ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(11-1):131–148
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 624.131.1 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_131

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ ИЗВЕСТНЯКОМ

Г. Б. Поспехов[1], В. А. Изотова[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, 199106, Россия, violettaizotova@yandex.ru

Аннотация: Одной из актуальных проблем инженерной геологии является обоснование безопасного и рационального складирования отходов горнодобывающей и перерабатывающей промышленностей. В работе представлена инженерно-геологическая характеристика гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты известняком, рассматриваемых как слабые техногенные дисперсные грунты, на основе комплексных исследований их состава и физико-механических свойств. Объектом изучения является мономинеральный материал – двуводный гипс, полученный в результате химической реакции $CaCO_3$ и H_2SO_4 при участии воды. Исследования включали гранулометрический, рентгенофазовый, химический анализ, микроскопию, а также комплекс исследований механических свойств. Установлены зависимости прочностных и фильтрационных свойств от плотности и влажности материала. Показано, что данный тип гипсосодержащих отходов обладает специфическими свойствами, отличающими их от природных грунтов, что требует учета при использовании стандартных методик для их изучения. Установлено, что гипсосодержащие отходы нейтрализации серной кислоты обладают высокой сжимаемостью и низкой фильтрационной способностью. Учитывая эти особенности, предложены рекомендации по проектированию гипсохранилищ и обращению с подобными отходами. Полученные данные могут быть использованы для обоснования инженерных решений при складировании, рекультивации и утилизации гипсосодержащих отходов, а также при разработке нормативных требований к оценке их свойств.

Ключевые слова: гипс, отход, нейтрализация серной кислоты, техногенный грунт, гранулометрический состав, деформационные и прочностные свойства, фильтрационная консолидация, коэффициент фильтрации.

Благодарности: авторы выражают благодарность сотрудникам Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета, преподавателям и аспирантам кафедры инженерной и экологической геологии МГУ им. М. В. Ломоносова, а также коллегам из ЦКП «АИРИЗ» ИГГД РАН за консультации и помощь в проведении исследований.

Для цитирования: *Поспехов Г. Б., Изотова В. А.* Инженерно-геологическая характеристика гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты известняком // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11-1. – С. 131–148. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_131.

© Г. Б. Поспехов, В. А. Изотова. 2025

Engineering geological characteristics of gypsum-containing waste from sulphuric acid neutralisation with limestone

G. B. Pospehov[1], V. A. Izotova[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract: One of the urgent problems of engineering geology is justification of safe and rational storage of mining and processing industry wastes. The paper presents an engineering geological characteristic of gypsum-containing wastes of sulfuric acid neutralisation by limestone, considered as weak technogenic dispersed soils, on the basis of complex studies of their composition and physical and mechanical properties. The object of study is a monomineral material – bi-aqueous gypsum, obtained by the chemical reaction of $CaCO_3$ and H_2SO_4 with the participation of water. The investigations included granulometric, X-ray phase, chemical analysis, microscopy, as well as a set of studies of mechanical properties. Dependences of strength and filtration properties on density and humidity of the material were established. It is shown that this type of gypsum-containing wastes has specific properties that distinguish them from natural soils, which requires taking into account when using standard methods for their study. It is established that sulfuric acid neutralisation gypsum-containing wastes have high compressibility and low filtration capacity. Taking into account these features, recommendations on design of gypsum storages and handling of such wastes are offered. The obtained data can be used to substantiate engineering solutions for storage, reclamation and utilisation of gypsum-containing wastes, as well as for development of regulatory requirements for assessment of their properties.

Key words: gypsum, waste, sulfuric acid neutralisation, technogenic soil, granulometric composition, deformation and strength properties, filtration consolidation, filtration coefficient.

Acknowledgements: The authors would like to thank the staff of the Scientific Center for Geomechanics and Mining Problems of St. Petersburg Mining University, teachers and graduate students of the Department of Engineering and Environmental Geology of Lomonosov Moscow State University, as well as colleagues from the AIRIZ Research Center of the IGDD RAS for their advice and assistance in conducting research.

For citation: Pospehov G. B., Izotova V. A. Engineering geological characteristics of gypsum-containing waste from sulphuric acid neutralisation with limestone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2025;(11-1):131–148. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_131.

Введение

Актуальность проблемы утилизации, складирования и использования промышленных отходов в Российской Федерации подтверждается значительными объемами их образования и накопления, а также появлением новых разновидностей отходов вследствие развития технологий. Согласно статистическим данным, ежегодный объем образующихся отходов составляет около 7 млрд тонн, при этом общая масса накопленных твердых отходов достигает 80 млрд тонн [1]. В своих работах Ларионова Н. А. и Огородникова Е. Н. отмечают техническую возможность вторичного использования примерно 28% от общего объема отходов для различных целей, включая производство вяжущих веществ и строительных материалов, укрепление грунтов, рекультивацию нарушенных земель, закладку выработанного пространства в горном деле [2–4]. Реа-

лизация таких подходов позволила бы не только высвободить значительные территории, занятые под накопители отходов, но и существенно снизить техногенную нагрузку на окружающую среду. При этом, несмотря на имеющийся потенциал утилизации, продолжается активное формирование массивов техногенных грунтов в процессе складирования отходов, сопровождающееся отчуждением значительных земельных площадей [1, 5]. Актуальность исследований техногенных грунтов из-за постоянного увеличения объемов их образования, недостаточного опыта изучения, появления новых разновидностей и необходимости обобщения результатов будет оставаться высокой на протяжении всей хозяйственной деятельности человека [6, 7].

Несмотря на изученность различных гипсосодержащих отходов (ГСО), и прежде всего фосфогипса, среди их разнообразия относительно новым и слабоизученным материалом является гипсосодержащий продукт, формирующийся в процессе нейтрализации серной кислоты известняком [8, 9]. Его изучение также актуально в связи с реализацией с 2023 года «Серной программы» в Норильском и Кольском промышленных регионах, где планируется ежегодное образование до 3,77 млн тонн гипсовой пульпы как побочного продукта мероприятий по сокращению выбросов диоксида серы [10]. При этом большая часть отхода будет складироваться в гипсохранилища, формируемые намывным способом высотой 50 м и более.

С инженерно-геологической точки зрения, согласно принятой по ГОСТ 25100–2020 классификации, полученный при нейтрализации серной кислоты известняком двуводный гипс — это дисперсный антропогенный искусственно образованный грунт. При этом данный материал не имеет природных аналогов среди дисперсных грунтов. Поэтому при размещении ГСО в гипсохранилища необходимо учитывать его специфические свойства, что требует проведения комплексных исследований: вещественного и гранулометрического состава, количественных показателей состояния и свойств, прогноза их трансформации в процессе техногенеза [11]. Выполненные ранее исследования на других материалах доказывают, что различные техногенные грунты, образованные промышленными отходами, обладают принципиальными отличиями от природных грунтов, а также различаются между собой. Это обстоятельство требует разработки специальных методических подходов к их изучению при проектировании сооружений для складирования отходов [12–14].

