

УДК: 625.7/8

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.32

EDN: UOVSDI



Применение техногенных грунтов при устройстве укрепленных слоев дорожных одежд

Э.М. Добров¹, Р.Г. Кочеткова¹, М.Г. Горячев¹

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Одной из актуальных задач строительства автомобильных дорог является экономия привозных инертных материалов и традиционных вяжущих, что может решаться путем широкого применения вторичных ресурсов, таких как техногенные грунты. Применение техногенных грунтов, имеющих в своем составе фосфополугидрат сульфата кальция, имеет потенциал использования в дорожных одеждах в качестве основного сырья как при устройстве укрепленных слоев оснований, так и для изготовления сборных дорожных плит. Однако внедрение рассматриваемых решений сдерживается из-за недостатка изученности физико-механических и эксплуатационных свойств переработанных техногенных грунтов, содержащих фосфополугидрат сульфата кальция. *Цель работы:* исследование возможности применения при устройстве укрепленных оснований дорожных одежд из техногенных грунтов, содержащих фосфополугидрат сульфата кальция, по технологии смешения на автомобильной дороге и изготовлением сборных дорожных плит. *Задачи:* исследовать физико-механические свойства переработанных техногенных грунтов; установить влияние исходной влажности техногенных грунтов на прочность при сжатии в разном возрасте; изучить прочностные свойства и устойчивость сборных дорожных плит из переработанного техногенного грунта к длительным циклам замораживания-оттаивания; провести опытно-промышленное внедрение переработанных техногенных грунтов при устройстве укрепленных оснований дорожных одежд на автомобильных дорогах. *Результаты.* Установлена возможность применения переработанных техногенных грунтов, имеющих в своем составе фосфополугидрат сульфата кальция, в качестве основного дорожно-строительного материала при устройстве укрепленных оснований дорожных одежд. Значения показателей марок по прочности и морозостойкости удовлетворяют требованиям, предъявляемым к грунтам, укрепленным неорганическими вяжущими для дорожных одежд. Изучены и определены требуемые показатели физико-механических свойств полученного в результате переработки техногенного грунта на основе фосфополугидрата сульфата кальция (по новой технологии). Выполненное опытно-промышленное внедрение переработанных техногенных грунтов в качестве монолитного слоя и материала сборных дорожных плит оснований дорожных одежд на автомобильных дорогах в разных регионах Российской Федерации подтвердило рациональность применения технологии переработки техногенных грунтов не только для снижения стоимости дорожно-строительных работ, но и в развитии индустриальных методов строительства. *Выводы.* Широкое использование в дорожном строительстве переработанных техногенных грунтов позволяет не только решать вопросы снижения стоимости строительства, но также расширять область эффективного применения побочных продуктов производств.

Ключевые слова: переработанный техногенный грунт, фосфополугидрат сульфата кальция, укрепленные слои дорожных одежд, физико-механические свойства.

Для цитирования: Добров Э.М., Кочеткова Р.Г., Горячев М.Г. Применение техногенных грунтов при устройстве укрепленных слоев дорожных одежд // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 395-405, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.32, EDN: UOVSDI

The use of man-made soils in the construction of reinforced pavement layers

E.M. Dobrov¹, R.G. Kochetkova¹, M.G. Goryachev¹

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,
Moscow, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* One of the pressing challenges in road construction is saving imported inert materials and traditional binders, which can be achieved through the widespread use of recycled resources, such as man-made soils. The use of man-made soils containing calcium sulfate phosphohemihydrate has the potential to be used in road surfaces as the main raw material both for the construction of reinforced base layers and for the production of precast pavement slabs. However, the implementation of the solutions under consideration is hampered by the lack of knowledge of the physical, mechanical and operational properties of processed man-made soils containing calcium sulfate phosphohemihydrate. The purpose of the work is to study the possibility of using it in the construction of reinforced pavement bases made of man-made soils containing calcium sulfate phosphohemihydrate, using the technology of mixing on the highway and the production of precast pavement slabs. The tasks are to investigate the physical and mechanical properties of recycled man-made soils; to determine the effect of the initial moisture content of man-made soils on their compressive strength at different ages; to study the strength properties and resistance of precast pavement slabs made from recycled man-made soil to long-term freeze-thaw cycles; to conduct a pilot industrial implementation of recycled man-made soils in the construction of reinforced pavement bases on highways. *Results.* The possibility of using processed man-made soils containing calcium sulfate phosphohemihydrate as the main road-building material in the construction of reinforced pavement bases has been established. The strength and frost resistance values of the grades meet the requirements for soils reinforced with inorganic binders for road surfaces. The required indicators of physical and mechanical properties of man-made soil obtained as a result of processing based on calcium sulfate phosphohemihydrate (using new technology) were studied and determined. The pilot industrial implementation of recycled man-made soils as a monolithic layer and material for precast pavement base slabs on highways in various regions of the Russian Federation has confirmed the rationality of using technology for processing man-made soils not only to reduce the cost of road construction work, but also in the development of industrial construction methods. *Conclusions.* The widespread use of recycled man-made soils in road construction allows not only to address issues of reducing construction costs, but also to expand the scope of effective use of industrial by-products.

