

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ФОСФОГИПСА С ПРИМЕСЯМИ НЕФЕЛИНОВОГО ШЛАМА В КОНСТРУКЦИЯХ ОГРАЖДАЮЩИХ ДАМБ ГИПСОНАКОПИТЕЛЕЙ

Н.А. Кутепова<sup>1</sup>, Ю.И. Кутепов<sup>1</sup>, Е.С. Кудашов<sup>1</sup>, С.М. Данильев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: eskudashov@mail.ru

**Аннотация:** Рассмотрен вопрос об использовании фосфогипса и его смесей с отходами глиноземного производства для строительства ограждающих дамб гипсонакопителей. Вопрос актуален для ряда крупных предприятий химической промышленности. Отмечается необходимость формирования информационной базы данных о физико-механических свойствах фосфогипса в конструкциях ограждающих дамб для разработки технических требований к фосфогипсу, используемому в гидротехническом строительстве. Применительно к условиям гипсонакопителя АО «Метаким» (г. Волхов Ленинградской области) выполнена оценка фосфогипса и нефелинового шлама на предмет соответствия требованиям гидротехнического проектирования, в том числе получены регламентируемые проектом показатели качества укладки фосфогипсового материала в тело ограждающих дамб — оптимальная влажность, максимальная плотность, и соответствующие им параметры прочности. Приведена инженерно-геологическая оценка техногенных грунтов в теле пригруза на дамбе гипсонакопителя, полученная по результатам бурения скважин, полевых и лабораторных исследований. Выделены основные факторы, определяющие физико-механические свойства фосфогипса и его смесей с нефелиновым шламом в теле пригруза. Установлена зависимость параметров сопротивления сдвигу фосфогипсового материала от процентного содержания в нем нефелинового шлама и степени обводнения. Рекомендуются при разработке проектных решений предусматривать мероприятия, предотвращающие водонасыщение фосфогипса в теле дамб в процессе эксплуатации гипсонакопителей.

**Ключевые слова:** гипсонакопитель, ограждающие дамбы, фосфогипс, нефелиновый шлам, техногенные грунты, качество укладки, инженерно-геологические исследования, лабораторные и натурные методы, оптимальная влажность, максимальная плотность, прочностные свойства, влияние обводненности.

**Для цитирования:** Кутепова Н. А., Кутепов Ю. И., Кудашов Е. С., Данильев С. М. Изучение прочности фосфогипса с примесями нефелинового шлама в конструкциях ограждающих дамб гипсонакопителей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 67–78. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-67-78.

### Strength of phosphogypsum mixed with nepheline slime in construction of embankments of gypsum ponds

N.A. Kutepova<sup>1</sup>, Yu.I. Kutepov<sup>1</sup>, E.S. Kudashov<sup>1</sup>, S.M. Daniliev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: eskudashov@mail.ru

---

**Abstract:** The article discusses application of phosphogypsum and its mixtures with alumina plant waste in construction of embankments of gypsum ponds. This is a live issue in the chemical industry. Development of specifications for phosphogypsum to be used in waterworks construction requires compilation of databases on physical and mechanical properties of this material. In terms of Metakhim's gypsum pond (Volkhov, Leningrad Region), the conformity of phosphogypsum and nepheline slime with waterworks design standards is evaluated, and the quality performance of phosphogypsum in bodies of embankments as per project requirements is determined in terms of optimal moisture content, maximum density and strength. The engineering geological estimation of mining waste used as tightening weight of a dam of a gypsum pond is obtained using drilling records, field studies and laboratory test data. The main determinative factors of the physical and mechanical properties of phosphogypsum and its mixtures with nepheline slime in the body of tightening weight are identified. It is found that shear resistance of phosphogypsum depends on percentage of nepheline slime and on moisture content. It is recommended that project designs include activities aimed to prevent water saturation of phosphogypsum in embankments of operating gypsum ponds.

**Key words:** gypsum pond, embankment, phosphogypsum, nepheline slime, manmade soil, piling quality, engineering geological survey, field studies and laboratory tests, optimal moisture content, maximal density, strength characteristics, water content effects.

**For citation:** Kutepova N.A., Kutepov Yu. I., Kudashov E. S., Daniliev S. M. Strength of phosphogypsum mixed with nepheline slime in construction of embankments of gypsum ponds. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(10):67-78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-67-78.

---

## Введение

Вопрос об использовании фосфогипса для строительства ограждающих дамб гипсонакопителей на сегодняшний день является актуальным для ряда крупных предприятий АО «ФосАгро» и «ЕвроХим», занимающихся переработкой апатитового сырья для производства фосфорной кислоты и минеральных удобрений. Фосфогипс — побочный продукт основного производства — получают на данных предприятиях в больших объемах и складировуют на длительное хранение гидравлическим способом в специальные инженерно-технические сооружения, называемые гипсонакопителями или шламонакопителями. Использование фосфогипса для наращивания дамб вместо привозного грунта экономически выгодно ввиду сокращения затрат на покупку и транспортировку последнего. Освобождение старых карт от накопленного фосфогипса дает возможность их повторного использо-

вания, что исключает необходимость строительства новых карт и приобретение под них земельных отводов.

