

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №5, Том 12 / 2020, No 5, Vol 12 <https://esj.today/issue-5-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/48SAVN520.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Герасимов Д.В., Игнатьев А.А., Готовцев В.М. Фосфогипс как компонент дисперсно-упрочнённого композита на примере гранулированной асфальтобетонной смеси // Вестник Евразийской науки, 2020 №5, <https://esj.today/PDF/48SAVN520.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Gerasimov D.V., Ignatev A.A., Gotovtsev V.M. (2020). Phosphogypsum as a component of a dispersed-reinforced composite on the example of a granulated asphalt-concrete mix. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 5(12). Available at: <https://esj.today/PDF/48SAVN520.pdf> (in Russian)

*Авторы статьи благодарят руководство Ярославского государственного технического университета за содействие и обеспечение лабораторно-технической базой для проведения данного исследования. Статья написана в рамках гранта «СТАРТ-1» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям)*

**УДК 691; 625.8**

**ГРНТИ 67.09.43; 67.09.55; 87.53.13**

**Герасимов Денис Владимирович**

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия

Ассистент

E-mail: [gerasimovdv@ystu.ru](mailto:gerasimovdv@ystu.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6213-7294>

РИНЦ: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1086569](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1086569)

**Игнатьев Алексей Александрович**

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия

Директор института инженеров строительства и транспорта

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [ignatyevaa@ystu.ru](mailto:ignatyevaa@ystu.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1425-5330>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=652263](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=652263)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57214068730>

**Готовцев Валерий Михайлович**

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия

Профессор

Доктор технических наук, профессор

E-mail: [gotovtsev\\_vm@mail.ru](mailto:gotovtsev_vm@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4272-9209>

**Фосфогипс как компонент  
дисперсно-упрочнённого композита на примере  
гранулированной асфальтобетонной смеси**

**Аннотация.** Статья посвящена актуальной тематике применения крупнотоннажных промышленных отходов в области дорожного строительства с целью их утилизации и рационального использования традиционных дорожно-строительных материалов. В статье проведён анализ существующей технологии приготовления асфальтобетонных смесей с традиционной органоминеральной композицией, с описанием ключевых недостатков, которые негативно влияют на теоретически достижимые эксплуатационные характеристики

асфальтобетонного композита. Авторами предложена альтернативная технология, основанная на технологическом приёме гранулирование окатыванием, который позволяет получить упорядоченную структуру асфальтовяжущего вещества вокруг каждой частицы крупного каменного заполнителя. В качестве основного компонента асфальтовяжущего – мелкого минерального заполнителя, рассматривается применение фосфогипса – крупнотоннажного отхода химической перерабатывающей промышленности. В статье рассмотрена структура асфальтовяжущего, полученного по технологии гранулирование окатыванием, представлено описание процесса образования дисперсно-упрочнённой структуры материала. Изучены свойства фосфогипса в сравнении с традиционно применяемым при производстве асфальтобетонных смесей неактивированным минеральным порошком на основе карбонатных минералов. Авторами рассмотрена возможность утилизации фосфогипса в области дорожного строительства. Предложен новый способ применения фосфогипса в качестве мелкого заполнителя дисперсно-упрочнённого асфальтобетонного композита, полученного по технологии гранулирование окатыванием. Для подтверждения теоретических предположений и определения наиболее пригодного типа фосфогипсового сырья представлены результаты экспериментальных исследований. В ходе анализа экспериментальных данных предложены рациональные пути дальнейшего повышения эксплуатационных показателей разработанного материала – гранулированной асфальтобетонной смеси с применением фосфогипса. Авторами представлены доказательства возможности использования разработанного материала в качестве холодной асфальтобетонной смеси. Статья является частью диссертационного исследования.

**Ключевые слова:** фосфогипс; асфальтобетон; дисперсно-упрочнённый композит; гранулированная асфальтобетонная смесь; переработка отходов; эффект структурирования битума; межфазное взаимодействие

## Введение

Асфальтобетон – наиболее распространённый искусственный материал покрытия дорог и аэродромов на планете. Данный композит, существенно отличается от материала, который использовался в начале XX века, в первую очередь по прочностным и эксплуатационным показателям. Однако, как и 120 лет назад, асфальтобетон подвержен разного рода деформациям и разрушениям в силу воздействия различных факторов, а именно: нагрузок от подвижного состава и климатических факторов. Ежегодно, общемировая интенсивность трафика возрастает на 7,38 % [1]. Помимо этого, из года в год растут и другие характеристики транспортного потока, а именно, грузоподъёмность транспортных средств и их скорость движения, доля дорог с капитальным типом дорожных одежд и общая совокупная протяженность автодорожной сети.