Keywords: recycled man-made soil, calcium sulfate phosphohemihydrate, reinforced pavement layers, physical and mechanical properties.

For citation: Dobrov E.M., Kochetkova R.G., Goryachev M.G. The use of man-made soils in the construction of reinforced pavement layers // News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 395-405, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.32, EDN: UOVSDI

1. Введение

В дорожном строительстве техногенные грунты применяются для решения ряда задач, связанных с экономией ресурсов, утилизацией отходов, повышением прочности конструкций и адаптацией к сложным условиям. Техногенный грунт является побочным продуктом различных производств, которые можно использовать как непосредственно в качестве дорожно-строительного материала, так и как исходные продукты для его изготовления. Степень переработки использования техногенных грунтов в России не превышает 12-20% их выпуска [1,2].

Техногенные грунты, являясь многокомпонентными системами, предполагают новые технологические формы их применения. Вместе с тем, в России незначителен объем использования техногенных грунтов [3, 4]. В 70-80-х годах прошлого века политика в дорожном строительстве была направлена на экономию природных материалов и

денежных средств, после 90-х годов применение техногенных грунтов резко сократилось. За указанный период накоплен опыт применения техногенных грунтов с разработкой прогрессивных технологических решений [5, 6]. В большинстве случаев добыча природных каменных материалов в стоимостном выражении выше, чем организация использования техногенного грунта [7-9]. Решение этой проблемы обосновывается недостаточно стабильными результатами их применения в виду большой неоднородности составов и свойств побочных продуктов производств. К настоящему времени имеются перспективные технологические решения по использованию техногенных грунтов в строительстве, включая нормативные документы, и в частности, при переработке ГОСТов разрабатываются требования к техногенным грунтам и критерии оценки их свойств [10, 11].

Применение техногенных отходов в дорожном строительстве является предметом научных исследований ученых. Слободчикова Н.А., Ключев С.В., Плюта К.В., Ключев А.В. рассматривают возможность использования техногенных отходов для укрепления грунтов в дорожном строительстве, анализируют методы и технологии их применения [12]. В своих исследованиях Дмитриева Т. В., Куцына Н. П., Безродных А. А., Строкова В. В. и Маркова И. Ю. рассмотрели вопрос укрепления грунтов в дорожном строительстве посредством введения вяжущих компонентов, таких как цемент, различные модификаторы и комплексные вяжущие составы. Авторы сравнивают физико-механические характеристики грунтобетонов и выявляют преимущества использования комплексных вяжущих или цемента с модификаторами [13].

Значительные запасы техногенных грунтов создали в России огромный сырьевой потенциал [14-16]. Значение и предпосылки рассматриваемого направления заключаются в том, что:

- накопленные запасы вторичных материалов ухудшают природные жизненно-необходимые условия обитания: могут пылить, переноситься с ветром и дождем на большие расстояния, вымываться грунтовыми водами и т.д., нарушая условия жизнедеятельности живых организмов;
- значительные запасы вторичных продуктов занимают сотни га земли, из года в год эти запасы увеличиваются, а количество природных материалов уменьшается;
- стоимость побочных продуктов производства не изменяется и, в основном, определяется расстоянием их доставки от места нахождения до пункта использования, в то же время стоимость природных материалов из года в год увеличивается;
- техногенный материал может быть вяжущим, инертным материалом, активной добавкой, минеральным составляющим и сырьем.

Крупнотоннажными продуктами переработки предприятий цветной металлургии, среднего машиностроения, производства минеральных удобрений, химической и пищевой промышленности являются так называемые гипсосодержащие техногенные грунты. К ним относятся: фосфогипс, в том числе одна из его разновидностей - фосфополугидрат сульфата кальция (ФПГ), фторгипс, фторангидрит, борогипс, титаногипс, килогипс, цитрогипс и др. Применение их в строительстве незначительно, хотя они по своим свойствам и потенциальным возможностям не хуже материалов, о которых упоминалось выше. В состав всех гипсосодержащих материалов входит сульфат кальция различных модификаций в количестве 30-95%. На территории России насчитывается десяток предприятий, выбрасывающих в отвалы гипсосодержащие продукты [18, 19].

При работе с ФПГ необходимо учитывать состав и наличие активных элементов, определяющих его вяжущие свойства (присутствие природных клинкерных минералов, способствующих выявлению потенциальных свойств изучаемого материала по сравнению с природным), а также данные, полученные в результате изучения его физических свойств (размерность, удельная поверхность - в случае порошков, влажность и др.) [20, 21].