Методы и материалы

Объектом исследований является двуводный гипс, полученный в ходе нейтрализации серной кислоты известняком. Технология нейтрализации серной кислоты заключается в том, что готовое известняковое молоко смешивается дозированно с технической серной кислотой. В ходе интенсивного смешивания карбонаты кальция вступают в реакцию с серной кислотой с образованием двуводного гипса и углекислоты [15, 16]. Сам процесс нейтрализации описывается уравнением [8]

$$CaCO_3 + H_2SO_4 + H_2O = \\ = CaSO_4 \cdot 2H_2O\downarrow + CO_2\uparrow.$$

Всего для исследований было получено три разновидности гипсового отхода: 2 пробы, которые отобраны при попытке разделения пульпы на класс +29 мкм (проба 1) и –29 мкм (проба 2), и общая неразделенная

пульпа (проба 3). Лабораторные комплексные исследования полученных образцов гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты выполнялись с целью определения и прогноза изменения показателей состава, состояния и физико-механических свойств грунтов. При этом в программу работ были включены: оценка гранулометрического состава, анализ морфологии частиц, химического состава водной вытяжки, а также выполнение комплекса определения физических, водных и механических свойств, включая прочностные и деформационные показатели.

Гранулометрический анализ образцов гипсосодержащего отхода проводился ареометрическим, пипеточным методами и методом лазерной дифракции. Комплекс определения физических характеристик выполнялся в соответствии с ГОСТ 5180–2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». При определении влажности учитывалась температура, при которой начинается потеря кристаллизационной воды в загипсованных грунтах [17–19].

Для изучения минерального состава образцов был применен рентгенофазовый анализ на дифрактометре Дрон Ум-1 в следующих условиях: сила тока 20 мА, напряжение 30 кВ, CuKα-излучение, диапазон углов 4–65° 2 тета, скорость сканирования 1 град/мин с шагом 0.02 град[1]. Дополнительно проводилось микроскопическое исследование морфологии зерен гипса с использованием поляризационного исследовательского микроскопа Leica DM2700P, что позволило получить данные о структурных особенностях материала.

Прочностные характеристики изучались с использованием прибора одноплоскостного среза по консолидированно-дренированной схеме (далее КД) в соответствии с ГОСТ 12248.1–2020. Перед испытаниями образцы предварительно уплотнялись в течение 7 дней при ступенчатом нагружении от 0,005 до 1,0 МПа. Скорость деформации среза, установленная по результатам консолидационных испытаний, составила 0,002 мм/мин. Параллельно проводились исследования на приборе многоплоскостного среза конструкции ГЕОТЕК[2], где использовался прибор типа II с кинематической связью в виде эластичной мембраны. В данном случае предварительное уплотнение грунта осуществлялось при 0,3 МПа в течение 48 часов, а скорость деформации среза равнялась 0,02 мм/мин [20, 21].

Определения прочности и деформируемости ГСО были выполнены с помощью методов трехосного и одноосного сжатия по ГОСТ 12248.3–2020 и ГОСТ 12248.2–2020 по схеме КД. Для проведения испытаний для подготовки образцов предварительно была выполнена изотропная консолидация в течение 2 дней при нагрузке 0,3 МПа. При трехосном сжатии на образец подавалось всестороннее давление σ_3=100 кПа, 300 кПа, 500 кПа, 700 кПа и вертикальная нагрузка через верхний поршень с постоянной скоростью деформации 0,02 мм/мин. Скорость деформирования грунтов была выбрана, исходя из требований ГОСТ 12248.3–2020.

Исследование сжимаемости грунта (по ГОСТ 12248.10–2020) выполнялось в компрессионных приборах на образцах диаметром 70 мм и высо-

[1] Анализ выполнен сотрудниками ЦКП «АИРИЗ» ИГГД РАН.

[2] Экспериментальные исследования проводились на автоматизированном испытательном комплексе АСИС, приобретенном за счет средств Программы развития Московского университета (контракт № 1040-44-2019 от 24.09.2019).

той 20 мм методом ступенчатого нагружения. По аналогии с раннее проведенными исследованиями каждая ступень нагрузки (0,005 МПа; 0,01 МПа; 0,025 МПа; 0,05 МПа) выдерживалась в течение 24 часов при равномерном приложении нагрузки [22–24]. Для определения коэффициента фильтрационной консолидации проводились специальные консолидационные испытания на образцах диаметром 75 мм и высотой 20 мм в компрессионных приборах, обеспечивающих условия одномерного сжатия при двухстороннем дренаже. Испытания выполнялись при нагрузках 0,025–1,0 МПа в течение 7 суток (10080 минут).

Дополнительно определялось сопротивление недренированному сдвигу двуводного гипса при различных значениях плотности грунта с использованием лабораторной крыльчатки в соответствии со стандартом ASTM D4648/D4648M-2016.

Коэффициент фильтрации устанавливался на компрессионно-фильтрационных приборах по методике ГОСТ 25584–2016 при переменном градиенте напора на образцах определенной влажности и плотности с пошаговым увеличением нагрузки от 0,005 до 1,0 МПа и выдержкой каждой ступени в течение 24 часов.

Результаты

Гранулометрический состав материала приведен в табл. 1. По результатам ареометрического и пипеточного методов в составе преобладает фракция 0,05–0,01 мм (54–79%), присутствуют фракции 0,1–0,05 мм (10–26%) и <0,002 мм (5–22%). Метод лазерной дифракции показал другое распределение фракций для 3 исследуемых проб: 0,25–0,1 мм — от 7 до 14%; 0,1–0,05 мм — 13–30%; 0,05–0,01 мм — около 24%; 0,01–0,002 мм — в количестве 13–23%; <0,002 мм — 21–26%.

Таблица 1

Гранулометрический состав гипсосодержащего отхода нейтрализации серной кислоты известняком [составлено авторами]

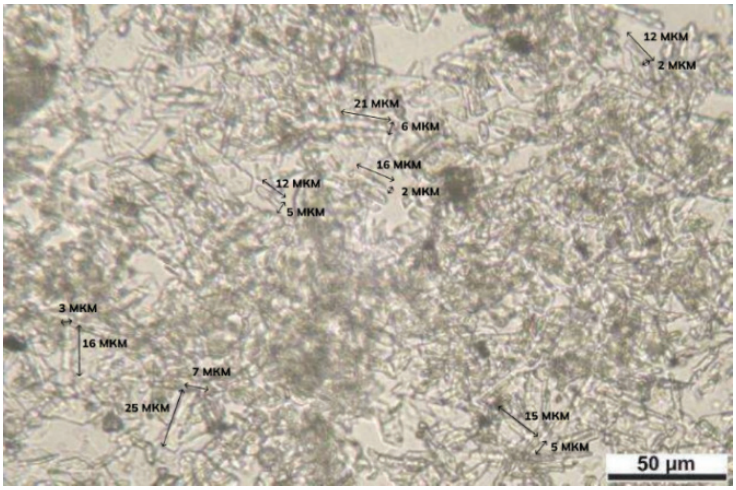
Particle size distribution of gypsum-containing waste from sulphuric acid neutralisation with limestone [compiled by the authors]

№ пробы	Метод определения	Размер фракций, мм							
		2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002
1	Ареометрический*	–	0,1	0,1	7,6	10,1	55,3	4,7	22,1
	Пипеточный*	–	–	–	5,1	26,1	54,9	0,3	13,6
	Лазерная дифракция	–	–	0,7	10,0	30,2	24,2	13,7	21,2
2	Ареометрический*	–	–	–	0,6	14,0	60,6	5,1	19,7
	Пипеточный*	–	–	–	–	16,7	69,9	0,7	12,7
	Лазерная дифракция	–	–	0,7	14,2	13,9	24,5	20,2	26,5
3	Ареометрический*	–	–	–	–	12,1	79,7	3,1	5,1
	Пипеточный*	–	–	–	3,4	24,2	61,7	0,2	10,5
	Лазерная дифракция	–	–	–	7,6	19,7	24,0	23,3	25,4

* Без добавления $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$.

