



УДК 625.76

## Перспективы исследований фосфогипса как материала для строительства

П. А. Кравченко<sup>1</sup>, О. А. Куликова<sup>2</sup>, Е. А. Волгарева<sup>1</sup>, А. А. Костылев<sup>1</sup>,  
М. И. Лещенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup> ООО «СК Энерготехстрой», Россия, 194044, Санкт-Петербург, ул. Комиссара Смирнова, 15

**Для цитирования:** Кравченко П. А., Куликова О. А., Волгарева Е. А., Костылев А. А., Лещенко М. И. Перспективы исследований фосфогипса как материала для строительства // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 7–21. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-7-21

### Аннотация

**Цель:** аналитическое исследование потенциальной возможности применения полугидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) и дигидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) сульфата кальция — фосфогипса — материала, являющегося отходом при производстве минеральных удобрений, в качестве строительного материала для строительства автомобильных дорог, грунтовых сооружений, материала для восстановления автомобильных дорог на участках ремонта инженерных сетей, а также разгрузки выработанных полигонов хранения отходов переработки фосфорных руд химических предприятий, работающих на территории Российской Федерации. **Методы:** анализ сложившейся ситуации на полигонах промышленных предприятий, анализ изученности вопроса утилизации и переработки фосфогипса, а также аналитическая (расчетная) оценка возможности замены распространенных в строительстве сыпучих материалов (песок, щебень) фосфогипсом. **Результаты:** в настоящей статье рассмотрены вопросы, связанные с оценкой возможности использования фосфогипса при снижении его локальной концентрации в зонах его применения, а также уже с использованием отходов, хранящихся на полигонах в течение многих лет. Рассмотренные варианты перспективного применения материала, позволяющие не только сохранить, но и повысить эксплуатационные характеристики автомобильных дорог и иных грунтовых сооружений, исключив при этом потенциально вредное воздействие материала в период эксплуатации, связанного с его пылением в процессе хранения. **Практическая значимость:** анализ сложившейся ситуации свидетельствует о том, что в связи с активно ведущимся в Российской Федерации производством на территории промышленных предприятий, занимающихся переработкой фосфорных руд, и полигонах, закрепленных за этими предприятиями, скапливается огромное количество отхода такого производства — фосфогипса. Объемы ежегодной утилизации фосфогипса на таких предприятиях исчисляются сотнями тысяч и миллионами тонн — формируются огромные отвалы, представляющие опасность как с точки зрения загрязнения грунтовых вод, так и с точки зрения техногенной безопасности. При столь больших объемах сконцентрированного хранения объемы попадающих в почву и грунтовые воды веществ может многократно превышать допустимые значения, но при этом при меньшей концентрации попадание данных веществ в грунт может не только не вредить экологии, но и нести положительный эффект с точки зрения повышения урожайности. Применение отходов таких производств в дорожном строительстве позволит решить проблемы, связанные с утилизацией фосфогипса.

**Ключевые слова:** переработка отходов, вторичное сырье, строительные материалы, фосфогипс, основания дорог, вечная мерзлота.

## Введение

Настоящая работа выполнена в рамках стратегического проекта № 2 «Новые технологии в строительстве» Приоритета 2030, реализуемого ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I». Вопросы эффективной переработки и повторного использования отходов промышленности, извлечения из них ценных примесей (к примеру, драгоценных или редкоземельных металлов) достаточно часто и активно изучаются отечественными и западными учеными [15]. На территории Российской Федерации активно ведется производство минеральных удобрений из фосфорных руд и продуктов их переработки, а также фосфорной и серной кислоты. В качестве сырья при производстве используют фосфориты и апатит  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{F}, \text{OH})$ .

Побочным продуктом такого производства является фосфогипс. Как отход производства фосфогипс хранится на специально отведенных полигонах, в отвалах. Одним из источников фосфогипса является завод по

производству минеральных удобрений, расположенный в г. Воскресенске Московской области. Для хранения фосфогипса завод использует два полигона (рис. 1).

По состоянию на 2022 год данное инженерно-техническое сооружение занимает площадь более 60 га (по данным анализа карт свободных ресурсов «Яндекс», Google и пр.), притом что площадь самого отвала занимает более 48 га. При углах откосов более  $20^\circ$  высота полигона на отдельных участках превышает 100 м. Хранение отходов при такой высоте отвала является само по себе опасным в связи с высокой вероятностью развития оползневых процессов, обрушения откосов и пр. Объем полигона составил в июне 2022 года 24,26 млн  $\text{м}^3$ , при этом на сентябрь 2021 года объем составлял 23,75 млн  $\text{м}^3$ . Из этого следует, что объем фосфогипса, произведенного за год, составляет более 0,5 млн  $\text{м}^3$ , или более 0,840 млн т (данное значение сильно зависит от плотности отходов после отсыпки в отвал).



**Рис. 1.** Один из двух полигонов хранения фосфогипса, г. Воскресенск  
(источник фото: Shutterstock/FOTODOM)

Аналогичная проблема существует в Балаковском районе Саратовской области (рис. 2).



**Рис. 2.** Полигон хранения фосфогипса в Балаковском районе Саратовской области (источник фото: <https://nversia.ru/news/fosagro-sobiraetsya-rasshirit-ploschad-otvala-fosfogipsa-balakovskom-rayone/>)

По состоянию на начало 2014 года объем хранящегося на полигоне фосфогипса составлял порядка 53 млн т, что на тот момент составляло порядка 70 % объема промышленных отходов всей Саратовской области (данные сайта <https://nversia.ru/news/zhitel-balakovskogo-rayona-o-rasshirenii-fosfogipsovo-go-otvala-za-cto-vy-nas-travite/>).