Свежий ФПГ из-за наличия пассивирующих пленок на поверхности его кристаллов, затрудняющих их растворение, обладает замедленной скоростью гидратации и удлиненными сроками схватывания. Переход фосфополугидрата сульфата кальция в форму дигидрата сульфата кальция при его естественной влажности (~ 30%) завершается примерно через 500 часов. Время начала схватывания ФПГ зависит от его влажности и может изменяться в широких пределах.

Одним их перспективных направлений использования техногенных грунтов на основе ФПГ является применение их при устройстве укрепленных оснований дорожных одежд на автомобильной дороге. На кафедре «Инженерная геология и геотехника» Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) разработана новая технология производства дорожных плит из переработанных техногенных грунтов на основе ФПГ для устройства сборных оснований дорожных одежд, внедрение которой может представлять интерес с точки зрения повышения ресурсосбережения и технико-экономической эффективности дорожного строительства.

Следует отметить, что группа техногенных грунтов на основе ФПГ менее изучена, чем другие, имеющие опыт применения в строительстве, вторичные продукты, например, такие, как шлаки, золы [17]. Недостаточный объем исследований по определению физико-механических и эксплуатационных свойств переработанных техногенных грунтов на основе ФПГ ограничивает их использование при устройстве укрепленных слоев дорожных одежд автомобильных дорог.

Цель работы: исследование возможности применения при устройстве укрепленных оснований дорожных одежд из переработанных техногенных грунтов, содержащих фосфополугидрат сульфата кальция, способом смешения на автомобильной дороге и изготовлением сборных дорожных плит.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовать физико-механические свойства переработанных техногенных грунтов на основе побочных продуктов разных предприятиями;
- установить влияние исходной влажности техногенных грунтов на прочность при сжатии в разном возрасте;
- изучить прочностные свойства и устойчивость сборных дорожных плит из переработанного техногенного грунта к длительным циклам замораживания-оттаивания;
- провести опытно-промышленное внедрение переработанных техногенных грунтов при устройстве укрепления основания дорожных одежд на автомобильных дорогах.

2. Материалы и методы

Для исследований использовался ФПГ с предприятий ПАО «ФосАгро»-«Воскресенские минеральные удобрения» (Вму), АО Апатит «Балаковские минеральные удобрения» (Бму), полученные при переработке апатитов Карельского месторождения. На основе спектрометрического анализа фосфогипса, полученного в результате переработки апатитов Карелии, установлено, что по радиационному признаку техногенный грунт не является опасным и его удельная активность естественных радионуклидов не превышает норм радиационной безопасности для любого вида строительства (ГОСТ 30108). По санитарно-химическим показателям фосфогипс характеризуется незначительными уровнями миграции химических соединений (SO_3 , P_2O_5 , F), выделяющихся непродолжительное время, не превышающих предельно допустимые концентрации для атмосферного воздуха над проезжей частью дороги. По причине незначительного содержания растворимых химических компонентов в составе ФПГ и установленной их малой концентрацией при растворении, основания дорог из указанного побочного продукта практически не являются источником загрязнения окружающей среды.

Основные показатели свежего фосфополугидрата сульфата кальция, образующегося на Вму / Бму при стабильной работе цехов получения фосфорной кислоты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные показатели свежего фосфополугидрата сульфата кальция

№ п/п	Основные показатели	Вму	Бму
1	Общее влагосодержание	20-40%	28 – 30%
2	Содержание кристаллизационной воды	не более 5 – 7%	не более 5 – 7%
3	Содержание P_2O_5 , общее	1 – 5%	общее 1 – 5%
4	Содержание P_2O_5 , водорастворимое	0,4 – 0,6%	0,4 – 0,6%
5	Величина pH	1,5-3	2,8 – 3,0

Выходящий с Вму и Бму ФПГ имеет низкую радиоактивность ~ 70 Бк/кг и в соответствии с нормами радиационной безопасности не имеет ограничений в применении. В соответствии с ГОСТ 25100 и гранулометрическим составом (Табл. 2), свойствами ФПГ (Табл. 3) техногенные грунты относятся к супеси пылеватой.

Таблица 2

Гранулометрический состав ФПГ

Размер ячейки сита, мм	0,63	0,28	0,14	0,071	Мельче 0,071
Остаток на сите, %	0-12	12-51	63-92	80-100	0-23

Таблица 3

Физические свойства ФПГ (среднее значение показателей)

Суммарное содержание частиц, в %			Пластичность, в %			Наименование грунта по ГОСТ 25100
Песчаных	Пылеватых	Глинистых	Wl	Wp	Ip	
38	51,8	10,2	40,2	36,9	3	Супесь пылеватая

Примечание: Wl – предел текучести, Wp – предел пластичности, Ip – число пластичности.

