

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2021, №3, Том 8 / 2021, N 3, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-3-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/08SATS321.pdf>

DOI: 10.15862/07SAVN321 (<https://doi.org/10.15862/08SATS321>)

Структурированное асфальтовязующее вещество — новый вид связующего в асфальтобетонных смесях

Герасимов Д.В., Игнатьев А.А., Готовцев В.М.

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

Автор, ответственный за переписку: Герасимов Денис Владимирович, e-mail: gerasimovdv@ystu.ru

Аннотация. Данные, представленные в статье, являются частью диссертационного исследования по разработке состава и принципа производства композиционного материала для дорожного строительства с использованием фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата. В статье дана оценка существующих наиболее успешных и эффективных технологий создания асфальтобетонных покрытий с высокими технико-эксплуатационными характеристиками в составе которых ключевую роль играет асфальтовязующее вещество на основе бинарной системы минеральный порошок/нефтяной дорожный битум, описаны их основные преимущества и недостатки. Описан новый технологический приём производства асфальтобетонных смесей — гранулирование окатыванием, который был предложен авторами. Представлены результаты исследований по определению технико-эксплуатационных свойств структурированного асфальтовязующего вещества, полученного способом гранулирование окатыванием. Представлено краткое теоретическое обоснование физико-химической природы улучшения ряда технико-эксплуатационных характеристик разработанной композиции структурированного асфальтовязующего вещества. Приведена динамика изменения основных показателей структурированного асфальтовязующего вещества

во времени, с 2005 года по 2019 год. Теоретически доказано, что в структурированном асфальтовязующем веществе, полученном способом гранулирование окатыванием, битум находится в пленочном состоянии, а толщины битумных прослоек между частицами минерального порошка составляют величины порядка 100 нм, что позволяют отнести продукт к разряду наноматериалов и обуславливает набор его особых свойств. Также приведены данные независимых и собственных экспериментальных исследований, свидетельствующие о верности ранее полученного теоретического обоснования повышения прочностных показателей, улучшения показателей водонасыщения и коэффициента водостойкости. Отсутствие негативной динамики изменения основных технико-эксплуатационных свойств на протяжении 14 лет подтверждает возможность хранения смеси в холодном виде вне герметичной упаковки в неотапливаемом помещении, что позволяет утверждать о возможности заготовки материала впрок и транспортировки на неограниченные расстояния.

Ключевые слова: асфальтобетон; объемный и пленочный битум; гранулирование окатыванием; структурирование; связующее; минеральный порошок

Structured asphalt binder is a new binder type in asphalt concrete mixtures

Denis V. Gerasimov, Aleksey A. Ignatev, Valery M. Gotovtsev

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Corresponding author: Denis V. Gerasimov, e-mail: gerasimovdv@ystu.ru

Abstract. The data presented in the article are part of dissertation research on the formula development and production principle of composite material for road construction with phosphogypsum and secondary polyethyleneterephthalate use. The article provides an assessment of the existing most successful and effective technologies for creating asphalt concrete pavements with high technical performance characteristics, and the key role in formula is an asphalt binder on the binary system mineral powder/oil road bitumen basement, their main advantages and disadvantages are described. A new technological method for the asphalt concrete mixtures production is described — pelletization by rolling, which was proposed by the authors. The paper presents the study's results to determine the structured asphalt binder technical and operational properties obtained by the method of pelletization by rolling. A brief theoretical substantiation of the physicochemical nature of improving a number of developed composition technical and operational characteristics of a structured asphalt binder is presented. The dynamics of over time changes in the main structured asphalt binder indicators, from 2005 to 2019, are given. It has been

theoretically proven that in a structured asphalt binder obtained by the method of pelletization by rolling, bitumen is in a film state, and the bitumen interlayers thickness between the mineral powder particles is of the order of 100 nm, which makes it possible to classify the product as a nanomaterial and determines its special properties set. The data of independent and our own experimental studies are also presented, indicating the previously obtained theoretical justification correctness for increasing the strength indicators, improving the water saturation indicators, and the water resistance coefficient. The absence of negative changes in the main technical and operational properties dynamics for 14 years confirms the possibility of storing the mixture in a cold form outside a sealed package in an unheated room, which makes it possible to assert the possibility of preparing material for future use and transporting it over unlimited distances.

