.2023.7.

28. *Stoltz G., Nicaise S., Veylon G., Poulain D.* Determination of geomembrane — protective geotextile friction angle: An insight into the shear rate effect // Geotextiles and Geomembranes. 2020, vol. 48, no. 2, pp. 176—189. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2019.11.007.

29. *Abdelaal F. B.*, *Morsy M. S.*, *Rowe R. K.* Long-term performance of a HDPE geomembrane stabilized with HALS in chlorinated water // Geotextiles and Geomembranes. 2019, vol. 47, no. 6, pp. 815—830. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2019.103497.

30. *Husein Malkawi D. A., Husein Malkawi A. I., Bani-Hani K. A.* Slope stability analysis for the phosphogypsum stockpiles: A case study for the sustainable management of the phosphogypsum stacks in Aqaba Jordan // Sustainability. 2022, vol. 14, article 15763. DOI: 10.3390/su142315763. MAS

REFERENCES

1. Kochetkov A. V., Shchegoleva N. V., Korotkovskiy S. A., Talalai V. V., Vasilyev Yu. E., Shashkov I. G. The device layers and transport facilities of hemihydrate phosphogypsum (waste byproduct of the production of nitrogen-phosphorus fertilizers). *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019, no. 1. [In Russ]. DOI: 10.15862/18SATS119. URL: https://t-s.today/PDF/18SATS119.pdf.

2. Pashkevich M. A., Patokin D. A., Danilov A. S. Processing the nitrocellulose-containing waste from the chemical industry to obtain mineral soil additives. *Ecology and Industry of Russia*. 2024, vol. 28, no. 6, pp. 10—17. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-10-17.

3. Chukaeva M. A., Sverchkov I. P., Povarov V. G. Iron-containing metalworking wastes as a chemosorbent for wastewater treatment from molybdenum ions. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya*. 2020, vol. 61, pp. 43—51. [In Russ].

4. Isteri V., Ohenoja K., Hanein T., Kinoshita H., Holger Kletti H., Rößler C., Tanskanen P., Illikainen M., Fabritius T. Ferritic calcium sulfoaluminate belite cement from metallurgical industry residues and phosphogypsum: Clinker production, scale-up, and microstructural characterization. *Cement and Concrete Research*. 2022, vol. 154, article 106715. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106715.

5. Tayibi H., Choura M., López F. A., Alguacil F. J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum (review). *Journal of Environmental Management*. 2009, vol. 90, pp. 2377—2386.

6. Nedbaev I. S., Tsyvkunova N. V., Elsukova E.Yu. Review of Russian and world experience in solving environmental problems of production, storage, processing and use of phosphogypsum. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022, vol. 14, no. 4. [In Russ]. URL: https://esj.today/PDF/10NZVN422.pdf.

7. Matveeva V. A., Smirnov Y. D. & Suchkov D. V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer. *Environ Geochem Health*. 2022, vol. 44, pp. 1605—1618. DOI: 10.1007/s10653-021-00988-x.

8. Makarov A. B., Khasanova G. G., Talalay A. G. Technogenic deposits: features of research. *News of the Ural State Mining University*. 2019, no. 3(55), pp. 58—62. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-120-129.

9. Pashkevich M. A., Petrova T. A. Technogenic impact of sulphide-containing wastes produced by ore mining and processing at the ozernoe deposit: investigation and forecast. *Journal of Ecological Engineering*. 2017, vol. 18, no. 6, pp. 127—133. DOI: 10.12911/22998993/76700.

10. Mihaljevič M., Baieta R., Ettler V., Vaněk A., Kříbek B., Penížek V., Drahota P., Trubač J., Sracek O., Chrastný V., Mapani B. S. Tracing the metal dynamics in semi-arid soils near mine tailings using stable Cu and Pb isotopes. *Chemical Geology*. 2019, vol. 515, pp. 61—76. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.03.026.

11. Xiaoyang Liu, Huading Shi, Zhongke Bai, Wei Zhou, Kun Liu, Minghao Wang, Yujie He Heavy metal concentrations of soils near the large opencast coal mine pits in China. *Chemosphere*. 2020, vol. 244, article 125360. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125360.

12. Batugin A. S., Kobylkin A. S., Musina V. R. Investigation of the influence of the geodynamic position of coal-bearing dumps on their endogenous fire hazard. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 526—533. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.5.

13. Smirnov Yu. D., Suchkova M. V. Beneficial use of sewage sludge incineration ash in the national economy. *Water and Ecology: problems and solutions*. 2019, no. 3 (79), pp. 16—25. [In Russ].

14. Bekbolotova A. K., Toktogulov A.Zh. Impact of tailings dumps on groundwater in mountainous areas. *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2014, no. 31, pp. 415—417. [In Russ].

15. Semyachkov A. I., Pochechun V. A., Semyachkov K. A. Hydrogeoecological conditions of technogenic groundwater in waste disposal sites. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 168—179. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.24.

16. Pashkevich M. A., Petrova T. A., Sverchkov I. P. Properties of watered coal preparation waste and prospects for their recycling. *Obogashchenie Rud*. 2017, no. 1, pp. 46—51. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2017.01.09.

