

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-493-498>

УДК 625.8

Применение фосфогипса в дорожном строительстве

Докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾, докт. хим. наук, проф. В. Н. Яглов¹⁾,
канд. техн. наук, доц. Т. А. Чистова¹⁾, асп. В. В. Гиринский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В настоящее время в Республике Беларусь решается проблема переработки побочного продукта – фосфогипса, образующегося в процессе производства фосфорной кислоты. Вопрос утилизации фосфогипса становится все более актуальным, и причин здесь несколько: транспортирование фосфогипса в отвалы и его хранение требуют больших капитальных вложений и эксплуатационных затрат; при создании отвалов фосфогипса приходится отчуждать большие площади, иногда даже обрабатываемых земель; хранение этого материала в отвалах, даже при нейтрализации растворимых примесей и соблюдении правил эксплуатации отвала, наносит непоправимый вред окружающей среде. Известны исследования ученых по применению фосфогипса в дорожном строительстве в качестве вяжущего для укрепления грунтов, устройства оснований и при проведении ремонтных работ. В статье представлены результаты экспериментов по получению дорожно-строительных материалов из данного отхода без перевода его в вяжущее вещество. Разработана технология приготовления асфальтобетонной смеси с применением минерального порошка в виде фосфогипса-дигидрата.

Ключевые слова: дорожно-строительные материалы, отходы производства фосфорной кислоты, фосфогипс-дигидрат, минеральный порошок, технология приготовления асфальтобетонной смеси

Для цитирования: Применение фосфогипса в дорожном строительстве / Я. Н. Ковалев [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 493–498. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-493-498>

Application of Phosphogypsum in Road Construction

Ya. N. Kovalev¹⁾, V. N. Yaglov¹⁾, T. A. Chistova¹⁾, V. V. Girinsky¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Currently the Republic of Belarus is solving the problem of processing a by-product – phosphogypsum, formed in the process of phosphoric acid production. The issue of utilization of phosphogypsum is becoming more and more relevant, and there are several reasons for this: transportation of phosphogypsum to dumps and its storage require large capital investments and operating costs; when creating phosphogypsum dumps, it is necessary to alienate large areas, sometimes even cultivated land; storage of this material in dumps, even with the neutralization of soluble impurities and with the observance of dump operational rules causes irreparable harm to the environment. There are known studies of scientists on the use

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

of phosphogypsum for road construction as a binder for strengthening soils, foundations and repair work. The paper presents the results of experiments on obtaining road-building materials from this waste without converting it into a binder. Based on the research, a technology for the preparation of asphalt concrete mixtures with the use of mineral powder in the form of phosphogypsum dihydrate has been developed.

Keywords: road construction materials, waste from the production of phosphoric acid, phosphogypsum dihydrate, mineral powder, technology of asphalt concrete mixture preparation

For citation: Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Chistova T. A., Girinsky V. V. (2021) Application of Phosphogypsum in Road Construction. *Science and Technique*. 20 (6), 493–498. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-493-498> (in Russian)

Введение

Применение в дорожном строительстве эффективных материалов на основе местного сырья и отходов промышленности – важная народно-хозяйственная задача, решение которой обеспечит сокращение расхода топливно-энергетических и материальных ресурсов, снизит капитальные вложения. Этому может способствовать широкое использование в качестве исходного сырья фосфогипса-дигидрата.

Фосфогипс – отход, образующийся при производстве экстракционной фосфорной кислоты. На Гомельском химическом заводе фосфогипс находится в отвалах, его накоплено более 10 млн т. Отфильтрованный от фосфорной кислоты фосфогипс-полугидрат сульфата кальция (ФПС), охлаждаясь от 90–105 °С до температуры окружающей среды, постепенно переходит в дигидрат, кристаллизуясь и превращаясь в гипсовый камень, который не обладает вяжущими свойствами. Длительность этого перехода зависит от температуры окружающей среды и количества оставшейся в фосфогипсе фосфорной кислоты и может достигать нескольких часов или суток. Ежегодный прирост отхода составляет около 800 тыс. т. В настоящее время утилизируется его не более 10 % из-за загрязнения фосфогипса различными примесями, требующими нейтрализации [1]. А это увеличивает себестоимость фосфогипсового вяжущего по сравнению с природным гипсом.