Keywords: asphalt concrete; bulk and film bitumen; pelletization by rolling; structuring; binder; mineral powder

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Асфальтобетон относится к классу дисперсно-наполненных композиционных материалов, матрицей которого является дорожный битум, а наполнителями минеральные частицы различных размеров [1]. Разброс диаметров частиц минеральной смеси достаточно велик от десятков миллиметров для щебня до сотых долей миллиметра для частиц минерального порошка. Крупные частицы образуют скелет структуры композита, воспринимающий на себя большую часть механических нагрузок, а более мелкие, такие как песок и минеральный порошок, играют роль инертного заполнителя пустот между крупными частицами, формируя плотную структуру материала. Связующим элементом композита является битум, «склеивающий» между собой отдельные минеральные частицы.

Такое представление о структуре асфальтобетона в процессе исследований было существенным образом дополнено с учетом того, что определяющим фактором в формировании физико-механических свойств композита являются эффекты на поверхности твердых частиц при контакте с жидким связующим. Поверхность частиц минерального порошка с учетом их размеров, несмотря на его незначительное содержание в асфальтобетонной смеси, существенно превышает суммарную площадь поверхности более крупных фракций и потребляет при этом по разным данным до 90–95 % [2–5] содержащегося в смеси битума.

По представлениям академика П.А. Ребиндера наиболее предпочтительным способом создания высокопрочного композиционного материала является склеивание мелкодисперсных частиц дисперсной среды, тончайшими прослойками дисперсной фазы [6]. Достигнуть минимальных толщин прослоек дисперсной среды возможно лишь при минимально допустимом количестве вещества дисперсной среды, при этом наличие крупнодисперсных частиц кратно отличающихся по размеру от частиц дисперсной фазы (в случае асфальтобетонной смеси — щебня или гравия) может рассматриваться как элементы структурной неоднородности, вследствие чего они являются «концентраторами» напряжений в асфальтобетоне. Таким образом, граница раздела твердой и жидкой фаз — щебень/связующее, является наиболее уязвимым местом асфальтобетонного композита.

Свойства адсорбированного битума, покрывающего минеральные частицы адсорбционными слоями, существенно отличаются от свойств так называемого объемного (свободного) битума. По представлениям

П.А. Ребиндера [6] на поверхности минеральных частиц образуются диффузионные структурированные оболочки битума, плотность и вязкость которых имеют наивысшее значение непосредственно у границы раздела битум/минеральный материал. По мере удаления от этой границы вязкость и плотность битума убывают и в зоне перехода структурированной оболочки в свободный битум принимают номинальные значения, т.е. значения, которыми характеризуется материал в обычных условиях (свободный битум). Носителями тонких ориентированных слоев битума являются частицы минерального порошка, который обладает наиболее развитой реагирующей поверхностью [3].

П.В. Сахаров в своих работах, связанных с проектированием состава асфальтобетонных смесей, определил назначение минерального порошка как структурирующего компонента, образующего совместно с битумом «асфальтовяжущее вещество» [7]. При создании бинарной системы мелкодисперсного минерального наполнителя и битума, физико-механические и реологические свойства системы резко изменяются, конечные свойства такой системы лишь косвенно зависят от свойств исходных компонентов [8]. Таким образом, вопреки распространённым суждениям, именно асфальтовяжущее вещество является связующим компонентом в асфальтобетоне, а не битум. При определенном соотношении содержания битум — минеральный порошок достигается наивысшая прочность структурированной дисперсной системы. Взаимодействие битума с минеральным порошком обусловлено не только развитой внешней поверхностью, но и очень развитой внутренней поверхностью зерен, образуемой разветвленной системой микропор. Основная функция минерального порошка состоит в переводе объемного битума в пленочное состояние.

Перевод битума в пленочное состояние с образованием «асфальтовяжущего вещества» или просто асфальтовяжущего, которое выступало бы в качестве матрицы композиционного материала предполагает равномерное распределение малых количеств связующего в массе минерального порошка. Следует иметь в виду, что оптимальная структура асфальтобетона характеризуется не наивысшей, а оптимальной прочностью, с которой сочетаются достаточная деформативная способность этого материала при пониженных температурах и требуемая коррозионная стойкость. При этом следует учитывать, что определенное количество объемного битума необходимо для обеспечения хорошей коррозионной стойкости, а также для придания асфальтобетону необходимой пластичности. Также следует учесть, что на стойкость покрытия против образования трещин существенное влияние оказывает коэффициент линейного температурного расширения асфальтобетона. При этом, чем выше этот коэффициент, тем ниже трещиностойкость

покрытия и наоборот. Установлено [5], что с увеличением содержания битума коэффициент температурного расширения увеличивается. Следовательно, объективная оценка устойчивости покрытия против образования трещин требует учета как деформативности, так и показателя линейного температурного расширения материала.