Технические характеристики фосфогипса применительно к его использованию в различных областях инженерной практики хорошо изучены благодаря работам отечественных и зарубежных специалистов [1 — 7]. В Российской Федерации фосфогипс используют в основном в дорожном деле [8]. В 2017 г. Федеральное дорожное агентство зарегистрировало стандарт организации (СТО) [9], позволяющий широко применять технический гипс (фосфогипс) при строительстве дорог с учетом экологической безопасности материала и экономической эффективности технологии. Указанный стандарт устанавливает технические требования к фосфогипсу дорожному, правила производства строительных работ и контроля их выполнения. Применительно к условиям строительства ограждающих дамб

гипсонакопителей из фосфогипса по-добных стандартов или специальных технических условий (СТУ) не имеется.

Разработка нормативных документов, устанавливающих требования к вещественному составу и физико-механическим характеристикам фосфогипса, технологиям строительства ограждающих дамб, учитывающим особенности условий эксплуатации гипсонакопителей как гидротехнических объектов, станет возможной только при формировании достаточной информационной базы, обобщающей результаты изыскательских и научно-исследовательских работ на разных предприятиях. Сегодня проектирование дамб из фосфогипса осуществляется на основании инженерных изысканий, материалы которых доступны, как правило, ограниченному кругу специалистов. В этой связи весьма важными являются публикации в открытой печати, содержащие фактические сведения об условиях эксплуатации гипсонакопителей с инженерно-геологической оценкой фосфогипса в конструкциях ограждающих дамб.

Сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета в 2012–2014 гг. выполнялись инженерно-геологические исследования по обоснованию возможности использования намывного фосфогипса для строительства ограждающих дамб гипсонакопителя АО «Метакхим» (г. Волхов Ленинградской области). Результаты исследований отражены в диссертационной работе [10] и ряде статей в доступных изданиях [11, 12]. Последующие работы на данном объекте показали, что вещественный состав отсыпаемого в дамбы материала может отличаться от исследованного чистого фосфогипса из-за наличия примесей других производственных отходов. Вопрос о возможном использовании в гидротехническом строительстве фосфогипса с различными добавками и примесями

ранее не рассматривался. Поэтому в настоящей статье приводятся сведения о характере влияния примесей нефелинового шлама на физико-механические свойства фосфогипса, которые могут представлять интерес для проектных организаций.

### **Характеристика объекта исследований**

Объектом исследования настоящей работы является гипсонакопитель АО «Метакхим». Это накопитель равнинного типа с четырехсторонним обвалованием, по способу заполнения – намывной, введен в эксплуатацию в 1969 г. Площадь сооружения 70 га. Его емкость образована дамбой первичного обвалования и несколькими дамбами наращивания, возводимыми поэтапно посредством укладки грунтового (первые 6,5 м), а затем фосфогипсового материала на поверхность намытого пляжа. На момент исследований высота ограждающих дамб составляла 23–24 м. Чаша гипсонакопителя разделена на две секции, одна из которых площадью 43 га находится в эксплуатации, другая осушена и разрабатывается как карьер фосфогипса для наращивания дамб действующей секции.

Для увеличения вместимости действующей секции накопителя разработан проект наращивания ограждающих дамб до высоты 29,5 м, предусматривающий на первом этапе укрепление существующих дамб с помощью пригруза низовых откосов (контрфорса). В соответствии с проектными решениями пригруз был отсыпан в виде узкопрофильной насыпи длиной 1,5 км, высотой 5–7 м и шириной поверху около 10 м. Применена технология послойной укладки материала с укаткой каждого слоя ходовыми частями груженых автосамосвалов. Материалом для отсыпки послужил намывной фосфогипс,

отобранный из недействующей секции гипсонакопителя, смешанный с нефелиновым шламом в разных пропорциях (не нормировано). Нефелиновый шлам взят из старого осушенного накопителя, эксплуатация которого производилась в период функционирования глиноземного производства (АО «Метахим» является приемником Волховского алюминиевого завода).

### **Соответствие техногенного материала нормам гидротехнического проектирования**

Для данного объекта выполнено изучение фосфогипса, чистого и в смеси с нефелиновым шламом, на предмет соответствия требованиям гидротехнического проектирования [13, 14], предъявляемым к материалам грунтовых плотин (дамб) в части его растворимости и качества укладки в сооружения.