В рамках микроскопического описания получена качественная характеристика формы зерен. Для всех образцов характерны кристаллы таблитчатой, пластинчатой, столбчатой и игольчатой формы. Микрокристаллы гипса столбчатой формы имеют следующие размеры: в ширину от 2,0 до 7,0 мкм, в длину от 3,0–5,0 мкм до 30,0 мкм. Таблитчатые кристаллы гипса в ширину достигают 7,0–9,0 мкм, а игольчатые кристаллы имеют ширину до 2,0 мкм. Основной объем занимают ксеноморфные обломочные зерна от 2,0 до 8,0 мкм в диаметре. На рис. 1, *а,б* представлены примеры изображений (для пробы 2) гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты при параллельных николях со шкалой 50 мкм и 0,1 мм, полученных микроскопическим методом.

а



б

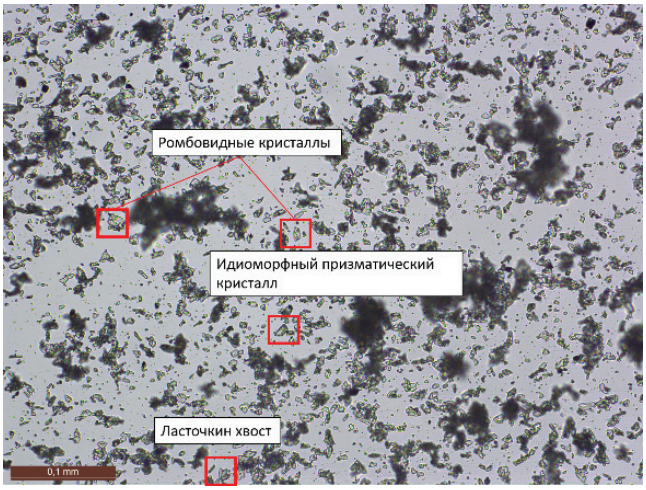


Рис. 1. Проба 2 при параллельных николях со шкалой 50 мкм (а) и 0,1 мм (б) [составлено авторами]
Fig. 1. Sample 2 at parallel nicols with a scale of 50 µm (a) and 0.1 mm (b) [compiled by the authors]

Согласно рентгенофазовому анализу материал состоит из 84% двуводного гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), 12% кальцита ($CaCO_3$), примесей доломита 2% и кварца 2%. Химический анализ водной вытяжки грунта показал, что основной вклад в минерализацию водной вытяжки грунта вносят сульфаты. Во всех исследуемых пробах значение pH составляет 7, что указывает на нейтральную реакцию среды. Сульфаты SO_4^{2-} присутствуют во всех пробах в количестве 1350–1400 мг/л, нитраты NO^{3-} — 0,9–1,5 мг/л, CL^- — до 0,3 мг/л, суммарное железо — до 0,05 мг/л. Общая минерализация для всех проб водных вытяжек от 1350 до 1400 мг/л.

Влажность твердого осадка материала (исходное состояние) для пробы 1 изменяется от 50 до 68%, для пробы 2 — от 62% до 71%, для пробы 3 — от 64 до 70%. Число пластичности для пробы 1 равно 0,05–0,11, для пробы 2–0,06–0,12, для пробы 3–0,07–0,10. Показатель текучести для пробы 1 равен 3,30–7,09, для пробы 2–7,39–12,02, для пробы 3–4,3–11,0. Плотность минеральной части для исследуемого материала равна в среднем 2,4 г/см^3.

Результаты испытаний трех разновидностей ГСО нейтрализации серной кислоты до 0,5 МПа в виде характерных компрессионных кривых представлены на рис. 2.

Для всех проб наблюдается существенное уменьшение коэффициента пористости при росте давления до 0,4 МПа. Исследуемые материалы характеризуются как сильносжимаемые, а значение модуля деформации <6 МПа позволяет рассматривать данные техногенные грунты как слабые, которые при наращивании ограждающих дамб будут сильно деформироваться в их основании. При этом обращает на себя внимание незначительное

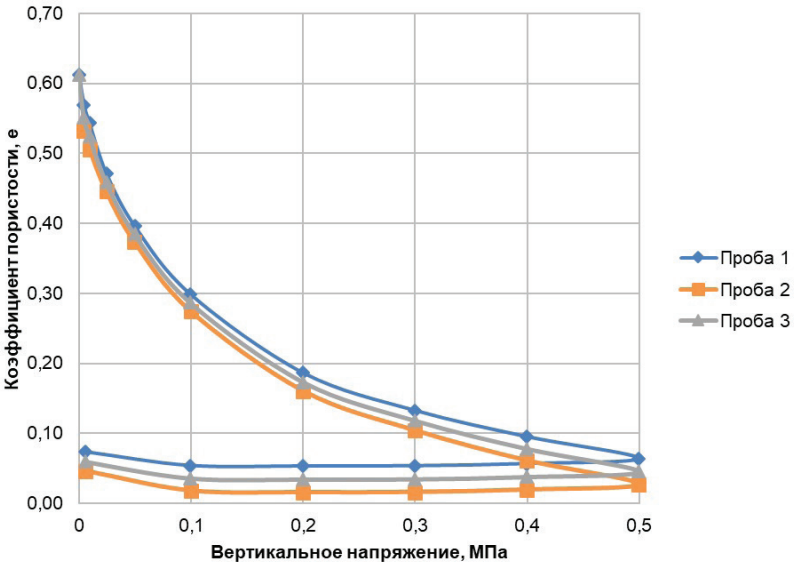


Рис. 2. Компрессионная кривая для гипсосодержащего отхода нейтрализации серной кислоты [составлено авторами]
Fig. 2. Compression curve for gypsum-containing waste from sulphuric acid neutralisation [compiled by the authors]

доуплотнение материала на стадии разгрузки, что связано с ползучестью скелета материала.

Результаты определения коэффициента фильтрации по компрессионно-фильтрационным испытаниям представлены в табл. 2 и на рис. 3. По водопроницаемости исследуемые материалы должны рассматриваться как слабоводопроницаемые и неводопроницаемые в зависимости от давления и достигнутой плотности [7].