Таким образом, целями исследования является:

- теоретический обзор существующих наиболее успешных и эффективных технологий создания асфальтобетонных покрытий с высокими технико-эксплуатационными характеристиками в составе которых ключевую роль играет асфальтовязующее вещество на основе бинарной системы минеральный порошок/нефтяной дорожный битум;
- исследование динамики изменения технико-эксплуатационных свойств партии структурированного асфальтовязующего вещества, изготовленного способом гранулирование окатыванием на протяжении 14 лет с 2005 по 2019 годы.

Методы

Methods

Традиционная технология производства асфальтобетонных смесей предполагает введение связующего в разогретую смесь всех минеральных компонентов с дальнейшим перемешиванием. Тщательное перемешивание является основной операцией, обеспечивающей равномерное распределение битума, как в объеме смеси, так и на поверхности минеральных компонентов. Увеличение продолжительности перемешивания с 60–90 секунд (являющегося стандартным временем перемешивания компонентов асфальтобетонной смеси на большинстве асфальтобетонных заводов) до 180–240 секунд позволяет повысить степень однородности смеси и снизить расход битума [9]. В процессе перемешивания в первую очередь происходит взаимодействие битума с минеральным порошком с образованием асфальтовязующего, вязкость которого резко возрастает, затрудняя покрытие битумом поверхности песка и щебня.

Кроме того, взаимодействие битума с минеральным порошком в массе перемешиваемой смеси приводит к образованию агломератов частиц порошка с битумом, нарушающих однородность смеси. Подтверждением такого механизма работы явилось исследование авторами статьи асфальтобетонного гранулята (асфальтовой крошки), полученного измельчением старого асфальтобетонного покрытия.

Оказалось, что около 5 % асфальтобетонного гранулята присутствует в виде агломератов минерального порошка, не связанных с поверхностью крупных частиц материала.

Для предотвращения рассмотренных эффектов была предложена двухступенчатая технология производства асфальтобетонной смеси [10], смысл которой заключается в первоначальном смешивании минерального порошка с битумом в отдельном устройстве с получением асфальтового вяжущего с последующим введением в него песка и щебня и перемешивании до готовности. Однако приготовление смеси битума с минеральным порошком предполагает предварительный нагрев минерального порошка перед подачей в смеситель, что с учетом его высокой дисперсности явилось основным препятствием для внедрения технологии.

Другой способ получения качественного асфальтовяжущего вещества, в котором частицы минерального порошка равномерно распределены в объеме материала реализуется в литом асфальтобетоне. Главным наполнительным компонентом такого материала является минеральный порошок, содержание которого может достигать 20–30 % от массы материала при содержании битума до 10 % [11]. Содержание асфальтовяжущего вещества в литом асфальтобетоне возрастает до 28–30 %. Процесс проводится в специальном устройстве (кохере), работающем как смеситель, при температуре 220–240 °С.

К достоинствам литого асфальтобетона относят:

- водонепроницаемость, характерную для самоуплотняемых асфальтобетонов;
- высокую степень адгезии к нижележащим слоям;
- высокую усталостную трещиностойкость при температурных нагрузках;
- отсутствие эффекта коррозии материала.

Отметим, что все приведенные достоинства материала обусловлены повышенным содержанием асфальтовяжущего вещества. Однако при указанном содержании битума и минерального порошка в нем битум пребывает в объемном состоянии, а частицы минерального порошка «плавают» в нем. Эффект структурирования частиц исключается, обуславливая слабое сопротивление покрытия пластическому колееобразованию.