С целью увеличения прочностных и эксплуатационных показателей асфальтобетона в настоящее время в состав вводятся модифицирующие добавки, непрерывно совершенствуется уплотняющая техника, сформированы чёткие требования к технологии производства и укладки асфальтобетонных смесей. Несмотря на эти меры, срок службы асфальтобетонных покрытий остается сравнительно небольшим. Наибольшими деформациям и разрушению покрытие подвергается в весенне-осенний периоды, когда оно чрезмерно увлажнено или долговременно находится во влажном состоянии. Наличие воды в структуре материала является отягощающим фактором разрушения дорожного покрытия и может свидетельствовать о несовершенстве этой структуры или недостатках технологии производства.

Изменение ценовой политики производства асфальтобетона не менее тяжелая задача. Возможным решением данной проблемы является применение отходов промышленности в структуре асфальтобетона. Так в условиях экономики общества потребления и

нерационального использования природных ресурсов, образуются колоссальные объёмы отходов. Большая часть из которых могут быть использованы вторично и их потенциал и свойства до конца не раскрыты. В свою очередь, область дорожного строительства является одной из самых перспективных и рентабельных с целью реализации планов вторичного использования многотоннажных промышленных и бытовых отходов.

Таким образом, целью данного исследования является анализ существующей технологии производства асфальтобетонных смесей и разработка альтернативной технологии производства новой асфальтобетонной смеси, основанной на применении вторично переработанного сырья, обладающей высокими показателями прочности и водостойкости (фосфогипса).

### Методы

Обзор научных исследований и патентной базы в области рассматриваемой тематики показал, что далеко не всё в технологии производства асфальтобетонных смесей изменялось с течением времени. Неизменными с начала XX века остались принципиальный состав и способ смешивания компонентов в асфальтосмесителе, что приводит к появлению следующих недостатков:

- Низкая степень равномерности распределения битума по объёму смеси. Это приводит к агломерации мелкодисперсных минеральных частиц с высокой удельной поверхностью вокруг крупных капель вяжущего, пребывающего в объёмной фазе. Высокая площадь реакционной поверхности минерального порошка потребляет до 95 % вводимого битума [2], что негативно отражается на качестве сцепления частиц крупного каменного заполнителя между собой.
- Высокая пористость и неоднородность асфальтовяжущего вещества, состоящего из минерального порошка и битума. По мнению исследователя в области проектирования асфальтобетонных смесей Сахарова П.В., асфальтовяжущее играет роль основного структурного элемента асфальтобетона, объединяющего более крупные частицы [3]. От прочностных характеристик асфальтовяжущего зависит общая прочность асфальтобетона [4]. Асфальтовяжущее является ярким примером дисперсно-упрочнённого композита, в котором пространственную матрицу (дисперсионная среда) образует совокупность оболочек битума, вокруг частиц мелкого минерального заполнителя (дисперсная фаза).
- В реалиях существующей технологии смешивания компонентов, при соотношении минеральный порошок/битум от 38:62 до 66:34<sup>1,2</sup>, полученная структура материала не всегда является дисперсно-упрочнённым композитом. Поскольку, согласно исследованиям Волкова М.И. и Борща И.М., лишь при соотношении в текущей бинарной системе от 60:40 до 80:20 образуется непрерывная по структуре пространственная матрица с резким повышением механической прочности системы [5; 6].

Перечисленные недостатки ведут к потере потенциально возможной прочности и водостойкости асфальтобетона, и могут быть минимизированы за счёт корректировки состава

---

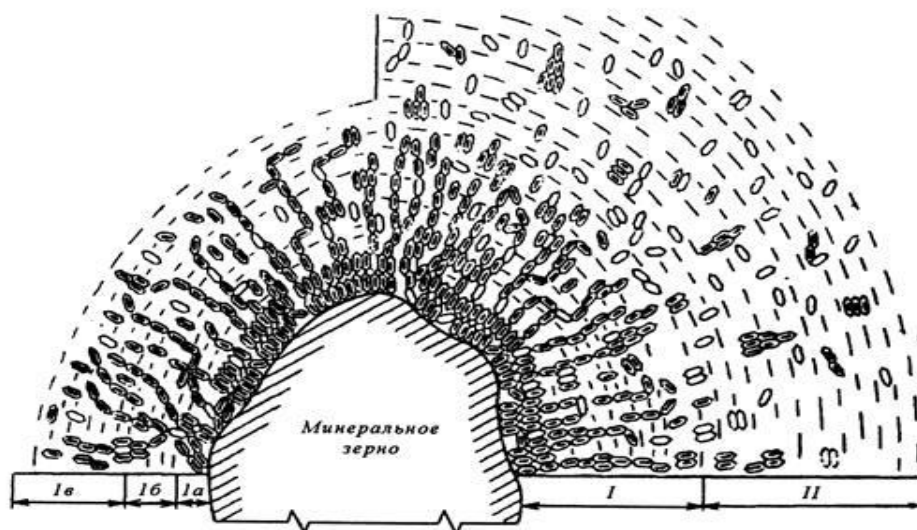
<sup>1</sup> ПНСТ 184-2019. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 27 с.