Фосфогипс нетоксичен, при сушке и перемешивании пылит. В качестве негативного эффекта такого способа хранения фосфогипса отмечают загрязнение грунтовых вод. При этом стоит отметить, что имеются исследования [8], свидетельствующие о пользе применения нейтрализованного фосфогипса в сельском хозяйстве, к примеру для устранения засоленности почв без дополнительной обработки. Также в одном из исследований [1] приведены сведения не только об эффективности применения, но и о периодичности применения таких удобрений.

В отвалах складировается колоссальный объем материала, что не может не иметь негативных для экологии последствий. При этом при определенной обработке однократное локальное применение небольшого количества материала не оказывает негативного воздействия на окружающую среду и, как говорилось выше, может нести даже некоторый положительный эффект.

### Краткое описание материала

Фосфогипс — это гидрат сульфата кальция, образующийся как побочный продукт при производстве удобрений из фосфоритной породы.

### Общее описание материала

Фосфогипс в больших объемах получают в качестве отхода при производстве фосфорной кислоты. Комплекс технологических операций при таком производстве приводит к образованию двух основных видов отходов — полугидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) и дигидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) сульфата кальция.

Имеется ряд научных и исследовательских работ [5, 10], в которых содержатся сведения о физических и механических характеристиках фосфогипсов в различном состоянии. В работах установлено, что на выходе с линии они характеризуются высокой пористостью.

По гранулометрическому составу как полугидрат, так и дигидрат сульфата кальция на выходе с производственной линии представлены частицами размером  $0,05 < d \leq 0,01$  мм. При таком гранулометрическом составе материал можно охарактеризовать как супесь пылеватую.

На выходе с производства плотность скелета фосфогипса составляет  $0,83\text{--}1,27$  т/м<sup>3</sup>, при этом коэффициент пористости состав-

ляет 1,3–1,9. Плотность минеральной части дигидрата составляет примерно 2,37 т/м<sup>3</sup>. В случае полугидрата плотность минеральных частиц несколько выше (2,52 т/м<sup>3</sup>). У фосфогипса на выходе с линии коэффициент фильтрации равен 1–3 м/сут. В результате длительного хранения (у слежавшегося фосфогипса) скорость фильтрации существенно снижается (0,1 м/сут).

Начальная влажность полугидрата составляет 25–30 %. Начальная влажность дигидрата на выходе с линии составляет 35–40 %. Это связано с содержанием в дигидрате 19–20 % кристаллизационной воды, а в полугидрате — около 6 %.

#### *Механические характеристики материала*

В ранее опубликованных научных работах [5, 10] установлено, что прочностные свойства фосфогипсов в виде дигидратов и полугидратов на выходе с технологической линии различаются незначительно:  $\varphi=11\text{--}15^\circ$ ,  $c=0,01\text{--}0,02$  МПа. После отсыпки в отвал прочность дигидрата при условии сохранения начальной влажности мало изменяется (увеличивается до  $\varphi=17^\circ$ ,  $c=0,035$  МПа за 30 суток). С полугидратом процесс протекает несколько иным образом — он активно поглощает влагу и переходит в дигидратное состояние, при этом формируются цементационные структурные связи. За 30 суток прочностные характеристики увеличиваются до  $\varphi=32^\circ$ ,  $c=0,035$  МПа.

Значения деформационных параметров, приведенные в [5, 10], составляли:

- коэффициент сжимаемости  $\alpha=0,058\text{--}0,075$  МПа<sup>-1</sup>;
- модуль деформации  $E_0=25,6\text{--}32,5$  МПа при давлении уплотнения  $P$  от 0,3 МПа до 1,0 МПа.

Авторами отмечено отсутствие различий в деформационном поведении и количественных характеристиках сжимаемости для фосфогипса в полугидратном и дигидратном состоянии.

В другой научной работе [4], освещающей перспективы применения фосфогипса в дорожном строительстве, приведены следующие прочностные и деформационные характеристики в возрасте материала 30 суток для дигидратного состояния:

- предел прочности при изгибе — от 1,5 до 5,0 МПа;
- прочность на сжатие — от 3,5 до 20,0 МПа;
- средняя плотность — от 1,6 до 2,0 т/м<sup>3</sup>;
- водопоглощение — от 1 до 6 %;
- морозостойкость — от 25 до 150 циклов.

#### **Некоторые сведения об опыте применения и экспериментальных исследованиях фосфогипса для решения определенных инженерных задач**

Фосфогипс дорожный применяется для устройства слоев основания, покрытий дорожных одежд автомобильных дорог и для укрепления грунтов, применяемых для устройства несущих и дополнительных слоев оснований и покрытий дорожных одежд, рабочего слоя земляного полотна, а также используется в качестве минерального порошка при приготовлении органоминеральных смесей для устройства оснований и покрытий автомобильных дорог.

Фосфогипс дорожный состоит из полугидрата сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), небольшого количества дигидрата сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), примесей неразложившегося фосфатного сырья, песка, солей кремнефтористоводородной и фосфорной

кислот, а также воды в связанном (кристаллизационной) и свободном состоянии (сверхкристаллизационной). Фосфогипс дорожный может быть классифицирован как гипс технический марки «В».