Идея использования эффекта структурирования частиц минерального порошка в асфальтовяжущем была реализована в щебеночно-мастичном

асфальтобетоне (ЩМА), получившем в последние годы широкое использование на дорогах России. Отличительной особенностью этого материала является повышенное содержание щебня до 80 %, битума до 8 % и минерального порошка до 15 %. Жесткий каркас из щебня, формирующий основу материала, обуславливает повышенную устойчивость к пластическим деформациям, а присутствие большого объема битумного вяжущего, занимающего все свободное пространство между заполнителями, снижает остаточную пористость асфальтобетона. Для предотвращения стекания вяжущего вещества с поверхности частиц используют стабилизирующую добавку, в которой сосредоточивается битум с минеральным порошком, образуя своеобразную «мастику» [12; 13].

Соотношение содержания компонентов в таком связующем подбирается для обеспечения максимального проявления эффекта структурирования мелких частиц в структуре асфальтобетона. В соответствии с этим в отличие от традиционных асфальтобетонных смесей, где матрицей композита является битум, в рассматриваемом материале матрицей является сложная композиция, состоящая из битума, минерального порошка и стабилизирующей добавки. Такая структура обеспечивает такие преимущества материала:

- высокую износостойкость, независимую от климатических условий эксплуатации;
- стабильное состояние покрытия при различных механических воздействиях;
- повышенный коэффициент сцепления автомобильных шин с поверхностью дороги;
- низкий показатель уровня шума при движении автотранспорта.

За перечисленные преимущества материала необходимо платить не только высокой стоимостью, но и следующими особенностями:

- особые требования к гранулометрическому составу смеси, включая форму, размеры и физико-механические характеристики частиц крупного каменного заполнителя;
- использование песка исключительно из отсевов дробления щебня;
- использование в производстве полимер битумного вяжущего, модифицированного различного рода добавками, со строжайшим соблюдением рецептуры и низкими сроками хранения в готовом виде;

- повышенная в сравнении с традиционными смесями температура производства и укладки материала в дорожное полотно;
- повышение вероятности механической сегрегации смеси, при несоблюдении технологии изготовления или транспортировки смеси. Данное обстоятельство обуславливает необходимость применения антисегрегационных перегружателей асфальтобетонной смеси в составе технологического звена.

Дальнейшее развитие асфальтобетонных смесей в России сейчас идет по следующим направлениям [14]:

- совершенствование рецептуры наиболее современных смесей — типа ЦМА и дренирующего асфальтобетона в рамках модернизации системы SuperPave;
- разработка новых методов расчёта параметров покрытий, учитывающих многофакторность эксплуатации различных материалов в различных условиях эксплуатации;
- развитие технологии производства тёплых асфальтобетонов;
- развитие технологий применяющих асфальтогранулят фрезеровки дорожных покрытий при производстве горячих и тёплых асфальтобетонных смесей;
- совершенствование технологии нанесения и рецептуры тонкослойных слоёв износа «Чип Сил», «Сларри Сил» и «Новачип».

По скромному мнению авторов, для получения качественно новых свойств материала требуется поиск новых альтернативных технологий производства смесей с пересмотром технологии смешивания компонентов. Такая технология была разработана в Ярославском государственном техническом университете (ЯГТУ). Данная технология производства нацелена на получение структурированного асфальтовяжущего вещества и защищена патентом РФ¹. Основу изобретения составляет результат, полученный П.В. Сахаровым, при изучении бинарной системы битум-минеральный порошок, т. е. асфальтовяжущее вещество [7]. Рядом исследователей установлено [15], что при содержании битума около 12,5 % по весу в бинарной системе асфальтовяжущего без использования крупного каменного заполнителя происходит резкое повышение прочностных показателей образцов

¹ Способ получения асфальтобетонной смеси: пат. 2182136 Российская Федерация: МПК С04В26/26 / В.М. Готовцев, А.И. Зайцев, И.В. Галицкий, Д.В. Баскаков; патентообладатель Ярославский гос. технический университет; заявл. 06.03.2000; опубл. 10.05.2002.

асфальтобетона. Однако получение однородной асфальтобетонной смеси с таким малым содержанием битума требует использования высокоскоростного смесителя и продолжительного времени перемешивания. Полученный результат полностью отвечает представлениям П.А. Ребиндера о структурировании частиц минерального порошка при переводе битума в пленочное состояние.

Зная плотности битума и минерального порошка, а также его удельную поверхность, являющуюся необходимой характеристикой материала, несложно определить среднюю толщину битумных прослоек между частицами минерального порошка. Расчет показал порядок этой величины 10^{-7} м, т. е. 100 нанометров. По существующим в настоящее время представлениям системы, содержащие элементы, в которых хотя бы один линейный размер составляет такой порядок, относятся к разряду нано систем [16]. Исследования наноэффектов открывают новые возможности применения материалов, в связи с чем, асфальтовяжущее вещество требует всестороннего изучения.