На рис. 4, *а,б* представлена зависимость деформации сжатия гипсосодержащих образцов при разных давлениях (0,025–1,0 МПа) от времени по результатам консолидационных испытаний исходных проб. Плотность и влажность на графике указаны на конец испытания. Испытания ГСО на консолидацию выполнялись в одну ступень давления, приложенного мгновенно, в компрессионном приборе, с предохранением от высыхания в течение 7–8

Таблица 2

Зависимость коэффициента фильтрации от величины плотности естественного сложения [составлено авторами]

Dependence of filtration coefficient on the value of natural density [compiled by the authors]

№ пробы	Показатели	Нагрузка уплотнения, МПа					
		0,01	0,03	0,10	0,25	0,50	1,00
1	Плотность, г/см^3	1,55	1,58	1,66	1,70	1,72	1,74
	Коэффициент фильтрации, м/сут	0,037	0,035	0,016	0,010	0,004	0,002
2	Плотность, г/см^3	1,74	1,75	1,79	1,83	1,87	1,93
	Коэффициент фильтрации, м/сут	0,009	0,008	0,007	0,002	0,002	0,001
3	Плотность, г/см^3	1,66	1,68	1,73	1,78	1,83	1,90
	Коэффициент фильтрации, м/сут	0,015	0,012	0,008	0,005	0,004	0,002

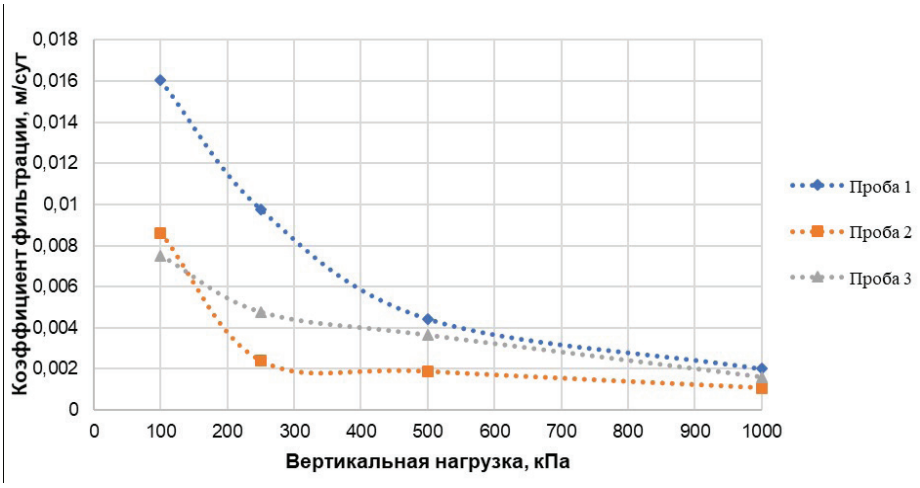
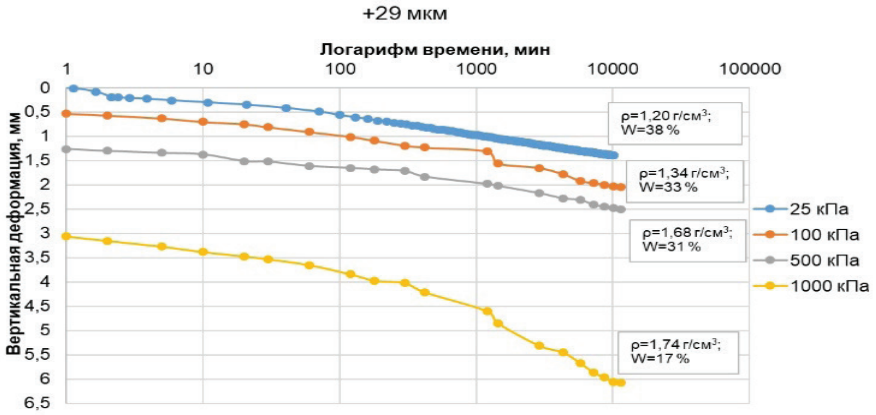


Рис. 3. График зависимости коэффициента фильтрации от вертикальной нагрузки [составлено авторами]

Fig. 3. Graph of dependence of filtration coefficient on vertical load [compiled by the authors]

а



б

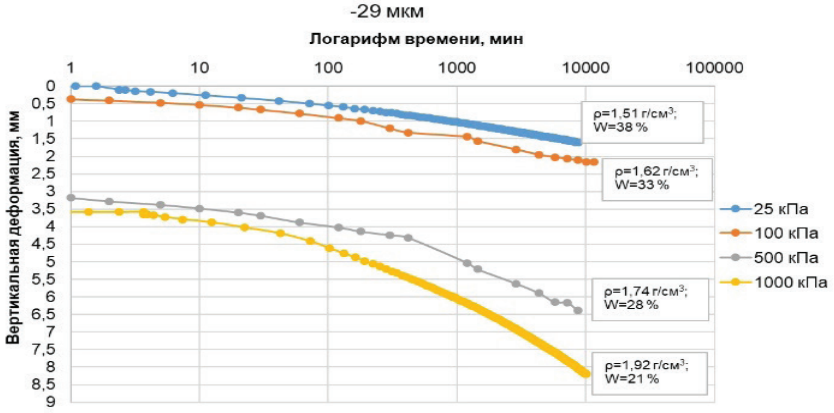


Рис. 4. Консолидационные кривые гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты при различных ступенях давления для пробы 1 (а) и пробы 2 (б) (длительность консолидации 7 дней) [составлено авторами]
Fig. 4. Consolidation curves of gypsum-containing waste from sulphuric acid neutralisation at different pressure stages for sample 1 (a) and sample 2 (b) (consolidation duration 7 days) [compiled by the authors]

дней. Несмотря на продолжительность испытаний, на полученных графиках нет возможности определить момент перехода первичной консолидации во вторичную, что осложняет задачу определения коэффициента первичной консолидации. В работе [24] говорится, что скорость деформирования за счет ползучести на порядки ниже, чем скорость фильтрационной консолидации, при этом деформации ползучести могут проявляться в течение длительного времени — от нескольких недель до месяцев.

Результаты лабораторных испытаний с использованием крыльчатки для разных по плотности проб представлены на графике на рис. 5, где у каж-

дой разновидности видна линейная зависимость между плотностью сложения грунта и его сопротивлением недренированному сдвигу.

Результаты испытаний проб на одноплоскостной срез представлены на рис. 6. На рис. 7 показаны результаты трехосного и одноосного сжатия и простой сдвиг.