По ГОСТ 12248, ГОСТ 25684 определялись свойства ФПГ: модуль деформации, коэффициент фильтрации. По ГОСТ 22733, ГОСТ 10180, ГОСТ 23558, ГОСТ 12248 определялись физико-механические свойства техногенных грунтов ФПГ: плотность, прочность при сжатии в водонасыщенном состоянии, морозостойкость (температура замораживания -22°C), модуль упругости.

При проведении промышленного внедрения для устройства конструктивных слоев дорожной одежды (в целях полной замены щебня при соблюдении эквивалентной прочности покрытия) в основании применялся ФПГ в качестве минерального материала (техногенного грунта) и вяжущего (который обладает свойствами схватывания и цементации).

Расчет конструкции дорожной одежды производилось в соответствии с требованиями «Инструкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа» (ОДН 218.046). Определение свойств осуществлялось в соответствии с ГОСТ 12801, СП 78.13330 испытанием образцов-кернов, отобранных из конструктивных элементов автомобильной дороги. Коэффициент уплотнения уложенных слоев контролировался методом динамического зондирования по ГОСТ 19912.

Кроме применения ФПГ в качестве укрепленного слоя оснований дорожных одежд автомобильных дорог этот материал по специально разработанной технологии (в МАДИ на кафедре «Инженерная геология и геотехника») использовался в качестве основного исходного компонента в технологии производства дорожных плит для устройства сборных оснований дорожных одежд. При конструировании и расчете сборных оснований из плит, изготовленных на основе переработанного ФПГ, использовали решения для двухслойной жесткой плиты на упругом основании по методике С.В. Коновалова, М.С. Коганзона, В.И. Заворыцкого.

3. Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были получены физико-механические показатели свойств переработанного техногенного грунта на основе ФПГ (Табл. 4).

Таблица 4

Физико-механические показатели свойств техногенных грунтов из ФПГ с Вму и Бму

Состав смеси	Плотность, г/см ³ м (макс)	Прочность при сжатии, $R_{сж.}$, МПа, в возрасте (сутки)			$K_{мрз}$ после 25 циклов, МПа (после 28 сут.).	Прочность растяжение при изгибе, $R_{изг.}$, МПа, в возрасте (сутки)			Модуль упругости, $E_{упр.}$ МПа
		7	28	90		7	28	90	
1. Свежий ФПГ с Вму / ФПГ с Бму	1,78-2,03 / 1,6-2,01	6,7 / 5,0	7,9 / 6,4	7,9 / 6,4	0,81 / 0,71	3,2 / 2,1	3,7 / 3,2	3,9 / 3,3	1100 - 823
2. Переработанный ФПГ с Вму	2,50 - 2,78	11,5 - 12,8	14,0 - 15,0	14,0 - 15,0	1,0	6,4	7,5	7,5	2800-3000

Приведенные результаты показали, что в зависимости от места отбора ФПГ и производственных технологических линий разных заводов показатели свойств материала (методики определения показателей свойств были одинаковы) отличаются. Но при этом значения показателей марок по прочности и морозостойкости удовлетворяют требованиям, предъявляемым к грунтам, укрепленным неорганическими вяжущими, применяемым для устройства оснований дорожных одежд автомобильных дорог в соответствии с действующими нормативами. И по представленным показателям материал характеризуется марками М50-М60. При отборе проб ФПГ при его использовании как в качестве монолитного слоя дорожной одежды, так и в переработанном виде, необходимым технологическим требованием для эффективного применения является время от его получения до дальнейшего применения.

Установлено также, что максимальным расстоянием доставки ФПГ до места производства работ должно быть не более 100 км. При устройстве дорожных оснований автомобильных дорог из ФПГ особенно следует также учитывать требования по уплотнению укладываемого слоя. При этом оптимальная влажность ФПГ, обеспечивающая получение максимальной плотности при уплотнении, ориентировочно составляет 26-28% и должна уточняться перед началом строительства. Образцы переработанных техногенных грунтов, имели максимальную плотность, при оптимальной влажности 1,60-2,03 г/см³.

Для устройства укрепленных оснований дорожных одежд рекомендуется применять свежий ФПГ, уплотненный до требуемой максимальной плотности, имеющий значения показателей предела прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии, приведенные в таблице 4. Коэффициент фильтрации свежего ФПГ – 0,3 м/сут.

Анализ полученных результатов по применению техногенных грунтов показал, что свойства переработанного ФПГ отличаются от ФПГ в основании дорожных одежд не только по физико-механическим свойствам, но и по условиям формирования материала (образование монолита).

Получены зависимости влияния исходной влажности переработанного ФПГ на прочность при сжатии образцов в разном возрасте (Рис. 1). Приведенные результаты показали, что влажность в значительной степени влияет на прочность материала и не зависит от времени его формирования (3, 7 или 28 суток), поэтому при отборе ФПГ для переработки необходимо учитывать и контролировать его влажность. При этом оптимальная влажность составляла 30%. Как было указано выше, переработанный ФПГ имеет высокие показатели физико-механических свойств (Табл. 4).