Однако получение асфальтовяжущего с указанным содержанием битума путем прямого смешения сопряжено с рядом проблем, представленных при рассмотрении двухступенчатой технологии производства асфальтобетона. Авторами предложено для получения асфальтовяжущего с указанным содержанием компонентов использовать известный технологический прием — гранулирование окатыванием. Процесс проводится в разогретом до температуры 130–150 °С барабанном грануляторе, куда попеременно вводят порции минерального порошка и битума с получением гранул асфальтовяжущего вещества. Такой способ получения материала позволяет получить упорядоченную структуру частиц минерального порошка с битумными прослойками минимальной толщины. Более подробно механизм формирования такой структуры представлен в работе [17].

Результаты

Results

Полученное таким образом гранулированное асфальтовяжущее вещество представляет собой сыпучий материал (рис. 1), не проявляющий склонности к слеживанию, способный к длительному хранению без изменения эксплуатационных свойств. Исследования в этом направлении проводятся в течение продолжительного времени. В 2005 году была изготовлена большая партия гранулированного асфальтовяжущего не использованная до настоящего времени. В результате появилась возможность мониторинга свойств материала с течением времени.

Отметим, что материал хранится в неотапливаемом помещении в мешках. Результаты лабораторных испытаний материала, проведенных в различных лабораториях, приведены в таблице 1.



Рисунок 1. Гранулированное асфальтовяжущее (составлено авторами)

Figure 1. Pelletized asphalt binder (compiled by the authors)

Рассмотрим более подробно данные таблицы 1. Остановимся на содержании компонентов гранулированного асфальтовяжущего: минеральный порошок МП-1 — 85 %; битум БНД 60/90 — 15 %. Гранулирование окатыванием проводилось в барабанном грануляторе при температуре 130–150 °С.

Таблица 1 / Table 1

Динамика изменения свойств асфальтовяжущего по годам

Dynamics of asphalt binder properties changes by years

Год проведения испытаний Test work year	2005	2012	2013	2019	Требования ГОСТ 9128-2013 GOST requirements 9128-2013
Название организации Organization name	Угличское ДСУ Uglich Road Building Administration	ГКУ ЯО «Ярдорслужба» National Public Establishment Yaroslavl Oblast "Yardorsluzhba"	ФКУ «Дороги России» Federal Government Agency "Roads of Russia"	ЯГТУ Yaroslavl State Technical University	
Наименование показателя Indicator name	Фактическое значение Actual value				
Водонасыщение, % по объему Water saturation, % by volume	0,3	1,3	0,8	0,9	от 1,5 до 4,0 from 1,5 to 4,0
Средняя плотность, г/см ³ Mass specific gravity, g/cm ³	2,23	2,25	2,23	2,23	не нормир. not normalized
Предел прочности при сжатии при температуре 50 °С, МПа Compressive strength at a temperature of 50 °С, МПа	3,10	6,1	5,9	6,0	не менее 1,2 min 1,2
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, МПа Compressive strength at a temperature of 20 °С, МПа	9,00	12,2	11,7	11,8	не менее 2,5 min 2,5
Предел прочности при сжатии при температуре 0 °С, МПа Compressive strength at a temperature of 0 °С, МПа	-	-	18,3	-	не более 11,0 min 11,0

Год проведения испытаний Test work year	2005	2012	2013	2019	Требования ГОСТ 9128-2013 GOST requirements 9128-2013
Название организации Organization name	Угличское ДСУ Uglich Road Building Administration	ГКУ ЯО «Ярдорслужба» National Public Establishment Yaroslavl Oblast "Yardorsluzhba"	ФКУ «Дороги России» Federal Government Agency "Roads of Russia"	ЯГТУ Yaroslavl State Technical University	
Наименование показателя Indicator name	Фактическое значение Actual value				
Водостойкость Fastness to water	1,03	1,00	1,1	1,0	не менее 0,90 min 0,90
Коэффициент внутреннего трения Internal friction coefficient	-	0,61	0,95	-	не менее 0,81 min 0,81
Сцепление при сдвиге при температуре 50 °С, МПа Shear adhesion at a temperature of 50 °С, МПа	-	0,54	0,40	-	не менее 0,37 min 0,37
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С, МПа Crack resistance in terms of ultimate tension at cracking at a temperature of 0 °С, МПа	-	-	3,7	-	не менее 3,5 min 3,5 не более 6,0 max 6,0
Значение колеи после 20000 проходов, по EN 12697, мм Treadway value after 20,000 passes, according to EN 12697, mm	-	-	0,6	-	-