<sup>2</sup> Методические рекомендации по устройству верхних слоев дорожных покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона. – Москва, 2002. – 36 с.

смеси и режима её перемешивания. Однако, увеличение интенсивности смешивания компонентов, очевидно, повлечёт более обильное образование пустот в материале, повышение энергоёмкости производства, а также более быстрый износ деталей асфальтосмесителя. Таким образом, возникает необходимость решения поставленных задач другим способом.

Известен способ применения технологического приёма гранулирование окатыванием с целью производства асфальтобетонной смеси [7]. Суть технологии заключается в создании оболочки асфальтвяжущего вещества вокруг каждой частицы крупного каменного заполнителя, помещенной во вращающийся барабан-гранулятор при температуре 150 °С. Оболочка асфальтвяжущего образуется за счёт попеременного ввода порций минерального порошка и битумного вяжущего. При уплотнении готовой асфальтобетонной смеси, оболочки асфальтвяжущего надёжно скрепляют частицы крупного каменного заполнителя, образуя монолитную водостойкую структуру с низкой пористостью и повышенной прочностью.

Структура асфальтвяжущего, полученного по такой технологии, является дисперсно-упрочнённым композитом, обладает высокой изотропностью и имеет упорядоченный характер расположения дисперсных частиц. За счёт развитой удельной поверхности традиционного минерального порошка МП-1 на уровне 3000–4600 см<sup>2</sup>/г [8], на поверхности минеральных зерен наблюдается эффект структурирования частиц битума. При этом различают межфазный (структурированный) и объёмный слой. На рисунке 1 представлена схема взаимодействия тонкой пленки битума с минеральным материалом.



*I – структурированный (межфазный) слой; II – объёмный битум; Ia – твердообразная зона; Iб – структурированная зона; Iв – диффузная зона*

**Рисунок 1.** Строение плёнки битума на минеральной частице [9]

В теории композиционных материалов большая роль отводится межфазному слою, который обладает особыми свойствами. Характер силовых взаимодействий в межфазном слое существенно отличается от таковых в объёмной фазе. Молекулы, находящиеся внутри объёмной фазы, испытывают одинаковые воздействия со всех сторон. На молекулы, находящиеся в межфазном слое, с разных сторон действуют силы неодинаковой величины. Межфазный слой граничит с одной стороны с объёмной фазой, с другой – с твердой поверхностью, что приводит к образованию равнодействующей этих сил, направленной перпендикулярно поверхности раздела фаз [10]. Толщина межфазного слоя битума по оценке ряда источников варьируется в пределах от нескольких ангстрем до тысяч ангстрем [11; 12] и предположительно соответствует утроенному радиусу сил межмолекулярного

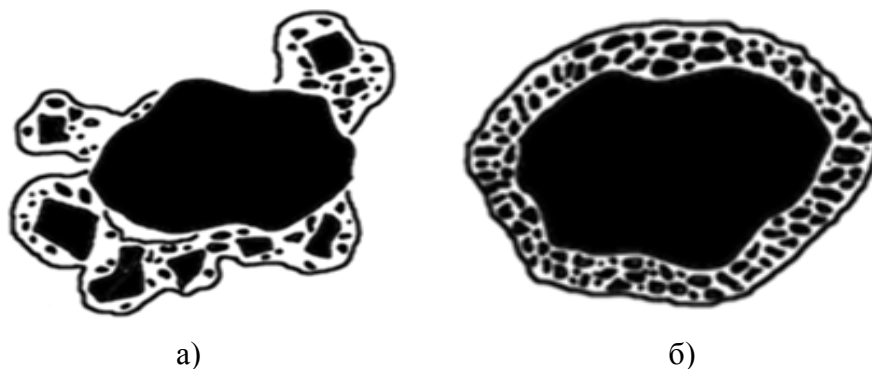
взаимодействия<sup>3</sup>. В случае обеспечения взаимного пересечения структурированных межфазных слоёв, в области их обоюдного воздействия значительно возрастает внутреннее давление в жидкости, обусловленное действием сил межмолекулярного взаимодействия Ван дер Ваальса. Именно это давление является определяющим показателем прочности прослойки битума, увеличение внутреннего давления в связующем означает повышение прочности композита в целом.