Фосфогипс — искусственно полученный мономинеральный материал, почти на 95% представленный природным минералом гипсом — дигидратом сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) с механической примесью фосфатов (1–1,5% в пересчете на  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), некоторого количества кремнезема и других оксидов. Растворимость гипса в пресной воде оценивается 2 г/л, что составляет 0,2% от массы фосфогипса; количество водорастворимых компонентов в фосфогипсе не выходит за пределы норм, установленных СП 39.13330.2012 [13] для плотин из грунтовых материалов (не более 10% по массе), что позволяет его использование в конструкциях дамб гипсонакопителей.

По прочностным свойствам фосфогипс не уступает естественным дисперсным песчано-глинистым грунтам, используемым для строительства плотин и дамб гидротехнических объектов [10–12].

Нефелиновый шлам является отходом комплексной переработки нефелиновой руды при глиноземном производстве. Он представляет собой песчаный продукт, состоящий на 80–85% из двухкальциевого силиката ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), не содержит водорастворимых компонентов. При уплотнении во влажном состоянии нефелиновый шлам проявляет способность к консолидации в монолитный водостойкий материал и набору прочности во времени. Благодаря вяжущим свойствам нефелиновый шлам используется в качестве добавок в инженерном деле как материал дорожного основания, придающий последнему повышенную прочность, морозостойкость, деформативность и трещиностойкость [15–17]. Нефелиновый шлам не содержит в существенных количествах токсичных химических элементов, относится 5-му классу опасности (неопасные отходы) по «Критериям отнесения отходов к классу опасности для окружающей природной среды» [15, 18], что позволяет его использование в качестве строительного материала на таких объектах, как полигоны складирования производственных отходов.

В соответствии с требованиями СП 45.13330.2012 [14] при разработке проектных решений возведения дамб должна быть обоснована технология укладки грунтового материала с заданными физико-механическими характеристиками. Укладку материала в тело дамб следует производить с регламентированной степенью уплотнения, добиваясь максимальной плотности грунта. Степень уплотнения контролируется коэффициентом уплотнения  $k_{\text{com}} = \rho_{\text{d факт}} / \rho_{\text{d max}}$  — отношением фактической плотности сухого грунта ( $\rho_{\text{d факт}}$ ) в насыпи к максимальной плотности того же сухого грунта ( $\rho_{\text{d max}}$ ). Определение оптимальных характеристик влажности ( $W_{\text{opt}}$ ), плотности ( $\rho_{\text{max}}$ ) и плотности

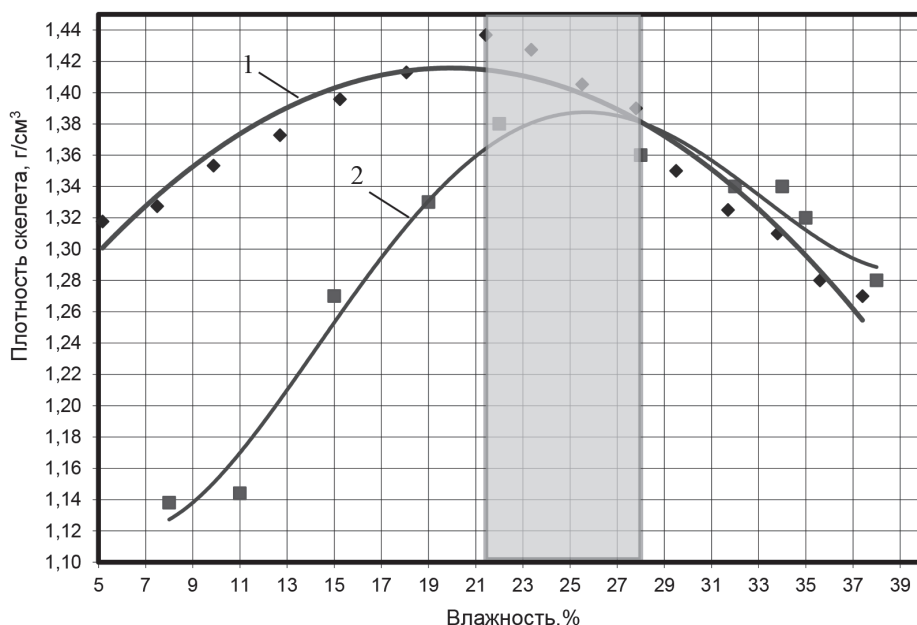


График зависимости плотности скелета от влажности фосфогипса чистого (1) и в смеси с нефелиновым шламом (2) по результатам стандартного уплотнения; серой областью обозначен диапазон оптимальных значений влажности

Graph of soil skeleton density as function of moisture content of pure phosphogypsum (1) and its mixture with nepheline sludge (2) after standard compacting; shadowed domain defines optimal moisture content range

сухого грунта ( $\rho_{d \max}$ ) фосфогипса проводилось методом стандартного уплотнения по методике ГОСТ 22733-2016 [19] с использованием автоматического компрессора «ELE» — устройства для механизированного уплотнения грунта молотом, падающим с постоянной высоты.