Для фосфогипса проводились исследования в части возможности его применения для устройства слоев оснований и покрытий автомобильных дорог. В частности, в одной из научных работ [4] предложено использование фосфогипса в качестве компонента дорожного асфальтобетона — минерального порошка без перевода его в вяжущее вещество. Авторами проведено исследование по замене в составе асфальтобетонной смеси минерального порошка (8 % по массе) фосфогипсом (от 3 до 4 % по массе) с использованием в качестве активатора гудрона (от 0,5 до 2,5 % по массе). При этом в составах корректировалось содержание битума (3,5–4 %) и гравия (46–47 %). В процессе исследования в части фосфогипса авторами установлено, что при водонасыщении образцов происходит кристаллизация фосфогипса-полугидрата в кристалл фосфогипс-дигидрат, которая полностью завершается при длительном водонасыщении, увеличивая прочность образцов.

Авторами одной из научных работ [3] был предложен схожий метод применения фосфогипса. Они предлагают использовать данный материал в производстве асфальтобетонных смесей с получением гранулированного продукта. При этом предложенный авторами подход позволяет получить гранулы, выдерживающий длительное хранение с сохранением эксплуатационных показателей, что решает одну из основных проблем материала — транспортировку и хранение в течение длительного времени до укладки.

Помимо исследований возможности применения фосфогипса в составе дорожных одежд, есть ряд работ, анализирующих возможность замены основания дорожных одежд (щебня, песка) фосфогипсом [6, 7]. Авторы рассматривали укладку в качестве основания под асфальтовое покрытие фосфогипса в полугидратном состоянии. Отмечено, что после уплотнения материал образует прочный монолитный слой. При этом исследования показали, что слои из фосфогипса имеют более высокие прочностные свойства, чем слои щебня и песка, слой из фосфогипса работает как монолитная плита, распределяющая нагрузку на большую поверхность грунтового основания. В работах авторов представлены результаты натурных исследований построенных и эксплуатирующихся дорог.

Имеется ряд публикаций в СМИ, утверждающих, что стоимость строительства дороги с применением фосфогипса обходится дешевле на 30 %, чем дороги с использованием традиционных технологий, а низкая плотность материала и, как следствие, низкая теплопроводность позволяют применять этот материал в качестве монолитного теплоизоляционного слоя на слабых грунтах, снизив риски промерзания и пучения таких грунтов.

Как отмечалось авторами научных работ, в том числе [4] из-за загрязнения фосфогипса различными примесями, требующими нейтрализации, утилизируется лишь малая его часть (менее 10 %). Процесс нейтрализации существенно увеличивает себестоимость фосфогипсового вяжущего материала по сравнению с природным гипсом. Авторы приводят множество вариантов применения фосфогипса, в том числе в дорожном строительстве. При этом темпы накопления отходов на

порядок превышают объемы его применения и переработки, несмотря на широкую сферу использования фосфогипса.

### **Анализ перспектив применения материала в строительной сфере**

Анализ показал вполне определенные, но не исчерпывающие перспективы применения фосфогипса, а темпы утилизации говорят о необходимости поиска направлений применения данного материала.

Несомненно, одним из основных направлений применения фосфогипса является дорожное строительство. Исследования свидетельствуют, что материал позволяет повысить долговечность и прочность конструкций автомобильных дорог. Для исследований материала на кафедре «Основания и фундаменты» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I выделены основные направления применения материала в дорожном строительстве:

- устройство отдельных фосфогипсовых слоев многослойных дорожных оснований в сочетании с песчаными и щебеночными подготовками;
- устройство основания под балластную призму по верху земляного полотна железных дорог.

В качестве еще одного потенциального направления применения фосфогипса в составах различных бетонов:

- применение фосфогипса в составе дорожных бетонов;
- применение фосфогипса в составе строительных бетонов для бетонных подготовок, стяжек и пр.;
- применение фосфогипса для ремонтных растворов, растворов для торкретирования и пр.

Многими учеными сегодня отмечаются проблемы, связанные со строительством в условиях вечной мерзлоты, с определением характеристик и параметров грунтов и материалов в условиях промерзания и оттаивания [11, 14]. Нередко возникает необходимость защиты инженерных сетей от воздействия морозного пучения [12] или, наоборот, снижения их воздействия на многолетне- и вечномерзлые грунты. Достаточно сложными инженерными задачами являются задачи термостабилизации грунтов основания для больших площадей возводимых сооружений [2, 9]. Задачи сохранения вечной мерзлоты при строительстве различных сооружений усугубляются в свете глобального потепления [17]. В связи с тем, что во многих статьях обращается внимание на низкую плотность и высокие теплоизоляционные характеристики фосфогипса, также выделено перспективное направление исследований, связанное с применением фосфогипса в качестве изоляционного материала:

- устройство автомобильных дорог в условиях вечной и многолетней мерзлоты с целью снижения влияния на криогенную обстановку;
- укладка инженерных сетей в слой фосфогипса в условиях вечной и многолетней мерзлоты с целью снижения влияния на криогенную обстановку, а также для защиты инженерных сетей и снижения затрат (в том числе по земляным работам) при подземной прокладке в регионах с большой глубиной сезонного промерзания грунтов;
- укладка сетей горячего водоснабжения и теплоснабжения в слое фосфогипса для снижения теплопотерь.