17. Tereshchenko S. V., Marchevskaya V. V., Pavlishina D. N. Ways to reduce negative environmental impact of mining industry. *Herald of the Kola science centre of the RAS*. 2016, no. 4, pp. 62 — 66. [In Russ].

18. Nathalie Touze-Foltz, Haijian Xie, Guillaume Stoltz Performance issues of barrier systems for landfills. A review. *Geotextiles and Geomembranes*. 2021, vol. 49, no. 2, pp. 475 — 488. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2020.10.016.

19. Glagovskiy V. B., Sol'skiy S. V., Lopatina M. G., Dubrovskaya N. V., Orlova N. L. Geosynthetic materials in hydraulic engineering construction. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo*. 2014, no. 9, pp. 23 — 27. [In Russ].

20. Sainov M. P., Zverev A. O. Impervious elements of embankment dams of geosynthetic materials. *Innovation & Investment*. 2018, no. 1, pp. 201 — 210. [In Russ].

21. Solsky S. V., Gladshtein O. I., Zelensky I. G. Modern solutions for the use of geosynthetic materials on ground structures. *The Hydrotechnika*. 2023, no. 4, pp. 62 — 66. [In Russ]. DOI: 10.55326/22278400_2023_4_62.

22. Zhabko A. V. On problems and modern methods of evaluating the stability of slides on open mountain works. *Problems of Subsoil Use*. 2018, no. 3(18), pp. 96 — 107. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.096.

23. Pavlovich A. A., Khoreva A. Yu. Determination of strength properties for slope stability estimate in dumps. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 55 — 61. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.08.

24. Bakhaeva S. P., Guryev D. V. Forecast of the stability of embankment dams taking into account the spatial variability of the strength properties of loamy soils. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2020, no. 1, pp. 23 — 32. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20200103.

25. Shabarov A. N., Noskov V. A., Pavlovich A. A., Cherepov A. A. Concept of geomechanical risk in open pit mining. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 9, pp. 22 — 28. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.

26. Cheskidov V. V. Development of an integrated system of engineering-geological and hydrogeological monitoring of safety of operation of mining and technical facilities. *Russian Mining Industry Journal*. 2019, no. 2 (144), pp. 86 — 88. [In Russ].

27. Marinin M. A., Karasev M. A, Pospehov G. B., Pomortseva A. A., KondakovaV.N., Sushkova V. I. Comprehensive study of filtration properties of pelletized sandy clay ores and filtration modes in the heap leaching stack. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 30 — 40. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.7.

28. Stoltz G., Nicaise S., Veylon G., Poulain D. Determination of geomembrane — protective geotextile friction angle: An insight into the shear rate effect. *Geotextiles and Geomembranes*. 2020, vol. 48, no. 2, pp. 176 — 189. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2019.11.007.

29. Abdelaal F. B., Morsy M. S., Rowe R. K. Long-term performance of a HDPE geomembrane stabilized with HALS in chlorinated water. *Geotextiles and Geomembranes*. 2019, vol. 47, no. 6, pp. 815 — 830. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2019.103497.

30. Husein Malkawi D. A., Husein Malkawi A. I., Bani-Hani K. A. Slope stability analysis for the phosphogypsum stockpiles: A case study for the sustainable management of the phosphogypsum stacks in Aqaba Jordan. *Sustainability*. 2022, vol. 14, article 15763. DOI: 10.3390/su142315763.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кутепова Надежда Андреевна[1] — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: Kutepova_NA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0006-3803-7222,
Кутепов Юрий Иванович[1] — д-р техн. наук,
профессор, зав. лабораторией,
e-mail: Kutepov_YuI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0004-3333-5699,
Васильева Анастасия Дмитриевна[1] — канд. техн. наук,
научный сотрудник,
e-mail: Vasileva_AD@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2769-3738,

Кутепов Юрий Юрьевич[1] — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: Kutepov_YuYu@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3698-3072,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Для контактов: Васильева А.Д., e-mail: Vasileva_AD@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.A. Kutepova[1], Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher,
e-mail: Kutepova_NA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0006-3803-7222,
Yu.I. Kutepov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Laboratory, e-mail: Kutepov_YuI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0004-3333-5699,
A.D. Vasilieva[1], Cand. Sci. (Eng.),
Researcher, e-mail: Vasileva_AD@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2769-3738,
Yu.Yu. Kutepov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: Kutepov_YuYu@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3698-3072,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.D. Vasilieva, e-mail: Vasileva_AD@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 17.06.2024; получена после рецензии 08.08.2024; принята к печати 10.12.2024.
Received by the editors 17.06.2024; received after the review 08.08.2024; accepted for printing 10.12.2024.

НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»

Вуйич Слободан
Количественные модели поддержки принятия решений при планировании и проектировании в горнодобывающей промышленности
Год: 2024
Страниц: 300
ISBN: 978-5-98672-584-0
UDK: 517.977;622.33
Данная работа посвящена математическим инструментам как средствам выбора и принятия решений в горнодобывающей промышленности и исследованиях. Тема актуальная и отвечающая современным вызовам при проектировании горных предприятий для горняков, геологов и специалистов многих профессий. Монография может быть использована читателями, имеющими широкий спектр предварительных знаний в данной области, аспирантами и докторантами, учеными, исследователями, инженерами горного дела, геологии, системных наук и других профессий.