Известно много вариантов применения ФПС в дорожном строительстве [2–10]. Однако этого явно недостаточно, хотя сферы использования довольно широки. Авторы статьи предлагают применять фосфогипс-дигидрат в качестве компонента дорожного асфальтобетона – минерального порошка.

В БНТУ разработаны научные принципы и проверена экспериментальная возможность

получения дорожно-строительных материалов непосредственно из промышленных отходов фосфогипса без перевода их в вяжущее вещество [10]. В основе технологии получения смесей для укладки в дороги лежат такие процессы, как измельчение, гомогенизация и смешивание. Для этого требуется серийно выпускаемое оборудование, используемое на цементно- и асфальтобетонных заводах (бункеры, питатели, дозаторы, смесители, мельницы, сушильные барабаны). Полученная смесь может быть сразу пригодна для применения (в течение 2–4 ч) или в сухом виде храниться около одного месяца. Укладка производится с помощью дорожных машин с одновременным уплотнением катками.

Физико-механические свойства фосфогипсового материала в зависимости от вида исходного сырья и степени уплотнения в месячном возрасте следующие:

предел прочности при изгибе, МПа,	– 1,5–5,0;
прочность на сжатие, МПа,	– 3,5–20,0;
средняя плотность, кг/м ³ ,	– 1600–2000;
водопоглощение, %,	– 1–6;
морозостойкость, циклов,	– 25–150.

Экспериментальные исследования

В качестве базового состава асфальтобетонной смеси при исследовании принимали мелкозернистый асфальтобетон (тип Б). Базовый состав включал следующие компоненты, % по массе:

гравий	– 47;
отсев	– 35;
щебень фракций 5–20 мм	– 10;
минеральный порошок	– 8;
битум БНД 90/130	– 5–6.

В лабораторных исследованиях в качестве минерального порошка использовали фосфогипс-дигидрат и активатор в виде гудрона с

вязкостью 2 с. Применение активированных минеральных порошков способствует улучшению структуры асфальтобетона. Такие порошки характеризуются однородностью и более равномерным распределением тонких слоев битума на минеральных зернах, что приводит к меньшему содержанию свободного битума.

Для выяснения влияния исходных компонентов асфальтобетона (битума, гудрона, фосфогипса) на свойства асфальтобетонной смеси провели экспериментальные исследования с использованием математического планирования. Изготавливали образцы асфальтобетона (тип Б), в которых варьировали количество гудрона (X_1), битума (X_2) и фосфогипса (X_3). Содержание исходных компонентов в смеси изменялось следующим образом, %:

- гудрона – от 0,5 до 2,5;
- битума – от 3,5 до 4,5;
- фосфогипса – от 3,0 до 4,0.

В качестве основных параметров для оценки свойств асфальтобетона выбирали показатели: пределы прочности на сжатие R_{20} , R_{50} , R_0 при температурах 20; 50; 0 °С соответственно; плотность ρ ; водонасыщение W ; набухание H ; коэффициент водостойкости K_v ; коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении $K_{v,дл}$.

Технология приготовления образцов из горячей асфальтобетонной смеси в лабораторных условиях заключалась в следующем.

1. Нагревали минеральные материалы (щебень фракций 5–15 мм, отсева и ПГС) до температуры 160–180 °С.

2. Нагревали гудрон до 120 °С.
3. Нагревали воду до 90 °С.
4. Приготавливали смесь «фосфогипс + вода + гудрон» и нагревали ее до температуры 90 °С.
5. Нагревали битум до 160 °С.
6. Смешивали нагретые минеральные материалы с раствором «фосфогипс + вода + гудрон» с добавлением битума.