Достаточно частой задачей является оценка работы откосов, анкерных и гибких

подпорных стенок [13], а также задачи, связанные с улучшениями параметров их работы. Для геосинтетических и композиционных материалов (геосетки, георешетки, стеклопластиковые и углепластиковые сетки и пр.), используемых для армирования грунтового основания, анкеровки подпорных стен и т.д., при расчете применяются пониженные коэффициенты трения (коэффициент трения материал/грунт принимается ниже, чем коэффициент трения грунт/грунт, как правило, на 20%). При этом проблемы укрепления и сохранения откосов, в частности, возникают в совокупности с проблемами строительства на мерзлых и оттаивающих грунтах [16]. Применение фосфогипса как отдельного материала, так и в составе специальных строительных смесей, вероятно, сможет обеспечить более высокое трение на поверхности контакта грунта и материала. Для изучения данного вопроса в качестве перспективных направлений для исследования выделены следующие области возможного применения:

- армирование насыпей и откосов геосинтетическими и композиционными материалами в слоях фосфогипса;
- повышение характеристик анкеровки геосинтетических и композиционных материалов в теле грунтовых сооружений по средствам применения фосфогипса;
- применение композиционных армированных сеток для повышения прочности оснований из фосфогипса.

### Оценка возможности применения фосфогипса в составе конструкции автомобильных дорог

На одном из объектов в составе сети автомобильных дорог была запроектирована автомобильная дорога 2-й и 4-й категории.

В настоящем разделе дана сопоставительная расчетная оценка конструкции этих автомобильных дорог с учетом замены слоя песчаного основания фосфогипсом.

#### Расчет конструкций дорожной одежды по упругому прогибу

Расчет конструкции дорожной одежды выполнен в соответствии с методикой, предложенной ОДН 218.046–01. Для фосфогипса, укладываемого взамен слоя песка, в качестве модуля упругости в расчетах будем принимать величину, которую в соответствии с п. 5.5.31 СП 50–101–2004 рекомендовали использовать для оценки осадки — модуль деформации по ветви вторичного нагружения, который, в свою очередь, в соответствии с Примечаниями к п. 5.5.31, может быть вычислен как  $5 \cdot E_0$ . При модуле деформации  $E_0 = 25,6$  МПа модуль упругости в первом приближении может быть определен как  $E = 5 \cdot 25,6 = 128$  МПа.

Основание автомобильных дорог представлено суглинком легким, пылеватым, с относительной влажностью 0,75. Модуль упругости такого основания составляет  $E_r = 38$  МПа.

Вычислим поверхностный модуль упругости для дороги 2-й категории при использовании в качестве грунтов основания песка крупного:

$$\frac{E_r}{E_5} = \frac{38}{130} = 0,292; \quad \frac{h_5}{D} = \frac{500}{345} = 1,45;$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_5} = 0,664 \Rightarrow E_{пов5} = 0,664 \cdot 130 = 86,3 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_4} = \frac{86,3}{260} = 0,332; \quad \frac{h_4}{D} = \frac{300}{345} = 0,87;$$

$$\frac{E_{пов4}}{E_4} = 0,607 \Rightarrow E_{пов4} = 0,607 \cdot 260 = 157,8 \text{ МПа};$$

ТАБЛИЦА 1. Слои дорожной одежды

Слой	Дорога 2-й категории	Дорога 4-й категории
Слой № 1	Щебеночно-мастичный асфальтобетон, марка битума БНД 70/100 с максимальным размером зерна 16 мм $h = 70$ мм	Асфальтобетон горячей укладки пористый I марки из крупнозернистой щебеночной (гравийной) смеси, марка битума БНД 40/60 $h = 70$ мм
Слой № 2	Асфальтобетон для оснований на битумном вяжущем марки БНД 70/100 с максимальным размером зерна 22 мм $h = 100$ мм	Асфальтобетон горячей укладки пористый II марки из мелкозернистой щебеночной (гравийной) смеси, марка битума БНД 60/90 $h = 80$ мм
Слой № 3	Асфальтобетон для оснований на битумном вяжущем марки БНД 70/100 с максимальным размером зерна 22 мм $h = 100$ мм	—
Слой № 4	Щебеночно-песчаная смесь при максимальном размере зерна до 40 мм $h = 300$ мм	Щебень фр. 40–80 (80–120) трудноуплотняемый с заклинкой мелкой фракцией $h = 300$ мм
Слой № 5	Песок крупный $h = 500$ мм	Песок крупный $h = 500$ мм
Земляное полотно	Суглинок легкий, пылеватый с относительной влажностью 0,75	Суглинок легкий, пылеватый с относительной влажностью 0,75

$$\frac{E_{\text{пов}4}}{E_3} = \frac{157,8}{3250} = 0,0486; \quad \frac{h_3}{D} = \frac{100}{345} = 0,29;$$

$$\frac{E_{\text{пов}5}}{E_4} = \frac{87,8}{260} = 0,338; \quad \frac{h_4}{D} = \frac{300}{345} = 0,87;$$

$$\frac{E_{\text{пов}3}}{E_3} = 0,087 \Rightarrow E_{\text{пов}3} = 0,087 \cdot 3250 = 282,8 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}4}}{E_4} = 0,622 \Rightarrow E_{\text{пов}4} = 0,622 \cdot 260 = 161,7 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}3}}{E_2} = \frac{282,8}{3250} = 0,087; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{100}{345} = 0,29;$$

$$\frac{E_{\text{пов}4}}{E_3} = \frac{161,7}{3250} = 0,0498; \quad \frac{h_3}{D} = \frac{100}{345} = 0,29;$$

$$\frac{E_{\text{пов}2}}{E_2} = 0,146 \Rightarrow E_{\text{пов}2} = 0,146 \cdot 3250 = 474,5 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}3}}{E_3} = 0,095 \Rightarrow E_{\text{пов}3} = 0,095 \cdot 3250 = 308,8 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}2}}{E_1} = \frac{474,5}{3800} = 0,125; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{70}{345} = 0,203;$$

$$\frac{E_{\text{пов}3}}{E_2} = \frac{308,8}{3250} = 0,095; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{100}{345} = 0,29;$$

$$\frac{E_{\text{пов}1}}{E_1} = 0,151 \Rightarrow E_{\text{пов}1} = 0,151 \cdot 3800 = 573,8 \text{ МПа}.$$

$$\frac{E_{\text{пов}2}}{E_2} = 0,153 \Rightarrow E_{\text{пов}2} = 0,153 \cdot 3250 = 497,3 \text{ МПа};$$