Результаты опытов показали, что максимальные значения плотности и плотности сухого грунта, равные для исследованного чистого фосфогипса  $\rho_{d \max} = 1,68 \div 1,74 \text{ г/см}^3$  и  $\rho_{d \max} = 1,38 \div 1,36 \text{ г/см}^3$ , достигаются при влажности  $22 \div 28\%$ , а параметры сопротивления сдвигу при данных плотностях варьируются в пределах  $36 \div 37 \text{ кПа}$  — для сцепления ( $c$ ),  $36 \div 380$  — для угла внутреннего трения ( $\varphi$ ) [10]. Испытания смесей фосфогипса с нефелиновым шламом (20%) показали, что максимальной плотностью для данного материала является значе-

ние  $\rho_{d \max} = 1,73 \text{ г/см}^3$  или соответствующее ему значение плотности скелета грунта  $\rho_{d \max} = 1,44 \text{ г/см}^3$ , достигаемые в ходе стандартного уплотнения при оптимальной влажности  $W_{\text{opt}} = 21,4\%$ . Данные показатели незначительно разнятся с полученными для образцов чистого фосфогипса (рисунки).

### Методика исследований

Оценка качества укладки фосфогипсового материала в тело пригруза ограждающих дамб на гипсонакопителе АО «Метаким» производилась посредством выборочного геотехнического контроля, в состав которого входило бурение 14 инженерно-геологических скважин на полную мощность пригруза с отбором монолитов (70 шт) и последующим их испытанием в лаборатории, полевые исследования тела пригруза с использованием статического зондирования

(14 точек) и геофизических методов. Лабораторные исследования включали определение гранулометрического состава, показателей физического состояния и параметров прочностных свойств, требуемых для расчетов устойчивости дамб гипсонакопителя. Оценка физических характеристик фосфогипсового грунта выполнялась по стандартным лабораторным методикам ГОСТ 5180-2015 [20], при этом влажность определялась высушиванием при температуре 80 °С во избежание испарения кристаллизационной воды, как рекомендовано для гипсосодержащих грунтов. Прочностные характеристики фосфогипса определялись методом одноплоскостного сдвига по схеме неконсолидированно-недренированного (быстрого) сдвига в соответствии с рекомендациями ГОСТ 12248-2010 [21]. Испытания производились при трех ступенях вертикальных напряжений, максимальная из которых соответствовала напряжению от веса вышележащих грунтов в точке отбора образца (бытовой нагрузке).

Статическое зондирование выполнялось на базе гидравлической многоцелевой буровой установки GM 200 с использованием зонда ENVI МетоCone с коническим фильтрующим наконечником, позволяющим производить измерения лобового сопротивления ( $q$ ), сопротивления муфты трения ( $f$ ), значений порового давления ( $u$ ). Метод использовался для установления границ между слоями различных разновидностей насыпных грунтов и уточнения положения уровня воды (УВ) в теле пригруза (по поровому давлению).

Геофизические исследования проводились методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с использованием аппаратного комплекса «ERA-MAX», который включает в себя измеритель, генератор, позволяющий устанавливать необходимую рабочую

частоту и ток питающей линии. Данный метод использовался для построения кривых ВЭЗ, в результате интерпретации которых были определены мощность и глубина залегания слоев с различными значениями удельных электрических сопротивлений.

### **Результаты исследований**

По данным бурения насыпные грунты пригруза на изученную глубину 5 м представлены разнородным материалом техногенного происхождения. Основным породообразующим материалом пригруза является порошкообразный фосфогипс белого и сероватого цвета, комковатый, слабо структурированный, от маловлажного (выше уровня воды — УВ) до влажного и текучего (ниже УВ). В чистом виде (визуально) фосфогипс встречается редко, в основном он присутствует с примесями и включениями. В качестве примесей содержится зернистое и пылеватое вещество — нефелиновый шлам, придающий грунту розоватый, бежевый (коричневатый) оттенки. Включения в насыпном грунте представлены крупнообломочными фракциями — щебнем и дресвой прочно сцементированного фосфогипса. По гранулометрическому составу все исследованные образцы отнесены к пескам пылеватым и пескам гравийным согласно табл. Б.2.2 ГОСТ 25100-2011 [22].