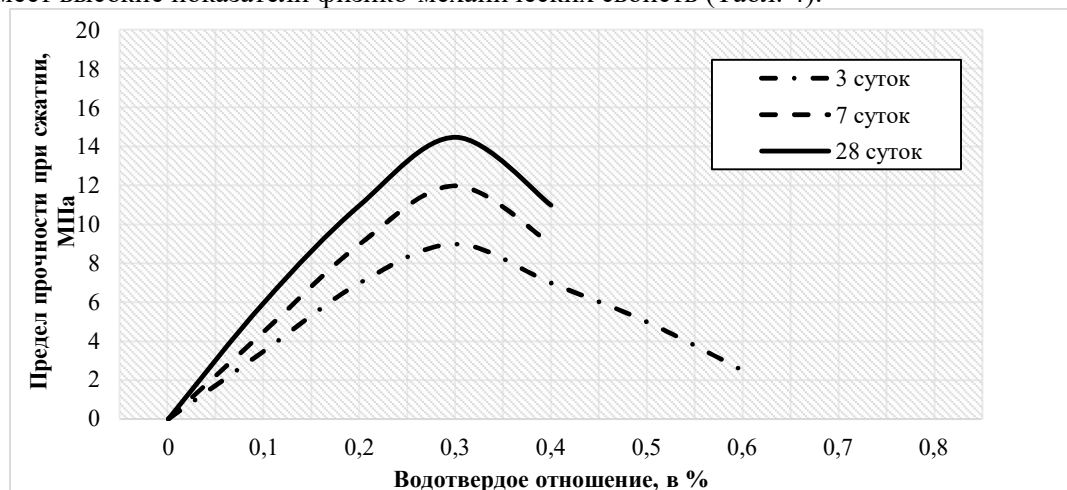


Рис. 1. Влияние исходной влажности переработанного ФПГ на предел прочности при сжатии образцов в водонасыщенном состоянии (иллюстрация авторов)

Fig. 1. The influence of the initial moisture content of recycled phosphohemihydrate on the compressive strength of specimens in a water-saturated state (illustration by the authors)

Учитывая разные климатические условия России, изучалась также устойчивость переработанного ФПГ к длительным циклам замораживания-оттаивания. Определялись показатели морозостойкости после 25, 50, 75, 100 циклов и до разрушения (180-200

циклов), в зависимости от времени выдерживания (после 28, 60 суток и через год) (Рис. 2). При этом получены следующие коэффициенты морозостойкости: после 25 циклов – 1; после 50 циклов – 0,98-1; после 75 циклов – 0,87-0,91; после 100 циклов 0,57-0,70. Данные показатели являются характеристикой морозоустойчивости материала и зависят от его длительного хранения.

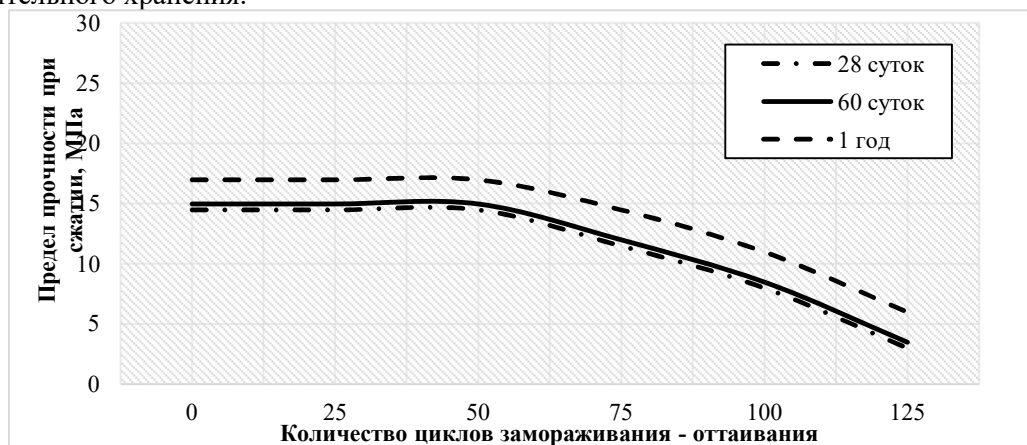


Рис. 2. Прочность при сжатии переработанного ФПГ после циклов замораживания – оттаивания (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Compressive strength of recycled phosphohemihydrate after freeze-thaw cycles (illustration by the authors)

При изготовлении плит из смеси переработанного ФПГ проводились испытания образцов материала на прочность при сжатии и растяжении при изгибе в зависимости от влажности воздуха (Табл. 5).