В случае замены слоя песка (слой № 5) в составе рассмотренной конструкции фосфогипсом с модулем упругости  $E = 128$  МПа поверхностный модуль упругости изменится следующим образом:

$$\frac{E_r}{E_5} = \frac{38}{128} = 0,297; \quad \frac{h_5}{D} = \frac{500}{345} = 1,45;$$

$$\frac{E_{\text{пов}5}}{E_5} = 0,686 \Rightarrow E_{\text{пов}5} = 0,686 \cdot 128 = 87,8 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}2}}{E_1} = \frac{497,3}{3800} = 0,131; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{70}{345} = 0,203;$$

$$\frac{E_{\text{пов}1}}{E_1} = 0,158 \Rightarrow E_{\text{пов}1} = 0,158 \cdot 3800 = 600,4 \text{ МПа}.$$

Вычислим поверхностный модуль упругости для дороги 4-й категории при использовании в качестве грунтов основания песка крупного:

$$\frac{E_r}{E_5} = \frac{38}{130} = 0,292; \quad \frac{h_5}{D} = \frac{500}{345} = 1,45;$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_5} = 0,664 \Rightarrow E_{пов5} = 0,664 \cdot 130 = 86,3 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_4} = \frac{86,3}{350} = 0,247; \quad \frac{h_4}{D} = \frac{300}{345} = 0,87;$$

$$\frac{E_{пов4}}{E_4} = 0,529 \Rightarrow E_{пов4} = 0,529 \cdot 350 = 185,2 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов3}}{E_2} = \frac{185,2}{2000} = 0,093; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{80}{345} = 0,23;$$

$$\frac{E_{пов2}}{E_2} = 0,137 \Rightarrow E_{пов2} = 0,137 \cdot 2000 = 274,0 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов2}}{E_1} = \frac{274,0}{2800} = 0,098; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{70}{345} = 0,203;$$

$$\frac{E_{пов1}}{E_1} = 0,131 \Rightarrow E_{пов1} = 0,131 \cdot 2800 = 366,8 \text{ МПа}.$$

В случае замены слоя песка (слой № 5) в составе рассмотренной конструкции фосфогипсом с модулем упругости  $E = 128$  МПа поверхностный модуль упругости изменится следующим образом:

$$\frac{E_r}{E_5} = \frac{38}{128} = 0,297; \quad \frac{h_5}{D} = \frac{500}{345} = 1,45;$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_5} = 0,686 \Rightarrow E_{пов5} = 0,686 \cdot 128 = 87,8 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_4} = \frac{87,8}{350} = 0,251; \quad \frac{h_4}{D} = \frac{300}{345} = 0,87;$$

$$\frac{E_{пов4}}{E_4} = 0,539 \Rightarrow E_{пов4} = 0,539 \cdot 350 = 188,7 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов4}}{E_2} = \frac{188,7}{2000} = 0,094; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{80}{345} = 0,23;$$

$$\frac{E_{пов2}}{E_2} = 0,139 \Rightarrow E_{пов2} = 0,139 \cdot 2000 = 278,0 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов2}}{E_1} = \frac{278,0}{2800} = 0,099; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{70}{345} = 0,203;$$

$$\frac{E_{пов1}}{E_1} = 0,132 \Rightarrow E_{пов1} = 0,132 \cdot 2800 = 369,6 \text{ МПа}.$$

В соответствии с данным расчетом замена слоя песка фосфогипсом такой же мощности приводит к незначительному повышению поверхностного модуля упругости дорожной одежды. Следовательно, с точки зрения расчета дорожной одежды по упругому прогибу слой песка в дорожной одежде может быть заменен слоем фосфогипса аналогичной толщины.

*Оценка изменения теплопроводности конструкции дорожной одежды при замене слоя песка слоем фосфогипса*

В соответствии с ОДН 218.046-01 термическое сопротивление дорожной одежды оценивается суммой частных от деления мощностей слоев на соответствующие величины теплопроводности данных слоев:

$$R_{од(о)} = \sum \frac{h_{од(i)}}{\lambda_{од(i)}}.$$

Для основных материалов конструкции коэффициенты теплопроводности материала могут быть определены по Приложениям к ОДН 218.046-01.

Значения коэффициентов и мощностей слоев приведены в табличной форме ниже.

В этом случае термическое сопротивление дорожной одежды дороги 2-й категории:

$$R_{од(о)} = \frac{0,27}{1,40} + \frac{0,30}{2,10} + \frac{0,50}{1,74} = 0,623.$$

Термическое сопротивление дорожной одежды дороги 2-й категории при замене песка фосфогипсом:

ТАБЛИЦА 2. Теплотехнические характеристики материалов дорожной одежды

№ слоя	Наименование материала	Мощность слоя, м	К-т теплопроводности, Вт/м·К
Дорога 2-й категории			
1-3	Асфальтобетон плотный (3 слоя)	0,27	1,40
4	Щебеночно-песчаная смесь	0,30	2,10
5	Песок крупный	0,50	1,74
5*	Фосфогипс	0,50	0,35
Дорога 4-й категории			
1	Асфальтобетон плотный	0,07	1,40
2	Асфальтобетон пористый	0,08	1,25
4	Щебень	0,30	1,86
5	Песок крупный	0,50	1,74
5*	Фосфогипс	0,50	0,35
Примечание:			
* альтернативный слой грунта, применяемый взамен слоя с тем же номером без «*»			

$$R_{\text{од(о)}} = \frac{0,27}{1,40} + \frac{0,30}{2,10} + \frac{0,50}{0,35} = 1,764.$$

Увеличение термического сопротивления для конструкций автомобильной дороги 2-й категории за счет укладки фосфогипса взамен крупного песка составляет  $1,764 / 0,623 = 2,8$  раза.