На основании визуальных признаков и результатов гранулометрического анализа в строении пригруза выделено три разновидности насыпного грунта, отличающиеся по цвету, содержанию фосфогипса, нефелинового шлама и крупнообломочной фракции:

I — «фосфогипс без примеси нефелинового шлама» белого и сероватого цвета, порошкообразный, структурированный с плотными комками, содержание фосфогипса составляет 100%;

**Результаты исследования фосфогипса в теле пригрузки ограждающей дамбы гипсонакопителя АО «Метакхим»**  
**Studies of phosphogypsum in tightening weight body of embankment of Metakhim's gypsum pond**

	Индекс слоя	Разновидность грунта	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	W, %	c, кПа	$\varphi$ , град	q, МПа	f, кПа	УЭС, Ом·м
Выше УВ	I	Фосфогипс без примесей	1,58	1,18	32,4	20	33	2,48	13,97	71,4
	II	Фосфогипс с включениями щебня и примесью шлама	1,57	1,16	35,1	35	33	1,78	11,59	63,5
	III	Фосфогипс с примесью нефелинового шлама	1,47	1,07	37,6	34	34	5,44	63,01	47,6
Ниже УВ	I	Фосфогипс без примесей	1,61	1,13	43,0	19	25	1,40	7,28	4,9
	II	Фосфогипс с включениями щебня и примесью шлама	1,65	1,15	43,8	32	30	4,80	13,30	4,6

II — «фосфогипс с примесью нефелинового шлама и включением твердого щебня» в основном белого и бежевого цвета с большим количеством твердых обломков цементированного фосфогипса размером от 2 до 25 мм, содержание шлама 10%;

III — «фосфогипс с примесью нефелинового шлама» — бежевого, розоватого и коричневатого цвета, порошкообразный, структурированный с плотными комками, зернистыми (песчаными) включениями, содержание шлама 20%.

Общая инженерно-геологическая оценка разновидностей насыпного грунта по данным лабораторных и полевых исследований приведена в таблице, в которой указаны среднестатистические (нормативные) характеристики физико-механических свойств исследованных грунтов.

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что физико-механические свойства фосфогипса в конструкции ограждающих дамб существенно зависят от двух факторов — степени обводненности и содержания примесей нефелинового шлама.

Все выделенные разновидности насыпных грунтов, залегающие выше уровня воды (УВ) в теле пригрузки, имеют влажность и плотность меньшие, чем те

же разновидности, находящиеся в обводненном состоянии ниже УВ. Физическое состояние закономерно увязано с механическими свойствами грунтов — все разновидности в обводненном состоянии характеризуются меньшими значениями сцепления (c) и особенно угла внутреннего трения ( $\varphi$ ) относительно тех же разновидностей, залегающих выше УВ. По показателям сопротивления сдвигу чистый фосфогипс (I), как в осушенном, так и обводненном состоянии, уступает смесям с нефелиновым шламом (II и III). Добавки шлама при укладке фосфогипса в тело дамб в целом повышают прочностные свойства насыпного материала, но не исключают зависимости последних от степени водонасыщения. Фосфогипс, как в чистом виде, так и в смеси с нефелиновым шламом, существенно снижает прочность с увеличением влажности.

По результатам статического зондирования отчетливо прослеживается тенденция повышения прочности грунтов по мере увеличения содержания в нем нефелинового шлама. Тенденция наиболее очевидна, если сравнивать показатели чистого фосфогипса (I) и его смеси с наибольшим количеством шлама (III). Добавка нефелинового шлама к

фосфогипсу в количестве 20% приводит к повышению лобового сопротивления смеси ( $q$ ) в 2–3 раза, при этом трение ( $f$ ) также возрастает в несколько раз, что особенно заметно в осушенной части насыпи (выше УВ). Влияние обводненности на снижение прочности грунтов в теле пригруза по данным испытаний *in situ* можно отследить в основном по уменьшению сопротивления муфты трения ( $f$ ).

Для определения положения уровня воды в теле дамбы эффективным является использование геофизических методов [23, 24]. Нами применялся метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Установлено, что на границе между водонасыщенным и осушенным фосфогипсовым материалом, удельное электрическое сопротивление (УЭС) снижается на порядок (от  $40 \div 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  до  $4 \div 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). Получена хорошая сходимость результатов ВЭЗ с непосредственным замером уровней воды в инженерно-геологических скважинах, отклонения составили не более  $\pm 0,25 \text{ м}$ .

Также были получены значения УЭС для каждой разновидности насыпного грунта, сопоставление которых позволяет сделать вывод о том, что увеличение процентного содержания нефелинового шлама в фосфогипсе ведет к снижению УЭС. По результатам зондирования осушенной части пригруза средние значения УЭС составляли  $70 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  для разновидностей чистого фосфогипса (I) и  $45 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  для смеси фосфогипса с нефелиновым шламом (III). Ниже уровня воды значения УЭС варьируются незначительно, но тенденция сохраняется та же — увеличение содержания шлама ведет к уменьшению УЭС с  $4,9 \text{ (I)}$  до  $4,3 \text{ Ом} \cdot \text{м (III)}$ .