По испытаниям на одноплоскостной срез по КД-схеме угол внутреннего трения для нормально уплотненного ГСО нейтрализации серной кислоты равен 32^0 (проба 1), 31^0 (проба 2), 27^0

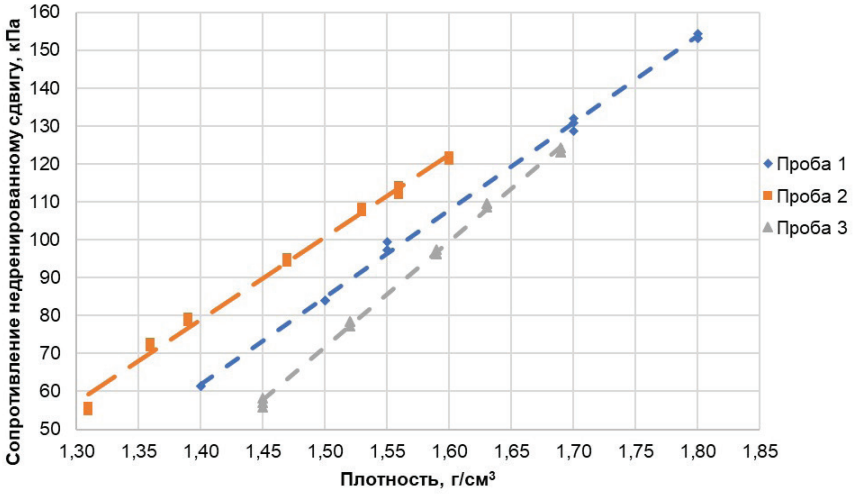


Рис. 5. Изменение сопротивления недренированному сдвигу в зависимости от плотности сложения [составлено авторами]
Fig. 5. Variation of undrained shear resistance as a function of packing density [compiled by the authors]

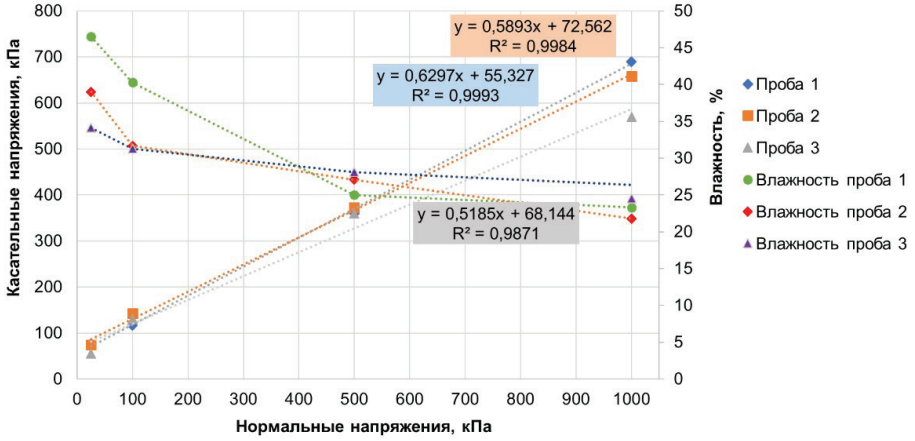


Рис. 6. График зависимости касательных напряжений от нормальных по результатам одноплоскостного среза по схеме КД (проба 1–3) [составлено авторами]
Fig. 6. Graph of the dependence of tangential stresses on normal stresses based on the results of single-plane shearing according to the CD scheme (samples 1–3) [compiled by the authors]

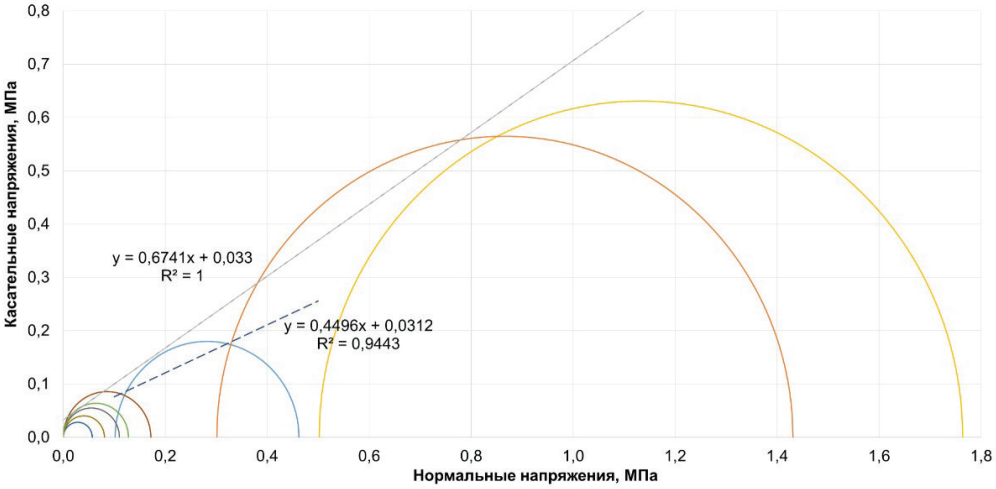


Рис. 7. Зависимость касательных напряжений от нормальных напряжений для гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты (проба 2) по результатам испытаний на трехосное, одноосное сжатие и простой сдвиг [составлено авторами]
Fig. 7. Dependence of tangential stresses from normal stresses for gypsum-containing waste of sulphuric acid neutralisation (sample 2) according to the results of triaxial, uniaxial compression and simple shear tests [compiled by the authors]

(проба 3), а удельное сцепление соответственно равняется 55 кПа (проба 1), 73 кПа (проба 2) и 68 кПа (проба 3). При этом по графику изменения влажности наблюдается существенное снижение влажности до нагрузок 0,5 МПа, что коррелирует с данными компрессионных испытаний.

По результатам испытаний предварительно уплотненных образцов пробы 2, как наиболее дисперсного материала, на трехосное сжатие по КД-схеме и одноосное сжатие позволяют оценить эффективные параметры прочности, такие как угол внутреннего трения — 34 градуса, сцепление — 33 кПа. Прочность на одноосное сжатие при этом получена в диапазоне 0,12–0,17 МПа, что хорошо соотносится с данными вращательного среза для соответствующей плотности. Дополнительно приведены результаты испытания на простой сдвиг для пробы 1, где угол внутреннего трения получен 24^0, а сцепление 31 кПа.

Обсуждение результатов

По результатам определения гранулометрического состава во всех пробах преобладает фракция 0,05–0,01 мм (54–79% по ареометрическому и пипеточному методам), что указывает на высокую дисперсность и однородность материала. Рассматриваемый материал в исходном состоянии осадка пульпы обладает текучей консистенцией, а при нагрузках вначале быстро отдает воду, сильно сжимается, но в дальнейшем при уплотнении становится слабоводопроницаемым.

В качестве основного метода определения гранулометрического состава необходимо использовать ареометрический метод по ГОСТ 12536–2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава», применяемый в практике инженерно-геологических исследований, а метод лазерной дифракции — в качестве вспо-

могательного. При этом для седиментационных методов определения гранулометрического состава необходимо обратить внимание на этап пробоподготовки образцов [25]. В частности, при добавлении в суспензию декагидрата пирофосфата натрия ($Na_4P_2O_7$*$10H_2O$) происходит частичное растворение гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) с образованием растворимого комплекса $CaP_2O_7^{2-}$, что искажает реальный гранулометрический состав [26, 27].