Технология гранулирования окатыванием позволяет создать плотную упаковку частиц минерального порошка, обеспечивающую перекрытие межфазных слоёв. Формирование данной структуры обусловлено характером действующих на частицы сил в процессе образования и роста гранулы.

Частицы минерального порошка в процессе движения контактируют с поверхностью растущих гранул. В ходе такого контакта возможны два исхода:

1. частица порошка прилипла к смоченной поверхности гранулы и вошла в её состав, что свидетельствует о преобладании сил удерживания над кинетическими силами, стремящимися сорвать частицу с поверхности гранулы;
2. частица порошка вошла в контакт с гранулой, но была сорвана с ее поверхности движущимся материалом, что свидетельствует о недостаточном покрытии поверхности частицы/гранулы битумом, недостаточной площади поверхности контакта или слишком большой толщине прослоек битума, и как следствие, обратном соотношении сил.

Таким образом, формируется структура, представленная на рисунке 2б.



**Рисунок 2.** Структура асфальтовяжущего: а) по традиционной технологии; б) по технологии гранулирования окатыванием (составлено авторами)

За счёт более полного перевода битума из объёмного состояния в плёночное, его общее процентное содержание в смеси составляет всего от 8 до 10 %. Процентное содержание минерального порошка в составе гранулированной асфальтобетонной смеси составило около 30 % от общей массы смеси. Возросшая доля минерального порошка МП-1 в составе смеси, делает весьма актуальной задачу его замены на аналог с более низкой стоимостью.

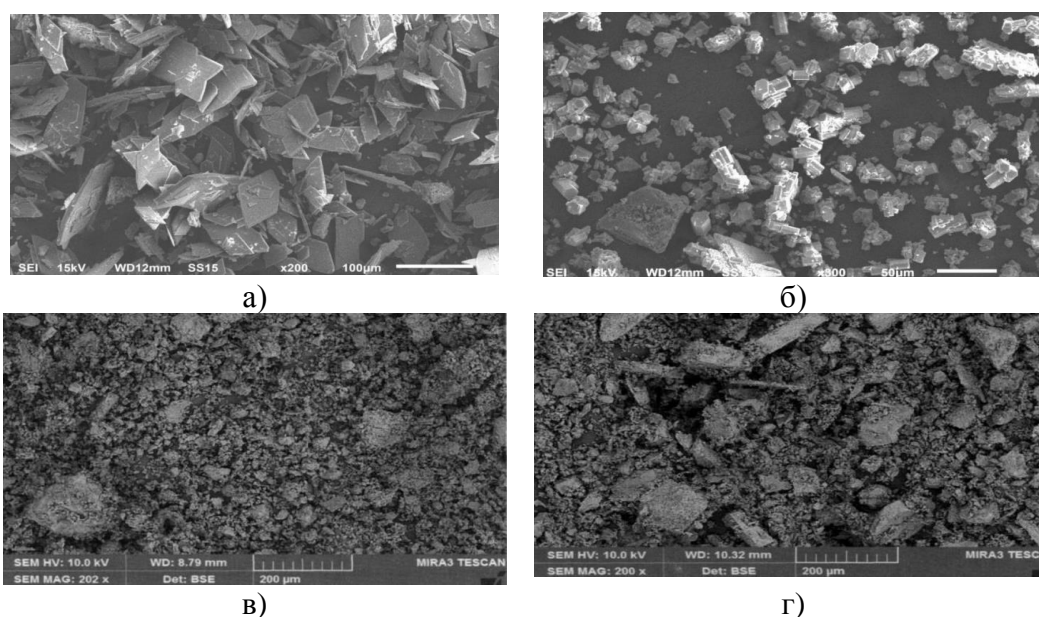
Помимо экономических соображений важным моментом является набирающая с 2000 года популярность концепции Zero Waste (англ. «Ноль отходов»). Суть концепции заключается в уменьшении до нуля образующихся отходов, а также рациональное использование существующих природных ресурсов планеты.

<sup>3</sup> Беляков Е.О. Построение петрофизических моделей фильтрационно-емкостных свойств текстурно-неоднородных терригенных коллекторов. – Тюмень. – 1998. – 131 с.