Оценивая качество укладки материала в теле пригруза по результатам геотехнического контроля, следует отметить, что по физическому состоянию

фосфогипс, как в чистом виде, так и в смеси с нефелиновым шламом, не соответствует оптимальным значениям плотности-влажности, обоснованным методом стандартного уплотнения в лаборатории. По факту коэффициент уплотнения ( $k_{\text{com}}$ ) не превышает  $0,70$  при допустимом  $0,90$  по рекомендациям СП 45.13330.2012 [12].

Оптимальные характеристики физико-механических свойств фосфогипса определялись в лабораторных условиях, не позволяющих оценить все многообразие факторов, влияющих на них в промышленной обстановке (изменчивость состава и физического состояния материала при извлечении его в больших объемах, степень дробления при экскавации, технологические нагрузки от различных видов механизмов).

В данном случае выявленное несоответствие обусловлено использованием фосфогипса с более высокой влажностью, чем оптимальная, ввиду отсутствия возможности на предприятии осуществить предварительную подсушку извлекаемого в больших объемах материала. Вместе с тем, даже при достигнутой степени уплотнения фосфогипс характеризуется сравнительно высокими прочностными характеристиками, особенно в смеси с нефелиновым шламом. Учитывая указанное, рекомендуется оптимальные физические характеристики фосфогипса определять в натуральных условиях посредством опытной отсыпки и укатки материала с использованием имеющегося у предприятия механизированного оборудования.

## **Выводы**

1. Фосфогипс в чистом виде и в смеси с нефелиновым шламом соответствует требованиям к грунтовым материалам плотин и дамб, установленных нормами гидротехнического проектирования. Данный минеральный материал техно-



генного происхождения не содержит в недопустимых количествах водорастворимых веществ, токсичных химических элементов, классифицируется как «неопасные отходы» для окружающей природной среды».

2. Добавки нефелинового шлама при укладке фосфогипса в тело дамб повышают прочностные свойства насыпного материала в целом, что подтверждается результатами инженерно-геологических исследований, полученных с применением лабораторных и натуральных методов.

3. Прочность фосфогипсового насыпного материала, в том числе содержащего примеси шлама и крупнообломочные включения, существенно снижается при

водонасыщении. Для обеспечения безопасной эксплуатации гипсонакопителей необходимо предусматривать мероприятия по уменьшению степени обводненности ограждающих дамб и предотвращению выхода фильтрационных вод на низовые откосы.

4. Регламентируемые проектом характеристики качества укладки фосфогипсового материала в конструкции ограждающих дамб — оптимальная влажность и максимальная плотность — должны определяться в промышленных условиях посредством опытной отсыпки и укатки с использованием имеющегося у предприятия механизированного оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dasic G.* Development of hazardous waste management system, including the identification and management of «hot spot sites» in Croatia. Zagreb: PHARE, 2009. 49 p.

2. *Conklin C.* Potential uses of phosphogypsum and associated risks. Background information document. Washington: Florida Institute of Phosphate Research, 1992. 114 p.

3. *Gennari R. F., Garcia I., Medina N. H., Silveira M. A. G.* Phosphogypsum analysis: total content and extractable element concentrations // International Nuclear Atlantic Conference, 2011, p. 9.

4. *Иваницкий В. В., Классен П. В., Новиков А. А. и др.* Фосфогипс и его использование. — М.: Химия, 1990. — 224 с.

5. *Фосфогипс: хранение и направления использования как крупнотоннажного вторичного сырья: материалы Второй международной конференции / Сост. В. И. Суходолова.* — М.: ОАО «НИУИФ», 2010. — 192 с.

6. *Papageorgiou F., Godelitsas A., Mertzimekis T. J. et al.* Environmental impact of phosphogypsum stockpile in remediated Schistos waste site (Piraeus, Greece) using a combination of  $\gamma$ -ray spectrometry with geographic information systems // Environmental Monitoring and Assessment. 2016. No 188. [Электронный ресурс]. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-016-5136-3#citeas> (дата обращения: 12.01.2020).

7. *Ali K. K., Awad Y. Dh.* Radiological assessment of Iraqi phosphorites and phosphate fertilizers // Arabic Journal of Geoscience. 2015. Vol. 8. No 11. Pp. 9481 — 9488.

8. *Методические рекомендации по применению фосфодигидрата сульфата кальция при строительстве автомобильных дорог.* — М.: СОЮЗДОРНИИ, 1989. — 15 с.

9. *СТО 24406528-01-2016.* Рекомендации по устройству расчетных слоев дорожных одежд из фосфогипса дорожного. Стандарт организации АО «Апатит» (согласован Росавтодор на 1 год от 29.12.2016 № 01-29/43425).