Термическое сопротивление дорожной одежды дороги 4-й категории:

$$R_{\text{од(о)}} = \frac{0,07}{1,40} + \frac{0,08}{1,25} + \frac{0,30}{1,86} + \frac{0,50}{1,74} = 0,563.$$

Термическое сопротивление дорожной одежды дороги 4-й категории при замене песка фосфогипсом:

$$R_{\text{од(о)}} = \frac{0,07}{1,40} + \frac{0,08}{1,25} + \frac{0,30}{1,86} + \frac{0,50}{0,35} = 1,704.$$

Увеличение термического сопротивления для конструкций автомобильной дороги 4-й категории за счет укладки фосфогипса взамен крупного песка составляет  $1,704 / 0,563 = 3,0$  раза.

### Заключение

Анализ исследований существующих технологий и опыта применения фосфогипса в некоторых сферах строительства указывает на наличие определенных перспектив исследований фосфогипса. Имеется ряд исследований фосфогипса, технологий его применения и переработки, выделения из фосфогипса микропримесей редкоземельных металлов и пр. Однако практически не снижающиеся объемы хранения данного отхода производства свидетельствуют о невозможности, нецелесообразности применения предложенных технологий или о малом объеме переработки фосфогипса, связанном с невысоким спросом на конечный продукт.

Это еще раз указывает на необходимость разработки новых направлений для утилизации и переработки фосфогипса. В связи с этим определенные при анализе направления исследования представляются перспективными.

Аналитические расчеты конструкций автомобильных дорог показали возможность замены слоя песка в составе конструкции слоем фосфогипса такой же мощности. В рассматри-

ваемых случаях это приводит к незначительному повышению поверхностного модуля упругости дорожной одежды. С точки зрения расчета дорожной одежды по упругому прогибу слой песка в дорожной одежде может быть заменен слоем фосфогипса аналогичной толщины. Стоит отметить, что расчет выполнялся для фосфогипса, прошедшего повторное измельчение, без учета набора прочности за счет повторного твердения.

Расчет термодинамического сопротивления дорожных одежд показал, что величина термодинамического сопротивления рассмотренной многослойной конструкции дорожных одежд увеличивается до 3 раз при замене слоя крупного песка фосфогипсом.

### Библиографический список

1. Аканова Н. И., Шеуджен А. Х., Визирская М. М. Агроэкологическая оценка эффективности систематического применения фосфогипса в рисовом севообороте. SPIRIT TIME. Учредители: Берлинский университет им. Гумбольдта, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени Адмирала Макарова, eISSN: 2522–9923. 2019. № 1 (13). С. 42–43.
2. Белова О. И., Парамонов М. В., Сахаров И. И. Термостабилизация оснований сооружений больших плановых размеров в криолитозоне. Материалы научно-практической конференции «Композитные материалы в строительстве объектов транспортной инфраструктуры»; под ред. А. В. Квитко. СПб.: Изд-во: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург), 2018. С. 69–74.
3. Герасимов Д. В., Игнатъев А. А., Готовцев В. М. и др. Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона // Дороги и мосты. 2018. № 40. С. 304–315.
4. Ковалев Я. Н., Яглов В. Н., Чистова Т. А. и др. Применение фосфогипса в дорожном строительстве // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 6. С. 493–498. DOI: 10.21122/2227–1031–2021–20–6–493–498.
5. Коробанова Т. Н. Геодинамическое обоснование устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании: дис. ... канд. техн. наук. Научный руководитель: д. т. н. Кутепова Н. А. СПб.: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», 2018. 175 с.
6. Коротковский С. А., Талалай В. В., Кочетков А. В. и др. Применение фосфогипса для строительства автомобильной дороги. В сборнике: I Международная научно-техническая конференция «Долговечность и надежность строительных материалов и конструкций в эксплуатационной среде». М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2017. С. 264–273.
7. Кочетков А. В., Янковский Л. В. Применение фосфогипса для строительства монолитных слоев дорожной одежды // Журнал Пермского национального исследовательского политехнического университета. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 4. С. 91–102. DOI: 10.15593/24111678/2017.04.07.
8. Кизинек С. В., Шеуджен А. Х., Аканова Н. И. и др. Экологические и агроэкономические аспекты применения фосфогипса в сельском хозяйстве // Научно-методический журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс». 2013. Т. 2, № 09 (13). С. 206–217.
9. Кудрявцев С. А., Сахаров И. И., Парамонов В. Н. Создание условий нормативного состояния деградирующих многолетнемерзлых оснований зданий и сооружений Дальневосточного федерального округа и Арктики. Сборник научных трудов РААСН. Т. 2. М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2022. С. 157–164. EDN: ZTPV7I.
10. Кутепова Н. А., Коробанова Т. Н. Особенности развития деформаций отвалов фосфогипса в г. Балаково Саратовской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017.

№ 10. С. 132–140. DOI: 10.25018/0236–1493–2017–10–0–132–140.

11. Парамонов М. В. Напряженно-деформированное состояние системы «Основание — сооружение» при неоднородном промерзании грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Парамонов Максим Владимирович. СПб.: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». 2013.