Наличие кристаллов гипса таблитчатой, игольчатой и столбчатой формы, а также ксеноморфных обломочных зерен обуславливает высокую пористость и сжимаемость материала. При этом распределение материала по фракциям может вызвать фракционирование при намыве гипса с формированием пляжной, переходной и прудковой зон с различными характеристиками не только состава, но и физико-механических свойств [28, 29]. Низкие значения коэффициента фильтрации (<0,3 м/сут) классифицируют материал от неводопроницаемого до слабопроницаемого. Полученный в ходе исследований гранулометрический состав определяет низкие параметры фильтрационных свойств двуводного гипса после уплотнения при нагрузках 0,3–0,4 МПа, что будет оказывать влияние на процессы консолидации при его намыве в гипсохранилище. При этом кривые консолидации ГСО не демонстрируют четкого перехода между первичной и вторичной стадиями, что свидетельствует о длительных деформациях ползучести. Это важно учитывать при проектировании сооружений с использованием данного материала [30, 31].

Результаты определения параметров механических свойств показывают существенное влияние уплотнения материала на их значения, что характерно для всех ГСО, а также то, что прочностные характеристики зависят от гранулометрического состава материала и условий испытаний [32, 33]. Так, наибольшее значение угла внутреннего трения — 35° зафиксировано при трехосном сжатии, а по результатам простого сдвига параметры существенно ниже, что обусловлено различиями в напряженном состоянии образцов и методике испытаний. Следует отметить, что полученные при исследованиях прочностных свойств ГСО нейтрализации серной кислоты характеристики были определены для предварительно уплотненных образцов и в основном по КД-схеме. Поскольку ГСО является сильно сжимаемым материалом, то при обосновании устойчивых параметров будущих объектов складирования другой возможности провести испытания нет. При этом как быстро будет происходит уплотнение ГСО в массиве и какой плотности достигнет материал, можно будет определить только по данным геотехнического мониторинга уже на этапе функционирования сооружения в процессе исследований для наращивания высоты накопителя перед отсыпкой ограждающих дамб, и только так оценивать возможность улучшения свойств ГСО со временем [34, 35]. В этой связи до значений 0,3–04 МПа для оценки прочностных свойств рекомендуется использовать данные определения сопротивления недренированному сдвигу, а для оценки консолидации массива — применять контроль порового давления на основе данных мониторинга по стационарно установленным датчикам или на основе диссипационных испытаний в процессе статического зондирования.

Заключение

По результатам исследований можно сделать вывод, что получаемый при

нейтрализации серной кислоты известняком двуводный гипс — это дисперсный искусственно образованный грунт, обладающий специфическими свойствами, обусловленными его минералогическим и гранулометрическим составом. Прежде всего, особенность поведения данного вида ГСО заключается в сильной сжимаемости материала на протяжении длительного времени и существенном уменьшении коэффициента фильтрации. Значения коэффициента фильтрации (порядка 10^{-3} м/сут) означают, что в данном материале возможно возникновение избыточного порового давления, которое может не успевать рассеиваться за период нагружения массива при интенсивном наращивании высоты накопителя.

Действующие методики по изучению природных грунтов не учитывают данные специфические особенности при рассмотрении такого вида материала. Также необходимо дополнительное изучение температуры потери кристаллизационной воды для более точного определения влажности конкретного материала, а при проведении анализа для определения гранулометрического состава необходимо уделять внимание этапу пробоподготовки из-за склонности материала к агрегации, что может повлиять на характеристику водопроницаемости ГСО. Поэтому для безопасного складирования и использования данного материала необходимы адаптация методов исследования для техногенных грунтов в зависимости от их происхождения и состава, а также обязательный деформационный и гидрогеомеханический мониторинг накопителя ГСО в процессе его формирования и эксплуатации.

Вклад авторов:

Поспехов Г. Б. — написание текста статьи, генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, анализ результатов исследования.

Изотова В. А. — написание текста статьи, систематизация материала, проведение исследования, анализ результатов исследования и подготовка данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ларионова Н. А.* Использование промышленных отходов в качестве вторичного минерального сырья для получения строительных материалов с заданными свойствами. — М.: ГеоИнфо, 2017. — 500 с.

2. *Горькова И. М.* Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. — М.: Стройиздат, 1975. — 151 с.

3. *Карапетян К. Г.*, *Дорош И. В.*, *Згонник П. В.*, *Коршунов А. Д.*, *Перина А. И.* Сорбенты на основе вспененного фосфатного стекла для сбора нефтепродуктов с загрязнённых почв и водных поверхностей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — Т. 335. — № 8. — С. 227–240. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4484.

4. *Данильев С. М.*, *Мулев О. М.*, *Шнюкова О. М.* Корреляционно-регрессионный анализ активности естественной электромагнитной и акустической эмиссии в образцах горных пород Октябрьского месторождения // Горный журнал. – 2024. — № 9. — С. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08.

5. *Огородникова Е. Н.*, *Николаева С. К.*, *Ван Ч.* Намывные грунты и управление их свойствами. — М.: Российский университет дружбы народов, 2014. – 368 с.

6. *Зиангиров Р. С.*, *Черняк Э. Р.* Инженерно-геологические свойства нефелиновых песков — отвалов апатито-нефелинового производства в связи с их складированием // Инженерная геология. — 1979. — Вып. 5. — С. 66–77.

7. *Кутепов Ю. И.*, *Кутепова Н. А.* Техногенез намывных отложений // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2003. – № 5. — С. 405–413.

8. *Прокудина Е. В.*, *Тропников Д. Л.*, *Каратаев А. В.*, *Шукшина О. В.* Нейтрализация технической серной кислоты природным известняком на ОАО «Святогор» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 8. — С. 340–345.

9. *Взородов С. А.* Особенности процесса нейтрализации технической серной кислоты природным известняком // Бутлеровские сообщения. — 2019. — Т. 58. — № 4. — С. 110–118.

10. *Леонтьев Л. И.* Экологические проблемы «Норильского никеля» и возможные пути их решения // Экология и промышленность России. — 2017. — Т. 21. — № 2. — С. 15–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-2-15–19.

11. *Лысухо Н. А.*, *Ерошина Д. М.* Отходы производства и потребления, их влияние на природную среду. — М.: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2011. — 210 с.

12. *Кудашов Е. С.* Оценка инженерно-геологических условий намывных гипсонакопителей // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 2013. — Т. 270. – С. 77–84.

13. *Саенко Ю. В.*, *Ширанов А. М.*, *Невзоров А. Л.* Механические свойства фосфогипса и возможные направления его утилизации // Construction and Geotechnics. — 2021. — Т. 12. — № 3. — С. 84–93. DOI: 10.15593/2224–9826/2021.3.09.

14. *Avşar E.* An experimental investigation of shear strength behavior of a welded bimrock by meso-scale direct shear tests // Engineering Geology. 2021, no. 294, 106321. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106321.