Поиск аналога вёлся среди крупнотоннажных мелкодисперсных промышленных отходов, схожих с минеральным порошком МП-1 по основным техническим характеристикам – фракционный состав, площадь удельной поверхности частиц и высокая адгезионная способность к взаимодействию с битумом. Таким образом, был выбран побочный продукт (отход) производства экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК), фосфора и минеральных удобрений – фосфогипс.

Фосфогипс представляет собой мелкодисперсный порошок на 80...98 % состоящий из дигидрата и полугидрата сульфата кальция ( $0,5\text{H}_2\text{O}\cdot\text{CaSO}_4$  и  $2\text{H}_2\text{O}\cdot\text{CaSO}_4$ ) в виде мелких кристаллов. Также он содержит примеси растворимых (серная кислота, фосфорная кислота, моно- и дикальций фосфат) и нерастворимых (фосфаты, фториды, оксиды) веществ, в т. ч. радиоактивных элементов, тяжелых металлов и иных вредных и токсичных элементов. На выходе с технологического цикла производства ЭФК, в зависимости от типа технологии, образуется чистый полугидрат и дигидрат фосфогипса или смесь полугидрата с дигидратом. После хранения отвальным методом по большей мере восстанавливается до дигидрата. По разным оценкам относится к IV классу опасности отходов [13].

Проблема утилизации фосфогипса остро стоит во многих странах с развитой промышленностью по переработке апатитовых руд. Российская Федерация на протяжении многих десятилетий неизменно входит в пятёрку лидеров по добыче и переработке апатитов в мире. В ходе переработки из обогащённой апатитовой руды, при получении 1 т фосфорной кислоты, в зависимости от применяемой технологии и сырья, получается от 2 до 6 т фосфогипса [14]. По данным на 2018 год ежегодно в РФ образуется до 15 млн. т фосфогипса, а накопленные объёмы составляют более 300 млн т [15]. В РФ вторично перерабатывается не более 10 % от общего годового объёма фосфогипса, в основном в области производства строительных и отделочных материалов, реже в области сельского хозяйства для мелиорации солонцовых почв. Любая технология, позволяющая повысить процент вторично переработанного фосфогипса, в сложившейся экологической ситуации является в перспективе полезной.



**Рисунок 3.** Форма частиц мелкого минерального заполнителя:

а) фосфогипс дигидрат; б) фосфогипс полугидрат; в) МП-1 помол на шаровой мельнице; г) МП-1 помол на центробежной мельнице<sup>4</sup> [16]

<sup>4</sup> Ряжко А.И. Разработка ресурсосберегающей технологии экстракционной фосфорной кислоты из фосфоритов Коксу. – Москва. – 2015. – 147 с.

Особенностью фосфогипса является зависимость морфологии кристаллов, а, следовательно, удельной поверхности от степени гидратированности. В ходе фазового перехода от дигидрата к полугидрату сульфата кальция при температуре 100–180 °С происходит значительный рост удельной поверхности и изменение формы частиц от пластинчато-игловатой до шестиугольной призмы (рис. 3а, 3б).

Площадь удельной поверхности в ходе перекристаллизации возрастает от значений 2500...3500 см<sup>2</sup>/г до 3000...5000 см<sup>2</sup>/г. При дальнейшей дегидратации при температуре выше 180–200 °С образуется ангидрит сульфата кальция или «мертвый» гипс, происходит разрушение кристаллов полугидрата, с преобладанием округлой формы частиц, с уменьшением удельной поверхности частиц до значения 2000...3500 см<sup>2</sup>/г.

Как показали исследования минерального порошка, проведённые Дедюхиным А.Ю., изменение формы частиц от окатанных (рис. 3в) к угловатым (рис. 3г) [16], с совместным увеличением удельной поверхности материала приводит к повышению прочности и сдвигоустойчивости асфальто вяжущего, а, следовательно, асфальтобетона в целом. Результаты электронного микроскопирования (рис. 3) подтверждают более угловатую форму частиц фосфогипса по сравнению с традиционным минеральным порошком вне зависимости от степени гидратированности фосфогипса и способа помола МП-1. Замена МП-1 в составе гранулированной асфальтобетонной смеси на фосфогипс должна привести к скачку прочности и сдвигоустойчивости асфальтобетонного композита. Таким образом, ожидаемым результатом использования полугидрата фосфогипса, в сравнении с дигидратом и ангидритом, является достижение максимальных прочностных характеристик асфальтобетона.