Составлено авторами. Compiled by the authors

В некоторых строках таблицы стоят прочерки, означающие отсутствие необходимого оборудования для проведения испытаний в обозначенных лабораториях. Однако это не мешает проследить динамику изменения основных параметров смеси с течением времени. Так в период с 2005 по 2012 год наблюдается значительное повышение прочностных показателей материала. К сожалению, установить продолжительность периода упрочнения по приведенным данным не удастся. Далее происходит стабилизация свойств материала с отклонениями отдельных показателей в пределах ошибки измерения.

Обсуждение

Discussion

Как видно из данных, представленных в таблице, гранулированное асфальтовяжущее вещество имеет прочностные показатели, существенно превышающие требования ГОСТ. Однако предел прочности при сжатии при температуре 0 °С выходит за рамки требований, что с точки зрения существующих представлений о свойствах асфальтобетона должно снижать трещиностойкость покрытия. Тем не менее, из данных таблицы следует, что этот показатель соответствует предъявляемым требованиям.

Кроме того, в настоящее время широко распространены различные модификаторы битума, в связи с чем, в случае необходимости, имеется возможность воздействия на этот показатель с учетом большого запаса прочности материала при положительных температурах.

Другим показателем, не удовлетворяющим требованиям ГОСТ, является водонасыщение, значение которого оказывается меньше нижнего предела требований. Это ограничение обусловлено необходимостью содержания воздушных полостей в структуре уплотняемых асфальтобетонов, которые заполняются объемным битумом при его расширении с повышением температуры покрытия. В разработанном материале объемный битум отсутствует, в связи с чем, это требование не является ключевым.

Далее рассмотрим данные о коэффициенте внутреннего трения материала, сведения о котором в приведенной таблице противоречиво. Отметим, что значение этого показателя определяется содержанием крупных фракций минеральной части асфальтобетонной смеси, отсутствующих в рассматриваемом материале. Однако, сцепление при сдвиге при температуре 50 °С удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Еще одним показателем, находящимся в противоречии с существующими представлениями, является глубина колеи, значение которой составляет 0,6 мм после 20000 проходов. В соответствии с ПСНТ 184-2019 значение этого показателя для щебенистых асфальтобетонных смесей должно составлять не более 5,5 мм. По существующим представлениям основным способ предотвращения колееобразования является повышение содержания щебня в асфальтобетонной смеси, что находится в прямом противоречии с данными таблицы.

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили сформировать следующие выводы:

1. выявленные особенности структурированного асфальтовяжущего позволяют говорить о проявлении наноэффектов в готовом материале, что подтверждают результаты экспериментальных исследований;
2. динамика изменения основных показателей гранулированного асфальтовяжущего вещества говорит о стабилизации его свойств во времени, что свидетельствует о возможном отсутствии старения битума в составе смеси;
3. гранулированное асфальтовяжущее представляет собой сыпучий материал, не проявляющий склонности к слеживанию, способное

длительное время храниться без снижения эксплуатационных показателей;