10. *Кудашов Е. С.* Инженерно-геологическое обоснование устойчивости намывных гипсонакопителей: Дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: НМСУ «Горный», 2015. — 210 с.

11. *Кутепова Н. А., Кутепов Ю. И., Ивочкина М. А., Кудашов Е. С., Легина Е. Е.* Инженерно-геологическая характеристика намывного фосфогипса как материала для строи-

тельства ограждающих дамб гипсонакопителей // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. — 2014. — т. 274. — С. 85 — 95.

12. Кутепова Н.А., Кутепов Ю.И., Кудашов Е.С. Обоснование оптимальных физико-механических характеристик фосфогипса при его использовании для строительства ограждающих дамб гипсонакопителей // Маркшейдерия и недропользование. — 2014. — № 6 (74). — С. 60 — 62.

13. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Утв. Минрегион России 29.12.2011.

14. СП 45.13330.2012. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Утв. Минрегион России 29.12.2011.

15. Мещеряков И.В. Применение нефелиновых шламов в дорожном строительстве // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 10 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/10/17755> (дата обращения: 07.02.2019).

16. Мухарьянов И.Р. Вопросы использования нефелиновых шламов в дорожных конструкциях // Вестник гражданских инженеров. — 2017. — № 1 (60). — С. 192 — 197.

17. Шепелев И.И., Жижаев А.М., Бочков Н.Н. Применение отходов глиноземного производства с целью улучшения эксплуатационных свойств дорожных смесей // Вестник ТГАСУ. — 2015. — № 1. — С. 182 — 193.

18. Шепелев И.И., Стыглиц И.С., Еськова Е.Н., Жижаев А.М. Исследование химических и токсичных свойств нефелиновых шламов для использования в сельском хозяйстве // Вестник КрасГАУ. — 2016. — № 2. — С. 13 — 18.

19. Межгосударственный стандарт ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности (введен в действие в качестве национального стандарта РФ с 01.01.2017 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28.07.2016 № 981-ст.)

20. Межгосударственный стандарт ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик (введен в действие в качестве национального стандарта РФ с 01.04.2016 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 03.11.2015 № 1694-ст.)

21. Межгосударственный стандарт ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости (введен в действие в качестве национального стандарта РФ с 01.01.2012 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19.04.2011 № 46-ст.)

22. Межгосударственный стандарт ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация (с поправками) (введен в действие в качестве национального стандарта РФ с 01.01.2013 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12.07.2012 № 190-ст.)

23. Bituh T., Petrinc B., Skoko B., Vucic Z., Markovic G. Measurement and modeling of the radiological impact of the phosphogypsum deposition site on the environment // Archives of Industrial Hygiene and Toxicology. 2015. No 66. Pp. 31 — 40.

24. Kayode O. T., Odukoya A. M., Adagunodo T. A., Adeniji A. A. Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2018. No 173. Pp. 1 — 8. **PLAS**

## REFERENCES

1. Dasic G. *Development of hazardous waste management system, including the identification and management of «hot spot sites» in Croatia*. Zagreb: PHARE, 2009. 49 p.

2. Conklin C. *Potential uses of phosphogypsum and associated risks. Background information document*. Washington: Florida Institute of Phosphate Research, 1992. 114 p.

3. Gennari R. F., Garcia I., Medina N. H., Silveira M. A. G. Phosphogypsum analysis: total content and extractable element concentrations. *International Nuclear Atlantic Conference*. 2011, p. 9.

4. Ivanitskiy V. V., Klassen P. V., Novikov A. A. *Fosfogips i ego ispol'zovanie* [Phosphogypsum and its usage], Moscow, Khimiya, 1990, 224 p.

5. *Fosfogips: khranenie i napravleniya ispol'zovaniya kak krupnotonnazhnogo vtorichnogo syr'ya: materialy Vtoroy mezhdunarodnoy konferentsii* [Phosphogypsum: storage and uses as bulk secondary raw material], Moscow, OAO «NIUIF», 2010, 192 p.

6. Papageorgiou F., Godelitsas A., Mertzimekis T. J. et al. Environmental impact of phosphogypsum stockpile in remediated Schistos waste site (Piraeus, Greece) using a combination of  $\gamma$ -ray spectrometry with geographic information systems. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. No 188, available at: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-016-5136-3#citeas> (accessed 12.01.2020).

7. Ali K. K., Awad Y. Dh. Radiological assessment of Iraqi phosphorites and phosphate fertilizers. *Arabic Journal of Geoscience*. 2015. Vol. 8. No 11. Pp. 9481 – 9488.

8. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu fosfodigidrata sul'fata kal'tsiya pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog* [Methodological recommendations on the application of phosphohydrate calcium sulfate for highway construction], Moscow, SOYUZDORNII, 1989, 15 p.