Таблица 5

Физико-механические свойства переработанного ФПГ при производстве плит для сборного основания

№п/п	Влажность воздуха, %	R _{сж} / R _{изг} , срок хранения (сут.)			R _{изг} / R _{сж}
		7	28	90	
1	под водой	13,8 / 7,0	14,8 / 7,3	16,1 / 8,2	0,49 - 0,51
2	98	12,0 / 6,1	14,3 / 6,9	14,8 / 7,5	0,49 - 0,51
3	50	5,2 / 2,5	10,5 / 5,4	11,6 / 5,9	0,49 - 0,51

Установлено, что составляющие переработанного ФПГ обладают свойством гидравлических вяжущих, что подтверждено проведенными исследованиями. Поэтому полученные дорожные плиты при хранении необходимо поливать водой для требуемого набора прочности. Получено также, что характерной особенностью переработанного ФПГ является высокое значение отношения предела прочности на растяжение при изгибе к пределу прочности на сжатие ($R_{изг}/R_{сж}$) 0,49-0,51. Указанные значения отношения $R_{изг}/R_{сж}$ сохраняется независимо от срока выдерживания и при разной влажности условий набора прочности. Учитывая кинетику формирования, переработанного ФПГ, высокие прочностные свойства (особенно на растяжение при изгибе), а также высокую морозоустойчивость материала можно прогнозировать его надежную работу в конструкции дорожной одежды.

Промышленное внедрение ФПГ проведено на автомобильных дорогах Московской области (обход г. Балашиха) и в Саратовской области (примыкание к автомобильной дороге Самара-Пугачев-Энгельс-Волгоград, в районе села Быков Острог в Балаковском районе), при устройстве слоев дорожных одежд.

После 2 лет эксплуатации дорожной одежды из укрепленных слоев оснований на основе ФПГ с Вму отбирались керны и определялись прочность, морозостойкость и модуль упругости. Прочность при сжатии была в пределах 2,5-7,2 МПа, коэффициент морозостойкости составлял 0,5-1,0, модуль упругости 741,6-1735,6 МПа. Полученные результаты соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к укрепленным грунтам для устройства слоев дорожных одежд, что подтверждает возможность

использования переработанных техногенных грунтов из ФПГ. Важно отметить, что при устройстве дорожных оснований автомобильных дорог с применением ФПГ следует также учитывать требования по уплотнению укладываемого слоя. Получение низких показателей характеристик по сравнению с лабораторными испытаниями объясняется недостаточным уплотнением на некоторых участках. Об этом свидетельствуют приведенные полученные результаты значений плотности кернов, которая составляет 1,01-2,4 г/см³.

Опытно-промышленное внедрение фосфогипсобетонных плит при устройстве основания дорожной одежды проведено на автомобильной дороге в Егорьевском районе Московской области. На земляное полотно из песчано-гравийной смеси сборные дорожные плиты, изготовленные из переработанного ФПГ, размером 1,5х1,5х0,18 м уложены в основание дорожной одежды взамен известнякового щебня марки 400-600 толщиной 21 см. Швы между плитами были заполнены щебнем. Через сутки после укладки плит, на сборное основание был уложен слой асфальтового бетона толщиной 5 см. (Рис. 1).



а) сборное основание дорожной одежды с применением сборных плит, изготовленных из переработанного ФПГ

б) дорожная одежда с основанием из дорожных плит и покрытием из асфальтобетона

Рис. 3 Опытный участок автомобильной дороги в Егорьевском районе Московской области (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Experimental road section in the Yegoryevsky District of the Moscow Region (illustration by the authors)

При визуальном обследовании опытного участка со сборным основанием установлено, что состояние участка дороги с фосфогипсобетонными плитами удовлетворительное, трещин и разрушений не наблюдается. Проводится дальнейшее наблюдение за построенным участком.

В отличие от многокомпонентных систем на основе красного шлама, золы-уноса и фосфогипса [22], где прочность не превышает 5,5 МПа даже с введением цемента, применение переработанного ФПГ позволяет получать материал с более высокими прочностными показателями при использовании разработанных решений.. Это подтверждает рациональность использования переработанных техногенных грунтов на основе ФПГ для устройства укрепленных слоев дорожных одежд.

4. Заключение

1. Определены физико-механические свойства переработанных техногенных грунтов из ФПГ, который является побочным продуктом (в значительном количестве вывозится в отвалы) при производстве фосфорных удобрений на предприятиях АО

ФосАгро «Балаковские минудобрения», «Воскресенские минудобрения». Применение ФПГ, отобранного сразу с технологической линии (эффективнее отбирать материал не более 2 часов от момента производства) позволяет получать укрепленные слои дорожных одежд с маркой по прочности (в среднем) М60 (через 7 суток) и М70 (через 90).

2. Определено, что влажность в значительной степени влияет на прочность материала из ФПГ и не зависит от времени его формирования. Это приводит к необходимости контроля влажности при отборе ФПГ для переработки. Максимальный предел прочности при сжатии достигается при влажности ФПГ равной 30%.

3. Получены зависимости влияния уплотнения на прочность и морозоустойчивость ФПГ в течение длительного периода времени. При использовании ФПГ с разных предприятий необходимо учитывать их разные показатели свойств в зависимости от технологии производства.