12. Петров А. М., Сычкина Е. Н. Оценка влияния морозного пучения при расчетах подземного трубопровода // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2020. Т. 2. С. 298–303.

13. Сливец К. В. Экспериментальные и теоретические исследования работы гибкой подпорной стенки // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: строительство и транспорт. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс». 2008. № 4–20. С. 32–38.

14. Сливец К. В., Колмогорова С. С., Коваленко И. А. Параметры мерзлых грунтов при численном моделировании теплофизических задач // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. № 2. С. 359–366. DOI: 10.20295/1815–588X-2022–19–2–359–366.

15. Сычкина Е. Н., Утробина О. Ю., Машенко А. В. Золото из техногенных отвалов и рос-

сыпей // Металлогения древних и современных океанов. Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН. 2010. № 1. С. 209–212.

16. Kudryavtsev S., Valtceva T., Kotenko Z., et al. Reinforcing a railway embankment on degrading permafrost subgrade soils. *Advances in intelligent systems and computing*. Springer Nature Switzerland AG. 2021. Vol. 1258. P. 35–44. DOI: 10.1007/978–3–030–57450–5\_4.

17. Sakharov I., Kudryavtsev S., Paramonov V., et al. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the arctic zone in conditions of global warming. X international scientific siberian transport forum — TRANSSIBERIA 2022. “Transportation Research Procedi”. Elsevier B. V., 2022. Vol. 63. P. 2506–2514. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.288.

Дата поступления: 23.11.2023

Решение о публикации: 15.01.2024

#### **Контактная информация:**

КРАВЧЕНКО Павел Александрович — канд. техн. наук; pasha.sky@gmail.com

КУЛИКОВА Оксана Александровна — начальник отдела проектирования; kulikovaoksana@gmail.com

ВОЛГАРЕВА Екатерина Александровна — студент гр. АДБ-111; volgareva.1999@mail.ru

КОСТЫЛЕВ Андрей Александрович — студент гр. АДБ-111; tolstyak2002@yandex.ru

ЛЕЩЕНКО Михаил Игоревич — студент гр. АДБ-111; leshchenko2004m@gmail.com

## Prospects for research of phosphogypsum as a material for construction

**P. A. Kravchenko<sup>1</sup>, O. A. Kulikova<sup>2</sup>, E. A. Volgareva<sup>1</sup>, A. A. Kostylev<sup>1</sup>, M. I. Leshchenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> ООО “SK Energotechstroy”, 15, Komissara Smirnova st., Saint Petersburg, 194044, Russia

**For citation:** *Kravchenko P. A., Kulikova O. A., Volgareva E. A., Kostylev A. A., Leshchenko M. I.* Prospects for research of phosphogypsum as a material for construction // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024, Vol. 21, iss. 1. P. 7–21 (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-7-21

### Abstract

**Objective:** analytical investigation of the potential use of hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) and dihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) calcium sulfate — phosphogypsum — a waste in the production of mineral fertilizers, as a construction material for the construction of roads, soil structures, material for the restoration of roads in the areas of repair of utility networks, as well as unloading of developed landfills for the storage of waste from processing phosphorus ores of chemical enterprises operating in the Russian Federation. **Methods:** analysis of the current situation at landfills of industrial enterprises, analysis of the knowledge of the issue of utilization and processing of phosphogypsum, as well as analytical (calculation) assessment of the possibility of replacing bulk materials (sand, crushed stone) with phosphogypsum common in construction. **Results:** this article discusses issues related to the assessment of the possibility of using phosphogypsum with a decrease in its local concentration in the zones of its application, as well as with the use of waste stored at landfills for many years. The considered options for prospective use of the material, which make it possible not only to preserve, but also to increase the operational characteristics of roads and other soil structures, while eliminating the potentially harmful effect of the material during operation associated with its dusting during storage. **Practical significance:** analysis of the current situation indicates that due to the active production in the Russian Federation, a huge amount of waste from such production — phosphogypsum — accumulates on the territory of industrial enterprises engaged in the processing of phosphorus ores and landfills assigned to these enterprises. The annual utilization of phosphogypsum at such enterprises is estimated at hundreds of thousands and millions of tons — huge dumps are formed, which pose a danger both from the point of view of groundwater pollution and from the point of view of man-made safety. With such large volumes of concentrated storage, the volumes of substances entering the soil and groundwater may repeatedly exceed the permissible values, but at the same time, with a lower concentration, the ingress of these substances into the soil may not only not harm the environment, but also have a positive effect in terms of increasing yield. The use of waste from such production facilities in road construction will solve the problems associated with the disposal of phosphogypsum.

**Keywords:** waste processing, secondary raw materials, building materials, phosphogypsum, road bases, permafrost.

### References

1. Akanova N. I., Sheudzhen A. H., Vizirskaja M. M. Agrojekologicheskaja ocenka jeffektivnosti sistematičeskogo primenenija fosfogipsa v risovom sevooborote. SPIRIT TIME. Uchrediteli: Berlinskij universitet im. Gumbol'dta, Hersonskij filial Nacional'nogo universi-

teta korablestroenija imeni Admirala Makarova, eISSN: 2522–9923. 2019. № 1(13). S. 42–43. (In Russian)

2. Belova O. I., Paramonov M. V., Saharov I. I. Termostabilizacija osnovanij sooruzhenij bol'shijh planovyh razmerov v kriolitozone. Materialy nauchno-praktičeskoj konferencii “Kompozitnye materialy

v stroitel'stve ob#ektov transportnoj infrastruktury"; pod red. A. V. Kvitko. SPb.: Izd-vo: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet (Sankt-Peterburg), 2018. S. 69–74. (In Russian)