Однако в случае с фосфогипсом модификация поверхности частиц путём дегидратации до полугидрата помимо улучшения характеристик теоретически приведёт и к негативным последствиям. Полугидрат сульфата кальция обладает повышенной гидрофильностью и восстанавливается до дигидрата с незначительным набуханием – около 0,6 %. Помимо этого, в ходе гидратации происходит обратный процесс перекристаллизации, который может повлечь разрушение оболочек битума и нарушение упорядоченной структуры матрицы.

С целью обоснования возможности применения фосфогипса в качестве замены минерального порошка МП-1 в составе асфальтобетонной смеси, полученной с использованием технологического приёма гранулирование окатыванием, было решено перейти от теоретических выкладок к эксперименту.

## Результаты

В ходе эксперимента изготовлена партия гранулированной асфальтобетонной смеси с использованием фосфогипса трёх степеней гидратации (полугидрат, дигидрат и ангидрит), а также контрольной партии смеси, изготовленной с использованием минерального порошка МП-1 без модификации поверхности. Изготовленная гранулированная асфальтобетонная смесь формовалась и испытывалась по методике ГОСТ 12801-98<sup>5</sup>. За ключевые параметры контроля результатов испытаний были избраны: сопротивление сжатию при 20 °С, водонасыщение и коэффициент водостойкости. Численные параметры контролируемых показателей сравнивались с нормативными по ГОСТ 9128-2013<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> ГОСТ 12801-98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – Москва: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 63 с.

<sup>6</sup> ГОСТ 9128-2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 50 с.

Содержание компонентов от общей массы смеси в ходе эксперимента: крупный каменный наполнитель фр. 5...10 – 62 %; мелкий минеральный наполнитель – 40 %; битум БНД 60/90 – 8 %. Температура грануляции – 150 °С.

Полученная асфальтобетонная смесь представляет собой чёрные окатыши с слабо выраженным глянцевым блеском, от 6 до 12 мм в диаметре, без ярко выраженного слипания под собственным весом при температуре до 40 °С.

По ГОСТ 9128-2013 гранулированная асфальтобетонная смесь охарактеризована как горячая плотная смесь типа А, марка П. Температура уплотнения – 120 °С.

С целью проверки теории возможности использования гранулированной асфальтобетонной смеси в холодном состоянии, было предусмотрено уплотнение смеси при температуре 20 °С. Для этого смесь охарактеризована по наиболее близкой по составу, а именно как холодная смесь типа Бх, марка П. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

**Таблица 1**

**Результаты испытаний**

Контролируемый параметр	Гранулированная асфальтобетонная смесь				ГОСТ 9128-2013
	0,5H <sub>2</sub> O · CaSO <sub>4</sub>	2H <sub>2</sub> O · CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	МП-1	
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, МПа	8,2	6,6	7,5	6,0	не менее 2,2
Водонасыщение, %	3,34	2,11	2,20	1,18	2,0...5,0
Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении (15 сут.)	0,66	0,77	0,80	1,13	не менее 0,75
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С сухих образцов до прогрева, МПа	6,3	6,8	6,2	6,1	не менее 1,0
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С водонасыщенных образцов до прогрева, МПа	3,4	3,0	3,2	6,0	не менее 0,5

**Обсуждение**

В ходе испытаний, образцы асфальтобетонной смеси на основе минерального порошка МП-1 показали значительное превышение установленных ГОСТ 9128-2013 минимальных нормативов. Коэффициент водостойкости образцов превысил значение 1, что свидетельствует о полной водостойкости материала и дальнейшем его упрочнении с течением времени, даже при воздействии водной среды. Полученные данные подтверждают целесообразность применения технологического приёма гранулирование окатыванием для производства асфальтобетонных смесей с повышенными технико-эксплуатационными характеристиками.

В рамках технологии гранулирования окатыванием, применение фосфогипса любого вида в качестве замены традиционного минерального порошка МП-1 привело к значительному росту прочности образцов. Отмечена положительная корреляция увеличения прочности в зависимости от показателя удельной поверхности мелкодисперсного материала и изменения формы его частиц к более угловатой.

Наиболее заметен скачок прочности образцов с применением полугидрата фосфогипса. Однако его высокая гидрофильность приводит к росту водонасыщения асфальтобетонной смеси, а коэффициент водостойкости не укладывается в установленные нормы.

Самые высокие результаты показали образцы с применением ангидрита фосфогипса. Показатели водонасыщения и коэффициент водостойкости лежат в нормативных пределах ГОСТ 9128-2013. Однако для процесса полной дегидратации фосфогипса до ангидрита необходимо усложнять производственный процесс, увеличивая число технологических



операций, помимо этого, данный процесс является весьма энергоёмким, что в совокупности существенно повысит стоимость гранулированной асфальтобетонной смеси.