Затем из готовой асфальтобетонной смеси формировали образцы исходя из необходимости получения для каждой из четырех смесей по 12 образцов стандартного вида ($h = d = 5$ см) (табл. 1).

Таблица 1

Составы экспериментальных асфальтобетонных смесей
Compositions of experimental asphalt concrete mixes

Состав смеси	Номер смеси			
	1	2	3	4
Гравий, %	47	47	46	46
Отсев, %	40	40	40	40
Щебень, %	10	10	10	10
Гудрон, %	0,5	1,0	2,0	2,5
Битум, %	4,0	4,0	3,5	3,5
Фосфогипс, %	3	3	4	4
H ₂ O, г	27,0	27,0	54,0	67,5

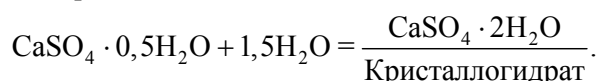
Показатели физико-механических свойств асфальтобетонов, полученные при выполнении опытов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели физико-механических свойств асфальтобетонов (тип Б, марка II)
Indicators of physical and mechanical properties of asphalt concrete (type B, grade II)

Номер смеси	Уровень фактора			Предел прочности R , МПа			Плотность ρ , г/см ³	Водонасыщение W , %	Набухание H , %	Коэффициент водостойкости		$R_{50,дл}$ после длительного водонасыщения
	X_1	X_2	X_3	на сжатие		при растяжении				K_v	$K_{v,дл}$	
				при температуре, °С								
				20	50	0						
Требование СТБ 1033				–	>1,1	1,5–3,5	–	1–4	<1,00	>0,80	–	–
1	0,5	4,0	3	1,80	0,65	3,65	2,25	8,90	0,43	1,30	1,32	1,15
2	1,0	4,0	3	1,79	0,67	3,85	2,31	9,64	0,40	1,25	1,55	1,28
3	2,0	3,5	4	2,60	0,72	3,34	2,26	9,21	0,11	0,75	1,11	1,24
4	2,5	3,5	4	1,79	0,67	3,54	2,27	9,20	0,90	0,97	1,07	1,06

Анализ табл. 2 показывает, что увеличение содержания в смеси битума вызывает повышение прочностных показателей асфальтобетона и коэффициента водостойкости (смесь № 2). Количество гудрона и фосфогипса имеет оптимальную область, т. е. до некоторого значения показатели улучшаются (смеси № 1, 2), а затем начинают ухудшаться. Показатели прочности вначале растут, но при переходе через оптимальную область начинают падать (смеси № 3, 4). Фосфогипс-дигидрат в процессе взаимодействия с горячим каменным материалом теряет полторы молекулы H_2O и переходит в полу-гидрат. Наилучшие показатели водонасыщения W и коэффициента длительной водостойкости $R_{50\text{дл}}$ у смесей № 1–3. При водонасыщении образцов происходит кристаллизация фосфогипса-полу-гидрата в кристалл фосфогипс-дигидрат



Кристаллизация фосфогипса полностью завершается при длительном водонасыщении, тем самым увеличивая прочность образцов – $K_{в,дл}$ принимает значения 1,32; 1,55; 1,11 (смеси № 1, 2, 3 соответственно).

Таким образом, показатель водонасыщения, полученный в ходе лабораторных исследований (смеси № 1–4), включает не только истинное водонасыщение образцов, но и полторы молекулы воды, затраченные на кристаллизацию фосфогипса. Поскольку кристаллизация фосфогипса приводит к повышению прочностных характеристик асфальтобетона и существен-

но не влияет на другие показатели (H , ρ), возникает необходимость определения истинного значения водонасыщения, исключая из прежнего водонасыщения полторы молекулы воды, ушедшие на кристаллизацию фосфогипса.

Варьируя факторами X_1 , X_2 , X_3 , т. е. количеством смеси гудрона, битума и фосфогипса в качестве минерального порошка, получили оптимальные показатели физико-механических свойств асфальтобетонной смеси, которые сравнили с требованиями СТБ 1033–2016 (табл. 3).