9. *Rekomendatsii po ustroystvu raschetnykh sloev dorozhnykh odezhd iz fosfogipsa dorozhnogo. STO 24406528-01-2016*. Standart organizatsii AO «Apatit» [Recommendations for configuration of road revetments' designed layers from phosphogypsum. STO 24406528-01-2016. PJSC «Apatit» company standart].

10. Kudashov E. S. *Inzhenerno-geologicheskoe obosnovanie ustoychivosti namyvnykh gipsonakopiteley* [Engineering-geological justification of aggradational phosphogypsum dispoals' stability], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, NMSU «Gornyy», 2015, 210 p.

11. Kutepova N. A., Kutepov Yu. I., Ivochkina M. A., Kudashov E. S., Legina E. E. Engineering-geological characteristic of hydraulic-fill phosphor-gypsum as a material for construction of gypsum-storage barriers. *Izvestiya vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*. 2014, vol. 274, pp. 85 – 95. [In Russ].

12. Kutepova N. A., Kutepov Yu. I., Kudashov E. S. Substantiation of phosphogypsum optimum physicommechanical characteristics when used to build gypsum stockpiling levee. *Marksheyderiya i nedropol'zovanie*. 2014, no 6 (74), pp. 60 – 62. [In Russ].

13. *Plotiny iz gruntovykh materialov. SP 39.13330.2012* [Rock fill dams. SP 39.13330.2012].

14. *Zemlyanye sooruzheniya, osnovaniya i fundamenty. SP 45.13330.2012* [Earthworks, grounds and footings. SP 45.13330.2017].

15. Meshcheryakov I. V. Appliance of nepheline sludge for highway construction. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*. 2012, no 10, available at: <http://web.snauka.ru/issues/2012/10/17755> (accessed 07.02.2019).

16. Mukharryanov I. R. Issues concerning the use of nepheline sludge in road constructions. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017, no 1 (60), pp. 192 – 197. [In Russ].

17. Shepelev I. I., Zhizhaev A. M., Bochkov N. N. Alumina production waste used to improve inorganic cement service properties. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta*. 2015, no 1, pp. 182 – 193. [In Russ].

18. Shepelev I. I., Styglits I. S., Es'kova E. N., Zhizhaev A. M. The research of chemical and toxic properties nepheline slime with the purpose of their use in the agriculture. *Vestnik KrasGAU*. 2016, no 2, pp. 13 – 18. [In Russ].

19. *Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya maksimal'noy plotnosti. Mezhgosudarstvennyy standart GOST 22733-2016* [Soils. Laboratory method for determining of maximum density. Interstate standard GOST 22733-2016].

20. Grunty. *Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik. Mezhhgosudarstvennyy standart GOST 5180-2015* [Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. Interstate standard GOST 5180-2015].

21. Grunty. *Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruемости. Mezhhgosudarstvennyy standart GOST 12248-2010* [Soils. Laboratory methods for determining the strength and strain characteristics. Interstate standard GOST 12248-2010].

22. Grunty. *Klassifikatsiya (s popravkami). Mezhhgosudarstvennyy standart GOST 25100-2011* [Soils. Classification (with amendments). Interstate standard GOST 25100-2011].

23. Bituh T., Petrinc B., Skoko B., Vucic Z., Markovic G. Measurement and modeling of the radiological impact of the phosphogypsum deposition site on the environment. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2015. No 66. Pp. 31 – 40.

24. Kayode O.T., Odukoja A.M., Adagunodo T.A., Adeniji A.A. Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018. No 173. Pp. 1 – 8.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кутепова Надежда Андреевна<sup>1</sup> – д-р техн. наук, главный научный сотрудник, e-mail: koutepovy@mail.ru,

Кутепов Юрий Иванович<sup>1</sup> – д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией, e-mail: koutepovy@mail.ru,

Кудашов Егор Сергеевич<sup>1</sup> – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: eskudashov@mail.ru,

Данильев Сергей Михайлович<sup>1</sup> – канд. геол.-минерал. наук, доцент, e-mail: daniliev@mail.ru,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет.

**Для контактов:** Кудашов Е.С., e-mail: eskudashov@mail.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.A. Kuteпова<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, e-mail: koutepovy@mail.ru,

Yu.I. Kuteпов<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory, e-mail: koutepovy@mail.ru,

E.S. Kudashov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: eskudasov@mail.ru,

S.M. Daniliev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor, e-mail: daniliev@mail.ru,

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** E.S. Kudashov, e-mail: eskudashov@mail.ru.

Получена редакцией 10.12.2019; получена после рецензии 06.05.2020; принята к печати 20.09.2020.

Received by the editors 10.12.2019; received after the review 06.05.2020; accepted for printing 20.09.2020.