С точки зрения сокращения производственных и логистических затрат наиболее целесообразно использовать дигидрат фосфогипса. Смесь, изготовленная с применением дигидрата не обладала самыми выдающимися характеристиками, однако полностью удовлетворила ГОСТ 9128-2013 по контролируемым показателям. Таким образом, по совокупности параметров, данный состав смеси является наиболее предпочтительным.

В ходе эксперимента подтверждена возможность уплотнения гранулированной асфальтобетонной смеси в холодном состоянии. Холодная гранулированная асфальтобетонная смесь обладает прочностью до прогрева в сухом и водонасыщенном состоянии в 2...3 раза выше, чем существующие аналоги на рынке холодных асфальтобетонных смесей. Поскольку в составе смеси отсутствуют легколетучие компоненты, смесь возможно хранить без герметичной упаковки продолжительный срок.

Низкие показатели водостойкости гранулированной асфальтобетонной смеси с использованием фосфогипса нивелируются кардинально высокими прочностными характеристиками в сухом состоянии. Несмотря на потерю прочности до 34 % в результате длительного водонасыщения, сопротивление при сжатии водонасыщенных образцов составляет от 4 до 6 МПа.

Повышенные показатели прочности не являются причиной повышения хрупкости образцов. В ходе испытаний, исчерпание несущей способности образцов описывалось исключительно пластическим разрушением, до момента деформации образцов более чем на 15 % от первоначальной высоты.

Технология гранулирования окатыванием позволяет создать высокопрочную структуру дисперсно-упрочнённого композита с непрерывной упорядоченной матрицей асфальтовяжущего вещества вокруг каждой частицы крупного каменного заполнителя. Повышение прочности материала обусловлено возникновением силовых взаимодействий внутри материала в результате пересечения структурированных межфазных слоёв битума вокруг мелкодисперсных минеральных частиц. Повышение водостойкости достигается за счёт герметичной плотной упаковки мелких минеральных частиц, являющихся основным адсорбентом воды в составе материала, тончайшими плёнками битума.

Рассмотренная технология производства асфальтобетонных смесей обладает высоким потенциалом к использованию широкого спектра мелкодисперсных промышленных отходов, одним из которых является фосфогипс. Гранулированная асфальтобетонная смесь с использованием фосфогипса обладает повышенными прочностными характеристиками, однако показатели водонасыщения и водостойкости требуют улучшения путём дальнейшей корректировки состава или технологического режима приготовления смеси.

Потенциально возможным путём устранения выявленных недостатков является модификация битумного вяжущего гидрофобизирующей добавкой. Поиск добавки-модификатора решено проводить из числа промышленных и бытовых отходов, с целью поддержания курса концепции Zero Waste. На данный момент проведён цикл испытаний по модификации битума БНД вторичным полиэтилентерефталатом (ПЭТФ) в ходе которого установлена возможность создания гомогенного расплава нефтяного дорожного битума и полиэтилентерефталата. Также известно, что гранулированная асфальтобетонная смесь с использованием фосфогипса на модифицированном ПЭТФ вяжущем обладает водонасыщением и водостойкостью в пределах, установленных ГОСТ 9128-2013 нормативов, однако механизм взаимодействия модифицированного ПЭТФ вяжущего и фосфогипса требует дальнейшего исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kamplimath H. Traffic growth rate estimation using transport demand elasticity method: a case study for national highway-63 introduction / H. Kamplimath // International Journal of of Advanced Research in Engineering and Technology. – 2013. – № 2. – Vol. 3. – С. 29–35. DOI: 10.15623/ijret.2013.0213026.
2. Гезенцевей, Л.Б. Асфальтобетон из активированных минеральных материалов / Л.Б. Гезенцевей. – Москва: Издательский Дом, 1971. – 255 с.
3. Сахаров П.В. Способы проектирования асфальтобетонных смесей // Транспорт и дороги города. – 1935. – № 12.
4. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В.А. Золотарев. – Х.: Вища школа, 1977. – 116 с.
5. Волков М.И. Исследования минеральных порошков для асфальтовых бетонов / М.И. Волков, И.М. Борщ // Труды ХАДИ. – 1956. – №. 18. – С. 12–17.
6. Борщ И.М. Минеральные порошки для асфальтовых материалов / И.М. Борщ, Л.С. Терлецкая // Труды ХАДИ. – 1961. – №. 26. – С. 29–33.
7. Патент РФ № RU 2182136. Способ получения асфальтобетонной смеси. МПК: С04В26/26. Дата публикации 10.05.2002 г. Авторы патента: Готовцев В.М., Зайцев А.И., Галицкий И.В., Баскаков Д.В.
8. Активация минеральных порошков, как способ улучшения физико-механических характеристик асфальтовых бетонов / В.Е. Копылов, О.Н. Буренина, Е.А. Павлова [Электронный ресурс]. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/48TVN517.pdf>. (13.04.2020).
9. Королёв И.В. О битумной плёнке на минеральных зёрнах асфальтобетона / И.В. Королёв // Автомобильные дороги, 1981. – №7. – С. 23–24.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – Москва: Наука, 1978. – 676 с.
11. Ignatiev A.A. Dispersed-filled composites with a structured nanoscale / A.A. Ignatiev, D.V. Gerasimov, I.V. Golikov, V.M. Gotovtsev // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – № 365. – С. 032064.
12. Бутаков Е.М. Оптимизация состава асфальтобетонных смесей с учетом толщины битумной пленки и механической прочности асфальтобетона // 6-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь – 2009" (Барнаул). – Барнаул. – 2009. – №. 11. – С. 7–9.
13. Каниськин М.А. Изменения микобиоты почв под влиянием фосфогипса / М.А. Каниськин, Т.А. Семенова, В.А. Терехова // Микология и фитопатология. – 2009. – Т. № 43. – № 4. – С. 317–323. (eLIBRARY ID: 17046344).
14. Кочетков А.В. Применение фосфогипса для строительства монолитных слоев дорожной одежды / А.В. Кочетков, Л.В. Янковский // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2017. – № 4. – С. 91–102.
15. Абраменко А.А. Энергоэффективная комплексная технология переработки фосфогипса // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии (Сочи, 1–10 октября 2018). – Сочи. – 2018. – С. 618–621.
16. Дедюхин А.Ю. Структурированные минеральные порошки для асфальтобетонов с улучшенными эксплуатационными показателями / А.Ю. Дедюхин, И.Н. Кручинин, А.А. Еремян // Автомобильные дороги. – 2013. – № 10. – С. 54–56.