15. *Комаров А. А.*, *Короб Н. Г.*, *Романовский В. И.* Синтез дигидрата сульфата кальция из техногенного сырья // Вестник Полоцкого государственного университета. *Серия F.* Строительство. Прикладные науки. — 2021. – Вып. 16. — С. 76–82.

16. *Wu P.*, *Liu X.*, *Liu X.*, *Zhang Z.*, *Wei C.* Effect of industrial byproduct gypsum on the mechanical properties and stabilization of hazardous elements of cementitious materials: A Review // Materials. 2024, no. 17, 4183. https://doi.org/10.3390/ma17174183.

17. *Лебедев В. А.*, *Федоткина А. Н.* Классификация технологий по извлечению геотермальной теплоты // Горная промышленность. — 2025. — № 2. — С. 176–183. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-176–183.

18. Chen Qiuju, Ding Wenjin, Sun Hongjuan, Peng Tongjiang. Synthesis of anhydrite from red gypsum and acidic wastewater treatment // Journal of Cleaner Production. 2021, no. 278, 124026. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124026.

19. *Geraldo R. H.*, *Pinheiro S. M.* M., *Silva J. S.*, *Andrade H. M.* C., *Dweck J.*, *Gonçalves J. P.*, *Camarini G.* Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution // Journal of Cleaner Production. 2017, no. 164, pp. 288–300. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.188.

20. *Болдырев Г. Г.* Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. — Пенза: ПГУАС, 2008. — 696 с.

21. *Atkinson J. H.* and *Bransby P. L.* The Mechanics of Soils: an Introduction to Critical State Soil Mechanics. — McGraw-Hill Book Co., 1978, 375 p.

22. *Ковалевский В. Н.*, *Мысин А. В.*, *Сушкова В. И.* Теоретические аспекты блочного метода взрывной отбойки блочного камня // Горная наука и технологии (Россия). — 2024. — № 9(2). — С. 97–104. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12–187.

23. *Skempton A. W.* The Pore Pressure Coefficients A and B. Geotechnique. 1954, no. 4, pp. 143–147. https://doi.org/10.1680/geot.1954.4.4.143.

24. *Федоренко Е. В.* Интерпретация результатов испытаний при определении прочностных характеристик грунтов. История и состояние вопроса // Грунтоведение. — 2023. — № 1(20). — С. 34–46. DOI: 10.53278/2306-9139-2023-1-20–34–46.

25. *Gee G. W.*, *Bauder J. W.* Particle-size analysis // Methods of Soil Analysis: Part 1. SSSA Book Series 5.1, 1986, pp. 383–411.

26. *Ryzak M.* Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser-diffraction method // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2011, no. 174, pp. 624–633.

27. *Иванков С. И.*, *Шубов Л. Я.*, *Троицкий А. В.* Рациональные запатентованные технологии переработки и утилизации твердых промышленных отходов. Обзор. Часть 1 // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. — 2021. — № 5. — С. 2–100. DOI: 10.36535/0869-1002-2021-05–1.

28. *Кутепов Ю. Ю.*, *Карасев М. А.* Изучение и прогноз уплотнения фосфогипса в отвалах для обоснования их вместимости // Горный журнал. — 2023. — № 5. – С. 61–67. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.09.

29. *Маринин М. А.* Расчет параметров буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав взорванной горной массы при открытой разработке месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. — 2025. — № 3. — С. 78–85. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.10.

30. *Petrakov D. G.*, *Karmanskiy D. A.* Comparison of Analytical and Experimental Methods for Determining Dependency of Permeability of Clayey Sandstones on Effective Pressure // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2025, no. 38 (11), pp. 2502–2510. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.03.

31. *Tabish R.*, *Yang Z.*, *Wu L.*, *Xu Z.*, *Cao Z.*, *Zheng K.*, *Zhang Y.* Predicting the settlement of mine waste dump using multi-source remote sensing and a secondary consolidation m odel // Frontiers in Environmental Science. 2022, vol. 10, article 885346. DOI: 10.3389/fenvs.2022.885346.

32. *Басалаева П. В.*, *Куранов А. Д.* Оценка влияния угла падения литологически неоднородной прослойки пород на устойчивость горизонтальной горной выработки при ее проходке // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 3. — С. 17–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17.

33. *Bayatanova L.*, *Rakhadilov B.*, *Kengesbekov A.*, *Kylyshkanov M.*, *Abdulina S.*, *Adilkanova M.*, *Sagdoldina Z.* Production of anhydrite binder from waste fluorangydrite // ChemEngineering. 2023, no. 7, p. 28. https://doi.org/10.3390/chemengineering7020028.

34. *Коробанова Т. Н.* Изучение прочностных характеристик техногенных пород отвала БФ АО «Апатит» // Успехи современной науки и образования. — 2016. — Т. 7. — № 11. — С. 113–117.

35. *Karasev M.*, *Astapenka T.* Assessment of the Influence of Formation Conditions of Embankments and Spoil Heaps on Their Stability When Dumped on Clay-Salt Slurries // Eng. 2025, no. 6 (1), p. 2. https://doi.org/10.3390/eng6010002. ГИАБ

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Поспехов Георгий Борисович — заведующий лабораторией моделирования Научного центра геомеханики и проблем горного производства, кандидат геолого-минералогических наук, https://orcid.org/0000-0001-9090-5150, 199106, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., 2, Россия, e-mail: pospehov@spmi.ru;

Изотова Виолетта Андреевна — аспирант кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, https://orcid.org/0000-0003-4202-4767, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., 2, Россия, телефон: +79112764538, e-mail: s185021@stud.spmi.ru.

Для контактов: *Изотова Виолетта Андреевна*, e-mail: s185021@stud.spmi.ru.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Larionova N. A. Utilisation of industrial wastes as secondary mineral raw materials for obtaining building materials with specified properties. Moscow: GeoInfo, 2017, 500 p. [In Russ].

2. Gorkova I. M. Physico-chemical studies of dispersed sedimentary rocks for construction purposes. Stroyizdat: Moscow, 1975, 151 p. [In Russ].

3. Karapetyan K. G.; Dorosh I. V., Zgonnik P. V., Korshunov A. D., Perina A. I. Sorbents on the basis of foamed phosphate glass for oil products collection from the polluted soil and water surfaces). *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2024, vol. 335, no. 8. pp. 227–240. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4484.

4. Daniliev S. M., Mulev O. M., Shnyukova O. M. Correlation and regression analysis of natural electromagnetic and acoustic emission activity in rock samples of the Oktyabrskoye deposit. *Mining journal*. 2024, no. 9, pp. 51–55. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08.

5. Ogorodnikova E. N., Nikolaeva S. K., Wang C. Bulk soils and management of their properties. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia. 2014, 368 p. [In Russ].

6. Ziangirov R. S., Chernyak E. R. Engineering-geological properties of nepheline sands dumps of apatite-nepheline production in connection with their storage. *Engineering Geology*. 1979, issue 5, pp. 66–77. [In Russ].

7. Kutepov Y. I., Kutepova N. A. Technogenesis of subgrade deposits. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2003, no. 5, pp. 405–413. [In Russ].