4. По разработанной технологии переработки ФПГ были изготовлены дорожные плиты для сборных оснований размером 1,5х1,5х0,16 м, которые в опытным порядке были уложены в качестве сборного основания на автомобильной дороге 4-й категории в Московской области. Изучены и определены требуемые показатели физико-механических свойств, предъявляемых к укрепленным слоям дорожных одежд из ФПГ. Прочность на сжатие и растяжении при изгибе после 7 и 28 суток соответственно составляла: Рсж 12-13,8 МПа, Ризг 6,1-7 МПа; Рсж 14,3-14,8, МПа, Ризг 6,9-7,3 МПа. Модуль упругости составлял около 3000 МПа. Материал выдержал до разрушения около 200 циклов, а коэффициент морозостойкости после 25, 50, 75 циклов изменялся в пределах 1-0,87. Учитывая кинетику формирования переработанного ФПГ и высокие показатели прочностных свойств (особенно на растяжение при изгибе), а также высокую морозоустойчивость материала можно прогнозировать его надежную работу в конструкции дорожной одежды.

5. Результаты исследований показали целесообразность применения техногенных грунтов из ФПГ при устройстве оснований дорожных одежд с использованием технологии укрепления грунтов способом смешения на автомобильной дороге и изготовлением сборных дорожных плит. В процессе проведения опытно-промышленного внедрения установлены особенности технологии применения переработанных техногенных грунтов из ФПГ. Отмечено, т.к. основания дорожных одежд с применением ФПГ чувствительны к воздействию воды, то под ними рекомендуется устраивать дренажные прослойки и проводить другие мероприятия по отводу воды.

Список литературы / References

1. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф. Модификация цемента-песчано-гравийной смесей отходами дорожно-строительных производств // Известия КГАСУ. 2021. № 3(57). С. 32-40. DOI 10.52409/20731523_2021_3_32. EDN JVSSBW. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Mavliev L.F. Modification of cement-sand-gravel mixtures by waste from road construction industries // News of KSUAE. 2021. No. 3(57). P. 32-40. DOI 10.52409/20731523_2021_3_32. EDN JVSSBW.
2. Буланов П.Е., Кудряшов А.А., Вдовин Е.А. Осушение переувлажненных глинистых грунтов жженой магнезией при строительстве земляного полотна // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2025. № 3 (11). С. 52-59. EDN: HZIGRK. Bulanov P.E., Kudryashov A.A., Vdovin E.A. Drainage of waterlogged clay soils with burnt magnesite during the sub-grade construction // Highways and transport infrastructure. 2025. No. 3 (11). P. 52-59. EDN: HZIGRK.
3. Tanyıldızı M., Uz V. E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review // Construction and Building Materials. 2023. 398 p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132435.
4. Dhawale A.W., Banne S. P. Laterite soil stabilization using cellulose biopolymer // Materials Today: Proceedings. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.062.
5. Ляшкевич И.М. БелНИИТИ Госплана БССР, серия 67.15.33, Новые эффективные строительные материалы на основе гипса и фосфогипса. Минск: 1986. 56 с. Lyashkevich I.M. BelNIINTI Gosplan BSSR, series 67.15.33, New efficient building materials based on gypsum and phosphogypsum. Minsk: 1986. 56 p.