**Gerasimov Denis Vladimirovich**

Yaroslavl state technical university, Yaroslavl, Russia

E-mail: [gerasimovdv@ystu.ru](mailto:gerasimovdv@ystu.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6213-7294>

РИНЦ: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1086569](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1086569)

**Ignatev Aleksey Aleksandrovich**

Yaroslavl state technical university, Yaroslavl, Russia

E-mail: [ignatyevaa@ystu.ru](mailto:ignatyevaa@ystu.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1425-5330>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=652263](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=652263)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57214068730>

**Gotovtsev Valery Mikhailovich**

Yaroslavl state technical university, Yaroslavl, Russia

E-mail: [gotovtsev\\_vm@mail.ru](mailto:gotovtsev_vm@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4272-9209>

## **Phosphogypsum as a component of a dispersed-reinforced composite on the example of a granulated asphalt-concrete mix**

**Abstract.** The article is devoted to the actual topic of application of large-capacity industrial waste in the field of road construction for the purpose of their utilization and rational use of traditional road construction materials. The article analyzes the existing technology for preparing asphalt concrete mixtures with a traditional organomineral composition, describing the key disadvantages that negatively affect the theoretically achievable performance characteristics of asphalt concrete composite. The authors propose an alternative technology based on the pelletizing by rolling technique, which allows to obtain an ordered structure of the asphalt-binding substance around each particle of a large stone aggregate. The use of phosphogypsum, a large – capacity waste product of the chemical processing industry, is considered as the main component of the asphalt binder – a fine mineral aggregate. The article considers the structure of asphalt binder obtained by pelletizing technology, describes the process of formation of a dispersed-reinforced structure of the material. The properties of phosphogypsum were studied in comparison with the non-activated mineral powder based on carbonate minerals traditionally used in the production of asphalt concrete mixtures. The authors consider the possibility of utilization of phosphogypsum in the field of road construction. A new method for using phosphogypsum as a fine aggregate of a dispersed-hardened asphalt-concrete composite obtained using the pelletizing technology is proposed. To confirm the theoretical assumptions and determine the most suitable type of phosphogypsum raw materials, the results of experimental studies are presented. During the analysis of experimental data, rational ways to further improve the performance of the developed material – granulated asphalt concrete mix using phosphogypsum-are proposed. The authors present evidence of the possibility of using the developed material as a cold asphalt mix. The article is part of the dissertation research.

**Keywords:** phosphogypsum; asphalt concrete; dispersed-reinforced composite; granulated asphalt concrete mix; waste processing; bitumen structuring effect; interfacial interaction