Анализируя показатели оптимизированной асфальтобетонной смеси, следует отметить, что все характеристики физико-механических свойств, за исключением предела прочности при растяжении при температуре $0^\circ C$ (R_0), отвечают требованиям СТБ 1033–2016. Предел прочности после длительного водонасыщения $R_{50\text{дл}}$ имеет гораздо большее значение, чем до кристаллизации фосфогипса в образце. Исходя из этого за R_{50} принимаем показатель предела прочности на сжатие при $50^\circ C$ после длительного водонасыщения ($R_{50\text{дл}}$).

Технология приготовления горячей асфальтобетонной смеси с применением фосфогипса-дигидрата

На основании проведенных исследований разработана производственная технология приготовления горячих асфальтобетонных смесей с применением минерального порошка в виде фосфогипса-дигидрата. В основу ее заложены теоретические предпосылки, проверенные в ходе экспериментов.

Таблица 3

Сравнение показателей асфальтобетонной смеси
Comparison of indicators of asphalt concrete mix

Наименование показателя	Значение показателя		
	для экспериментальной смеси с минеральным порошком (X_1 , X_2 , X_3) (1,8; 4,0; 3,0)	по СТБ 1033 (тип В, марка II)	
Предел прочности на сжатие R_{50} , МПа, при температуре $50^\circ C$	0,90	Не менее 1,2	
Предел прочности на сжатие после длительного водонасыщения $R_{50\text{дл}}$, МПа, при температуре $50^\circ C$	1,31	–	
Предел прочности на сжатие R_{20} , МПа, при температуре $20^\circ C$	2,31	–	
Предел прочности при растяжении R_0 , МПа, при нуле градусов	3,80	1,5–3,5	
Средняя плотность ρ , г/см ³	2,26	–	
Водонасыщение по объему W , %	0,71	От 1 до 4	
Набухание H , %	0	Не более 1	
Коэффициент длительной водостойкости:	$K_{в14\text{сут}}$	0,87	Не менее 0,85
	$K_{в28\text{сут}}$	1,35	–

Асфальтобетонную смесь приготавливали на установке Д-177-2К. На отдельной технологической линии готовилась смесь «фосфогипс – вода – гудрон» и в горячем состоянии подавалась в смеситель установки Д-177-2К.

Схема технологического цикла по производству асфальтобетонной смеси приведена на рис. 1. Смесь «фосфогипс – вода – гудрон» готовилась следующим образом: сырье фосфогипс-дигидрат с помощью погрузчика подавалось в приемный бункер глинорыхлителя. Здесь с помощью бил производились рыхление, измельчение и проталкивание фосфогипса через решетку. Размельченный фосфогипс поступал в рабочую зону мешалки.

При заполнении мешалки на 1/2 объема поступление фосфогипса прекращалось и включался вал с лопастями, который перемешивал фосфогипс на сухую. После этого в мешалку одновременно подавалось равное количество воды, нагретой до 90 °С, и гудрона, нагретого до 160 °С. Таким образом, на свежобразованной поверхности фосфогипса адсорбировался гудрон, что в дальнейшем приводило к возникновению прочных физико-химических связей на минеральной поверхности с органическим вяжущим.

Подача воды и гудрона регулировалась оператором установки. Полученная масса битумным насосом прокачивалась через электронагреватель. Циркуляция смеси прекращалась

после получения однородной массы с заданной с помощью термодатчика температурой.

Полученная таким образом смесь «фосфогипс – вода – гудрон» посредством насоса дозированных порциями подавалась в смесительное отделение асфальтобетонной установки. Здесь смесь перемешивалась с каменными материалами. Одновременно в смеситель подавалась порция битума. При перемешивании смеси «фосфогипс – вода – гудрон» с горячими минеральными материалами происходит испарение воды, а частички фосфогипса, окруженные тонкой пленкой гудрона, плотно прилипают («прикипают») к поверхности минеральных частиц, образуя новую модифицированную поверхность, активно вступающую во взаимодействие с битумом, структурируя его и повышая адгезию битума к поверхности минеральных частиц. Кроме того, что частички фосфогипса заполняют межзерновые пустоты в минеральном остове и обеспечивают его плотность, они выполняют еще и роль активатора каменного материала. Одновременно с этим испаряющаяся вода вспенивает битум, переводя его в тонкопеночное состояние. Битум обволакивает частички минеральных материалов тонкой высокоструктурированной оболочкой. При этом частички минеральных материалов связываются между собой в результате контакта таких оболочек, что обеспечивает их наиболее прочное сцепление.