4. результаты исследований показали, что гранулированный материал обладает высокой стойкостью к колееобразованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ignatiev, A.A.** Granulated asphalt mix based on industrial and domestic waste / A.A. Ignatiev, D.V. Gerasimov, I.V. Golikov, V.M. Gotovtsev. — DOI <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101028> // VI International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” (IPICSE-2018) / М.: IOP Publishing Ltd, 2018. — С. 01028. — URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/110/mateconf_ipicse2018_01028/mateconf_ipicse2018_01028.html (дата обращения: 17.04.2021).
2. **Уришбаев, Э.Э.У.** Методика улучшения свойств дорожного битума с применением минерального порошка из природного сланца / Э.Э.У. Уришбаев. — DOI <https://doi.org/10.24411/2412-8236-2020-11206> // Academy. — 2020. — № 12. — С. 16–18. — URL: <https://academicjournal.ru/images/PDF/2020/63/metodika-uluchsheniya-svo.pdf> (дата обращения: 17.04.2021).
3. **Готовцев, В.М.** Принципы формирования оптимальной структуры асфальтобетона / В.М. Готовцев, А.Г. Шатунов, А.Н. Румянцев, В.Д. Сухов // Фундаментальные исследования. — 2012. — № 11–1. — С. 124–128. — URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30459> (дата обращения: 03.07.2021).
4. **Ядыкина, В.В.** Изменение свойств асфальтобетона при использовании гидрофобизированного минерального порошка / В.В. Ядыкина, Е.В. Кузнецова, М.С. Лебедев. — DOI <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23> // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2020. — Т 5. — № 4. — С. 17–23. — URL: <https://bulletinbstu.editorum.ru/en/nauka/article/34271/view> (дата обращения: 03.07.2021).
5. **Гезенцевей, Л.Б.** Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов / Л.Б. Гезенцевей. — М.: Стройиздат, 1971. — 255 с.
6. **Ребиндер, П.А.** Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. — М.: Наука, 1979. — 384 с.
7. **Сахаров, П.В.** Способы проектирования асфальтобетонных смесей / П.В. Сахаров // Транспорт и дороги города. — 1935. — № 12. — С. 22–26.
8. **Lebedev, M.S.** Rheological characteristics of bitumen mastic depending on composition and filler dispersity / M.S. Lebedev, N.I. Kozhukhova. — DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1045/1/012026> // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1045, 3rd International Conference on Rheology and Modeling of Materials (ic-rmm3) 2–6 October 2017 / Мишкольц-Лиллафюред: IOP Publishing Ltd, 2018. — С. 012026. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1045/1/012026> (дата обращения: 17.04.2021).
9. **Братчун, В.И.** Старение асфальтобетонных смесей, асфальтобетонов и способы повышения их термоокислительной стойкости / В.И. Братчун, М.К. Пактер, О.А. Стукалов, В.Л. Беспалов, Д.В. Гуляк, Е.О. Ромасюк // Современное промышленное и гражданское строительство. — 2015. — Т 11. — № 3. — С. 105–117. — URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2015-3/01_bratchun_pakter_stukalov_bespalov_gulyak_romasyuk.pdf (дата обращения: 12.01.2021).
10. **Королев И.В.** Пути экономии битума в дорожном строительстве / И.В. Королёв. — М.: Транспорт, 1986. — 149 с.
11. **Горельшев, Н.В.** Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы / Н.В. Горельшев. — М.: Можайск-Терра, 1995. — 176 с.

12. **Батракова, В.П.** Особенности применения, технологии приготовления и укладки щебёночно-мастичного асфальтобетона / В.П. Батракова // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2009. — № 47. — С. 59–62. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15266363> (дата обращения: 03.02.2021).
13. **Кирюхин, Г.Н.** Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона / Г.Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов. — М.: Издательство "Элит", 2009. — 176 с.
14. **Крупин, Н.В.** Обзор современных мировых тенденций развития асфальтобетонов / Н.В. Крупин // Дороги России. — 2020. — № 1. — С. 7–13. — URL: https://rosasfalt.org/articles/DR_01.pdf (дата обращения: 11.05.2021).
15. **Соломенцев, А.Б.** Исследование физико-механических свойств асфальтовяжущего с адгезионными добавками / А.Б. Соломенцев, Л.С. Мосюра, Н.Ю. Анахин, Н.Г. Грошев // Безопасный и комфортный город: Сборник научных трудов по материалам I международной научно-практической конференции молодых учёных, Орёл, 29 сентября 2017 года / Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2017. — С. 174–178. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36981281> (дата обращения: 10.03.2021).
16. **Franks, A.** Nanotechnology / A. Franks. — DOI <https://doi.org/10.1088/0022-3735/20/12/001> // Journal of Physics E: Scientific Instruments. — 1987. — Т 20. — № 12. — С. 1442. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3735/20/12/001> (дата обращения: 03.07.2021).
17. **Герасимов, Д.В.** Фосфогипс как компонент дисперсно-упрочнённого композита на примере гранулированной асфальтобетонной смеси / Д.В. Герасимов, А.А. Игнатъев, В.М. Готовцев // Вестник Евразийской науки. — 2020. — Т 12. — № 5. — С. 48SAVN520. — URL: <https://esj.today/PDF/48SAVN520.pdf> (дата обращения: 20.03.2021).