6. Putilova I. V. Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. P. 31040–31048. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.230.
7. Díaz-López J. L., Cabrera M., Agrela F., Rosales J. Geotechnical and engineering properties of expansive clayey soil stabilized with biomass ash and nanomaterials for its application in structural road layers // *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2023. 36 p. DOI: 10.1016/j.gete.2023.100496.
8. Munirwan R.P., Taib A.M., Rahman N.A., Munirwansyah M. Utilization of husk ash for soil stabilization: A systematic review // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2022. 128 p. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103252.
9. Turkane S. D., Chouksey S. K. Design of low volume road pavement of stabilized low plastic soil using ash geopolymer // *Materials Today: Proceedings*. 2022. No. 65. Part 2. P. 1154–1160. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.167.
10. Кочеткова Р.Г., Добров Э.М., Назипова Г.А. Совершенствование методики укрепленных грунтов // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2021, №2 (96). Kochetkova R.G., Dobrov E.M., Nazipova G.A. Improving the methodology of reinforced soils. *J. Science and technology in the road industry*. 2021, No. 2 (96).
11. Vdovin E., Bulanov P., Stroganov V., Mavliev L. Physical and Mechanical Characteristics of Modified Soil Cement with Polycarboxylate Superplasticizers // *Proceedings of STCCE: International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering*. 2022. Vol. 291. P 125-133. DOI 10.1007/978-3-031-14623-7_10. EDN DSAMRE.
12. Слободчикова Н.А., Ключев С.В., Плюта К.В., Ключев А.В. Применение техногенных отходов при укреплении грунтов автомобильных дорог // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2024. №. 4. С. 775-786. DOI: <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2024-04-775-786>. Slobodchikova N.A., Klyuev S.V., Pluta K.V., Klyuev A.V. The use of man-made waste in strengthening the soils of highways // *Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Communications*. 2024. No. 4. P. 775-786. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786.
13. Дмитриева Т.В., Куцына Н.П., Безродных А.А., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Эффективность укрепления техногенного грунта минеральными модификаторами // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 7. С. 14–23. DOI: 10.34031/article_5d14bdcc8eca43.21244159. Dmitrieva T.V., Kutsyna N.P., Bezrodnykh A.A., Strokov V.V., Markova I.Yu. Effectiveness of strengthening man-made soil with mineral modifiers // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 7. P. 14–23. DOI: 10.34031/article_5d14bdcc8eca43.21244159.
14. Mavliev L., Vdovin E. Structure of road soil cement compositions modified by complex additive based on organosilicon compounds and electrolytes // *E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2019. Vol. 140 P. 02016. DOI 10.1051/e3sconf/201914002016.
15. Sas W. Geotechnical Properties of Anthropogenic Soils in Road Engineering // *Sustainability*. 2020. doi:10.3390/SU12124843.
16. Бирюков Ю. А., Бирюков А. Н., Титеев И. С. Вторичные строительные материалы в транспортном строительстве: анализ их применения и переработки при реконструкции объектов // *Строительные и дорожные машины*. 2023. № 10. с. 51–62. Biryukov Yu. A., Biryukov A. N., Titeev I. S. Secondary building materials in transport construction: analysis of their application and processing during the reconstruction of facilities // *Construction and road machinery*. 2023. No. 10. P. 51-62.
17. Ключев С. В., Слободчикова Н. А., Плюта К.В., Ключев А.В. Применение техногенных отходов при укреплении грунтов автомобильных дорог // *Известия Петербургского государственного университета путей сообщения*. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 775–786. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786. Klyuyev S. V., Slobodchikova N. A., Pluta K.V., Klyuyev A.V. The use of man-made waste in strengthening the soils of highways // *News of the St. Petersburg State Transport*

- University. SPb.: PGUPS, 2024. Vol. 21, Iss. 4. P. 775-786. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786.
18. Лазарев Ю.Г., Слободчикова Н.А., Плюта К.В., Кузнецова И.О., Гасанов Д.Х., Дудурич Б.Б. Прогнозирование прочностных характеристик, укрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ неорганическими вяжущими материалами // Путевой навигатор. 2024. № 59 (85). С. 52–58.
Lazarev Yu.G., Slobodchikova N.A., Pluta K.V., Kuznetsova I.O., Gasanov D.H., Dudurich B.B. Forecasting the strength characteristics of reinforced ash and slag mixtures of thermal power plants with inorganic binders // Travel Navigator. 2024. No. 59 (85). P. 52-58.
19. Renjith R., Robert D., Setunge S., Costa S., Mohejerani A. Optimization of ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction // Journal of Cleaner Production. 2021. 294 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126264.
20. Бурьянов А.Ф., Полумиев Э.В. К вопросу получения искусственного гипсового камня из фосфогипса // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1 (20). С. 55-58. doi:10.51608/26867818_2023_1_55.
Buryanov A.F., Polumiev E.V. On the issue of obtaining artificial gypsum stone from phosphogypsum // Expert: theory and practice. 2023. No. 1 (20). P. 55-58. doi:10.51608/26867818_2023_1_55.
21. Фоменко А.И., Грызлов В.С., Федорчук Н.М., Каптюшина А.Г. Сухая строительная смесь на основе фосфополугидрата сульфата кальция // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 60–63.
Fomenko A.I., Gryzlov V.S., Fedorchuk N.M., Kaptyushina A.G. Dry building mix based on calcium sulfate phosphohemihydrate // Building materials. 2017. No. 7. P. 60-63.
22. Shengjie Liu, Dahu Rui, Mintae Kim, MingChang Ji, Jun Zhang, Pengfei Zhang, Study on freeze-thaw resistance and Na⁺ leaching characteristics of red mud-fly ash-phosphogypsum multiple solid waste road base material, Cold Regions Science and Technology, Volume 233, 2025, 104448, ISSN 0165-232X, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104448>.

Информация об авторах

Добров Эдуард Михайлович, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация

Кочеткова Рима Габдулловна, кандидат технических наук, доцент, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация

E-mail: rima747@yandex.ru

Горячев Михаил Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация

E-mail: Rudeger@rambler.ru

Information about the authors

Eduard M. Dobrov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

Rima G. Kochetkova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

E-mail: rima747@yandex.ru

Mikhail G. Goryachev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

E-mail: Rudeger@rambler.ru

Дата поступления: 26.01.2026

Дата принятия: 30.04.2026