8. Prokudina E. V., Tropnikov D. L., Karataev A. V., Shukshina O. V. Neutralisation of technical sulphuric acid with natural limestone at JSC 'Svyatogor'. *Mining informational and analytical bulletin*. 2016, no. 8, pp. 340–345. [In Russ].

9. Vzorodov S. A. Features of the process of neutralisation of technical sulphuric acid by natural limestone. *Butler Communications*. 2019, vol. 58, no. 4, pp. 110–118. [In Russ].

10. Leontiev L. I. Environmental problems of 'Norilsk Nickel' and possible ways to solve them. *Ecology and Industry of Russia*. 2017, vol. 21, no. 2, pp. 15–19. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-2-15–19.

11. Lysukho N. A., Eroshina D. M. Production and consumption wastes, their impact on the natural environment. Moscow, A. D. Sakharov Moscow State University of Economics, 2011, 210 p. [In Russ].

12. Kudashov E. S. Evaluation of engineering-geological conditions of reclaimed gypsum accumulators. *Izvestiya VNIIG named after B. E. Vedeneev*. 2013, vol. 270, pp. 77–84. [In Russ].

13. Saenko Yu. V., Shiranov A. M., Nevzorov A. L. Mechanical properties of phosphogypsum and possible directions of its utilization. *Construction and Geotechnics*. 2021, vol. 12, no. 3, pp. 84–93. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224–9826/2021.3.09.

14. Avsar E. An experimental investigation of shear strength behaviour of a welded bimrock by meso-scale direct shear tests. *Engineering Geology*. 2021, no. 294 (106321). DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106321.

15. Komarov A. A., Korob N. G., Romanovsky V. I. Synthesis of calcium sulphate dihydrate from technogenic raw materials. *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied sciences*. 2021, issue 16, pp. 76–82. [In Russ].

16. Wu P., Liu X., Liu X., Zhang Z., Wei C. Effect of Industrial Byproduct Gypsum on the Mechanical Properties and Stabilisation of Hazardous Elements of Cementitious Materials: A Review. *Materials*. 2024, no. 17 (4183). https://doi.org/10.3390/ma17174183.

17. Lebedev V. A., Fedotkina A. N. Classification of technologies for extraction of geothermal heat. *Mining industry*. 2025, no. 2, pp. 176–183. [In Russ]. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-176–183.

18. Chen Qiuju, Ding Wenjin, Sun Hongjuan, Peng Tongjiang. Synthesis of anhydrite from red gypsum and acidic wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*. 2021, no. 278 (124026). DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124026.

19. Geraldo R. H., Pinheiro S. M. M., Silva J. S., Andrade H. M. C., Dweck J., Gonçalves J. P., Camarini G. Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*. 2017, no. 164, pp. 288–300. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.188.

20. Boldyrev G. G. Methods of determination of mechanical properties of soils. State of the question. Penza: PGUAS, 2008, 696 p. [In Russ].

21. Atkinson J. H. and Bransby P. L. The Mechanics of soils: an introduction to critical state soil mechanics. McGraw-Hill Book Co. 1978, 375 p.

22. Kovalevsky V. N., Mysin A. V., Sushkova V. I. Theoretical aspects of block stone blasting method. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, no. 9(2), pp. 97–104. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12–187.

23. Skempton A. W. The Pore Pressure Coefficients A and B. *Geotechnique*. 1954, no. 4, pp. 143–147. https://doi.org/10.1680/geot.1954.4.4.143.

24. Fedorenko E. V. Interpretation of test results in determining the strength characteristics of soils. History and state of the issue. *Soil Science*. 2023, no. 1 (20), pp. 34–46. [In Russ]. DOI: 10.53278/2306-9139-2023-1-20–34–46.

25. Gee G. W., Bauder J. W. Particle-size analysis. In Methods of Soil Analysis: Part 1. SSSA Book Series 5.1, 1986, pp. 383–411.

26. Ryzak M. Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser-diffraction method. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2011, no. 174, pp. 624–633.

27. Ivankov S. I., Shubov L. Y., Troitskiy A. V. Rational patented technologies of processing and utilisation of solid industrial waste. Review. Part 1. *Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection*. 2021, no. 5, pp. 2–100. [In Russ]. DOI: 10.36535/0869-1002-2021-05–1.

28. Kutepov Y. Y., Karasev M. A. Study and forecast of phosphogypsum compaction in dumps to substantiate their capacity. *Mining journal*. 2023, no. 5, pp. 61–67. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.09.

29. Marinin M. A. Calculation of drilling and blasting parameters for a given granulometric composition of the blasted rock mass at the open mining of mineral deposits. *Mining journal*. 2025, no. 3, pp. 78–85. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.10.

30. Petrakov D. G., Karmanskiy D. A. Comparison of analytical and experimental methods for determining dependency of permeability of clayey sandstones on effective pressure. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025, no. 38 (11), pp. 2502–2510. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.03.

31. Tabish R., Yang Z., Wu L., Xu Z., Cao Z., Zheng K., Zhang Y. Predicting the settlement of mine waste dump using multi-source remote sensing and a secondary consolidation model. *Frontiers in Environmental Science*. 2022, vol. 10 (885346). DOI: 10.3389/fenvs.2022.885346.

32. Basalaeva P. V., Kuranov A. D. Assessment of the influence of the angle of incidence of lithologically heterogeneous rock layer on the stability of horizontal mine workings during its sinking. *Mining informational and analytical bulletin*. 2024, no. 3, pp. 17–30. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17.

33. Bayatanova L., Rakhadilov B., Kengesbekov A., Kylyshkanov M., Abdulina S., Adilkanova M., Sagdoldina Z. Production of anhydrite binder from waste fluorangydrite. *ChemEngineering*. 2023, no. 7 (28). https://doi.org/10.3390/chemengineering7020028.

34. Korobanova T. N. Study of strength characteristics of anthropogenic rocks of the dump of BPF of JSC Apatit. *Successes of modern science and education*. 2016, vol. 7, no. 11, pp. 113–117. [In Russ].

35. Karasev M., Astapenka T. Assessment of the Influence of Formation Conditions of Embankments and Spoil Heaps on Their Stability When Dumped on Clay-Salt Slurries. *Eng*. 2025, no. 6 (1), p. 2. https://doi.org/10.3390/eng6010002.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pospehov G. B., PhD (geological-mineralogical sciences), Head of the laboratory of modelling, research centre of geomechanic and mining issues, https://orcid.org/0000-0001-9090-5150,199106, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 21st lin. V. O., 2, Russia, e-mail: pospehov@spmi.ru;
Izotova V. A., postgraduate student, Engineering geology and hydrogeology department, https://orcid.org/0000-0003-4202-4767, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 21st lin. V. O., 2, Russia, e-mail: s185021@stud.spmi.ru.
For contact: *Izotova V. A.*, email: s185021@stud.spmi.ru.
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Получена редакцией 31.07.2025; получена после рецензии 02.10.2025; принята к печати 10.10.2025.
Received by the editors 31.07.2025; received after the review 02.10.2025; accepted for printing 10.10.2025.