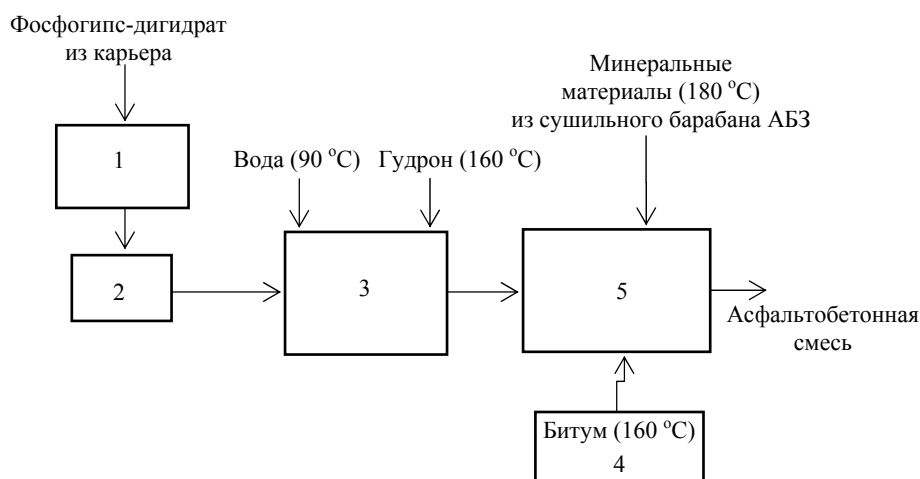


Рис. 1. Блок-схема технологической линии по производству асфальтобетонной смеси «фосфогипс – вода – гудрон – битум»: 1 – источник складирования фосфогипса; 2 – глинорыхлитель; 3 – мешалка; 4 – битумный насос с электроподогревом; 5 – смесительное отделение асфальтобетонной установки; АБЗ – асфальтобетонный завод

Fig. 1. Block diagram of technological line for production of asphalt concrete mixture “phosphogypsum – water – tar – bitumen”: 1 – source of phosphogypsum storage; 2 – clay ripper; 3 – mixer; 4 – electrically heated bitumen pump; 5 – mixing room of asphalt concrete plant; АБЗ [ACP] – asphalt concrete plant

Следует особо подчеркнуть, что при попадании смеси на горячие минеральные материалы температура последних снижается. Поэтому для обеспечения температуры асфальтобетонных смесей при выпуске их из смесителя и укладке в конструктивный слой необходимо минеральные материалы в сушильном барабане нагревать выше нормативного значения на 20–25 °С.

ВЫВОДЫ

1. Разработан состав активированного минерального порошка на основе фосфогипса-дигидрата.

2. Проведены исследования с использованием математического планирования эксперимента. Определено влияние исходных компонентов минерального порошка на свойства асфальтобетонной смеси. В частности, установлено, что с увеличением содержания битума в асфальтобетонной смеси наблюдается повышение прочности на сжатие в среднем на 15 %.

3. При водонасыщении образцов происходит кристаллизация фосфогипса-полугидрата в кристалл фосфогипс-дигидрат, которая полностью завершается при длительном водонасыщении, тем самым увеличивая прочность образцов. Отмечено, что предел прочности после длительного водонасыщения $R_{50дл}$ имеет гораздо большее значение, чем до кристаллизации фосфогипса в образце.

4. В результате анализа различного соотношения гудрона, битума и фосфогипса в качестве минерального порошка выбран оптимальный состав асфальтобетонной смеси и получены наилучшие показатели ее физико-механических свойств, отвечающие требованиям СТБ 1033–2016.