3. Gerasimov D. V., Ignat'ev A. A., Gotovcev V. M. i dr. Perspektivy ispol'zovaniya fosfogipsa v proizvodstve asfal'tobetona // *Dorogi i mosty*. 2018. № 40. S. 304–315. (In Russian)

4. Kovalev Ja. N., Jaglov V. N., Chistova T. A. i dr. *Primenenie fosfogipsa v dorozhnom stroitel'stve // Nauka i tehnika*. 2021. T. 20, № 6. S. 493–498. DOI: 10.21122/2227–1031–2021–20–6–493–498. (In Russian)

5. Korobanova T. N. *Geodinamicheskoe obosnovanie ustojchivosti otvalov fosfogipsa na glinistom gruntovom osnovanii: dis. ... kand. tehn. nauk. Nauchnyj rukovoditel': d. t. n. Kutepova N. A.* SPb.: FGBOU VO "Sankt-Peterburgskij gornyj universitet", 2018. 175 s. (In Russian)

6. Korotkovskij S. A., Talalay V. V., Kochetkov A. V. i dr. *Primenenie fosfogipsa dlja stroitel'stva avtomobil'noj dorogi. V sbornike: I Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Dolgovechnost' i nadezhnost' stroitel'nyh materialov i konstrukcij v jekspluacionnoj srede"*. M.: Nacional'nyj issledovatel'skij jadernyj universitet "MIFI", 2017. S. 264–273. (In Russian)

7. Kochetkov A. V., Jankovskij L. V. *Primenenie fosfogipsa dlja stroitel'stva monolitnyh sloev dorozhnoj odezhdy // Zhurnal Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija*. 2017. № 4. S. 91–102. DOI 10.15593/24111678/2017.04.07. (In Russian)

8. Kizinek S. V., Sheudzhen A. H., Akanova N. I. i dr. *Jekologicheskie i agrojekonomicheskie aspekty primeneniya fosfogipsa v sel'skom hozjajstve // Nauchno-metodicheskij zhurnal "XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus"*. 2013. T. 2, № 09 (13). S. 206–217. (In Russian)

9. Kudrjavcev S. A., Saharov I. I., Paramonov V. N. *Sozdanie uslovij normativnogo sostojaniya degradirujushhij mnogoletnemerzlyh osnovanij zdanij i sooruzhenij Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga i Arktiki. Sbornik nauchnyh trudov RAASN. T. 2. M.: Rossijskaja akademija arhitektury i stroitel'nyh nauk*, 2022. S. 157–164. EDN: ZTPVTI. (In Russian)

10. Kutepova N. A., Korobanova T. N. *Osobenosti razvitija deformacij otvalov fosfogipsa v g. Balakovo Saratovskoj oblasti // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*. 2017. № 10. S. 132–140. DOI: 10.25018/0236–1493–2017–10–0–132–140. (In Russian)

11. Paramonov M. V. *Naprzazhenno-deformirovanoe sostojanie sistemy "Osnovanie — sooruzhenie" pri neodnomernom promerznanii gruntov: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.02 / Paramonov Maksim Vladimirovich.* SPb.: FGBOU VPO "Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet". 2013. (In Russian)

12. Petrov A. M., Sychkina E. N. *Ocenka vlijaniya moroznogo puchenija pri raschetah podzemnogo truboprovoda // Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teorija i praktika. Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politehnicheskij universitet*. 2020. T. 2. S. 298–303. (In Russian)

13. Slivec K. V. *Jeksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya raboty gibkoj podpornoj stenki // Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija: stroitel'stvo i transport. Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Gosudarstvennyj universitet — uchebno-nauchno-proizvodstvennyj kompleks"*. 2008. № 4–20. S. 32–38. (In Russian)

14. Slivec K. V., Kolmogorova S. S., Kovalenko I. A. *Parametry merzlyh gruntov pri chislennom modelirovanii teplofizicheskijh zadach // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2022. T. 19. № 2. S. 359–366. DOI: 10.20295/1815–588X-2022–19–2–359–366. (In Russian)

15. Sychkina E. N., Utrobina O. Ju., Mashhenko A. V. Zoloto iz tehnogennyh otvalov i rossypej // Metallogeniya drevnih i sovremennyh okeanov. Juzhno-Ural'skij federal'nyj nauchnyj centr mineralogii i geojekologii UrO RAN. 2010. № 1. S. 209–212. (In Russian)

16. Kudryavtsev S., Valtceva T., Kotenko Z., et al. Reinforcing a railway embankment on degrading permafrost subgrade soils. *Advances in intelligent systems and computing*. Springer Nature Switzerland AG. 2021. Vol. 1258. P. 35–44. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_4.

17. Sakharov I., Kudryavtsev S., Paramonov V., et al. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the arctic zone in conditions of global warming. X international scientific siberian transport forum — TRANSSIBERIA 2022. “Transportation Re-

search Procedi”. Elsevier B. V., 2022. Vol. 63. P. 2506–2514. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.288.

Received: 23.11.2023

Accepted: 15.01.2024

**Author’s information:**

Pavel A. KRAVCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; pasha.sky@gmail.com

Oksana A. KULIKOVA — Head of Design Department; kulikovaoksana@gmail.com

Ekaterina A. VOLGAREVA — Student; volgareva.1999@mail.ru

Andrey A. KOSTYLEV — Student; tolstyak2002@yandex.ru

Mihail I. LESHCHENKO — Student; leshchenko2004m@gmail.com