5. Разработана технология получения асфальтобетонной смеси с применением фосфогипса-дигидрата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Недосеко, И. В. Технология получения гипсового вяжущего из фосфогипса с адсорбционной очисткой от вредных примесей / И. В. Недосеко. Минск, 1991. 15 с.
2. Способ получения вяжущего: пат. 2200714 Рос. Федерации / В. П. Сучков, Э. В. Киушкин. Опубл. 20.03.2003.
3. Яшин, С. Л. Технология и свойства модифицированных фосфогипсом битумо-минеральных композиций / С. Л. Яшин. Грозный, 2013. 152 с.
4. Рекомендации по применению фосфогипса-полугидрата Гомельского химического завода при проектировании и строительстве дорожных одежд / М-во строи-

тельства и эксплуатации дорог БССР. Трест «Оргдорстрой». Минск, 1990. 34 с.

5. Иваницкий, В. В. Фосфогипс и его использование / В. В. Иваницкий, П. В. Классен, А. Д. Новиков. М.: Химки, 1990. 224 с.
6. Новые методы переработки и применения каменных материалов и отходов промышленности в дорожном строительстве: тр. СоюздорНИИ. М.: СоюздорНИИ, 1982. 124 с.
7. Использование фосфогипса в дорожном строительстве / В. С. Исаев [и др.] // Автомобильные дороги. 1987. № 1. С. 9–10.
8. Колев, И. А. Получение строительных материалов и изделий путем механохимической активации фосфогипса / И. А. Колев. Л., 1989. 25 с.
9. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 368 с.
10. Жаврид, С. С. Строительные изделия и конструкции из полимерфосфогипса / С. С. Жаврид, В. И. Малихторович, В. М. Абрамов. Минск: Ураджай, 1982. 168 с.

Поступила 01.06.2021

Подписана в печать 09.08.2021

Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Nedoseko I. V. (1991) *Technology for Producing Gypsum Binder from Phosphogypsum with Adsorption Purification from Harmful Impurities*. Minsk, 1991. 15 (in Russian).
2. Suchkov V. P., Kiushkin E. V. (2003) *Method for Obtaining a Binder*. Patent 2200714 Russian Federation (in Russian).
3. Yashin S. L. (2013) *Technology and Properties of Bitumen-Mineral Compositions Modified with Phosphogypsum*. Grozny. 152 (in Russian).
4. Ministry of Construction and Operation of Roads of the BSSR. Trust “Orgdorstroy” (1990) *Recommendations for the Use of Phosphogypsum Semi-Hydrate of the Gomel Chemical Plant in the Design and Construction of Road Pavements*. Minsk. 34 (in Russian).
5. Ivanytsky V. V., Klassen P. V., Novikov A. D. (1990) *Phosphogypsum and its Application*. Moscow, Khimki Publ. 224 (in Russian).
6. *New Methods of Processing and Application of Stone Materials and Industrial Waste in Road Construction*. Proceedings of Soyuzdor Research Institute. Moscow, Soyuzdormii Publ., 1982. 124 (in Russian).
7. Isaev V. S., Yumashev V. M., Grebenevich N. P., Kochetkova R. G. (1987) The Use of Phosphogypsum in Road Construction. *Avtomobilnye Dorogi* [Highways], (1), 9–10 (in Russian).
8. Kolev I. A. (1989) *Obtaining Construction Materials and Products by Mechanochemical Activation of Phosphogypsum*. Leningrad. 25 (in Russian).
9. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L. (2007) *Construction Materials from Industrial Waste*. Rostov on Don, Feniks Publ. 368 (in Russian).
10. Zhavrid S. S., Malikhatorovich V. I., Abramov V. M. (1982) *Building Products and Structures Made of Polymer Phosphogypsum*. Minsk, Uradzhayi Publ. 168 (in Russian).

Received: 01.06.2021

Accepted: 09.08.2021

Published online: 30.11.2021