Сведения об авторах:

Герасимов Денис Владимирович — ассистент, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия, e-mail: gerasimovdv@ystu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6213-7294>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1086569
Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202813639>

Игнатъев Алексей Александрович — кандидат технических наук, доцент, директор института инженеров строительства и транспорта, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия, e-mail: ignatyevaa@ystu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1425-5330>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=652263
Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57214068730>

Готовцев Валерий Михайлович — доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия, e-mail: gotovtsev_vm@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4272-9209>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=302357

Статья получена: 20.05.2021. Принята к публикации: 27.07.2021. Опубликована онлайн: 14.09.2021.

REFERENCES

1. Ignatiev A.A., Gerasimov D.V., Golikov I.V., Gotovtsev V.M. Granulated asphalt mix based on industrial and domestic waste. In: *VI International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE-2018)*. Moscow: IOP Publishing Ltd; 2018. p. 01028. Available at: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/110/mateconf_ipicse2018_01028/mateconf_ipicse2018_01028.html (accessed 17th April 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101028>.
2. Urishbayev E.E.U. [Method of improving the properties of road bitumen using mineral powder from natural shale]. *Academy*. 2020; (12): 16–18. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/2412-8236-2020-11206>.
3. Gotovtsev V.M., Shatunov A.G., Rummyantsev A.N., Sukhov V.D. Principles of forming the optimal structure of asphalt concrete. *Fundamental research*. 2012; (11–1): 124–128. Available at: <https://fundamental-research.ru/en/article/view?id=30459> (accessed 3rd July 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Yadykina V.V., Kuznetsova E.V., Lebedev M.S. Change in the properties of asphalt concrete when using hydrophobized mineral powder. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020; 5(4): 17–23. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23>.
5. Gezentsvey L.B. [Asphalt concrete made from activated mineral materials]. Moscow: Stroyizdat; 1971. (In Russ.).
6. Rebinder P.A. [Selected Works. Surface phenomena in dispersed systems. Physicochemical mechanics]. Moscow: Nauka; 1979. (In Russ.).
7. Sakharov P.V. [Methods for designing asphalt concrete mixtures]. *Transport and city roads*. 1935; (12): 22–26. (In Russ.).
8. Lebedev M.S., Kozhukhova N.I. Rheological characteristics of bitumen mastic depending on composition and filler dispersity. In: *Journal of Physics: Conference Series, Volume 1045, 3rd International Conference on Rheology and Modeling of Materials (ic-rmm3) 2–6 October 2017, Miskolc-Lillafüred, Hungary*. Miskolc-Lillafüred: IOP Publishing Ltd; 2018. p. 012026. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1045/1/012026> (accessed 17th April 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1045/1/012026>.
9. Bratchun V.I., Pakter M.K., Stukalov O.A., Bepalov V.L., Gulyak D.V., Romasyuk E.O. Aging of bituminous concrete mixes, bituminous concretes and the ways of their thermo-oxidative firmness increase. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2015; 11(3): 105–117. Available at: http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2015-3/01_bratchun_pakter_stukalov_bepalov_gulyak_romasyuk.pdf (accessed 12th January 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Korolev I.V. [Ways to save bitumen in road construction]. Moscow: Transport Publ.; 1986. (In Russ.).
11. Gorelyshev N.V. [Asphalt concrete and other bitumen-mineral materials]. Moscow: Mozhaysk-Terra; 1995. (In Russ.).
12. Batrakova V.P. [Features of application, technology of preparation and laying of crushed stone-mastic asphalt concrete]. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2009; (47): 59–62. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15266363> (accessed 3rd February 2021). (In Russ.).
13. Kiryukhin G.N., Smirnov E.A. [Crushed stone-mastic asphalt concrete coverings]. Moscow: Elite Publ.; 2009. (In Russ.).
14. Krupin N.V. [Review of modern global trends in the development of asphalt concrete]. *Roads of Russia*. 2020; (1): 7–13. Available at: https://rosasfalt.org/articles/DR_01.pdf (accessed 11th May 2021). (In Russ.).
15. Solomentsev A.B., Mosyura L.S., Anahin N.Y., Groshev N.G. The study of physical and mechanical properties of asphalt binders with adhesion additives. In: *[Safe and comfortable city: Collection of scientific papers based on the materials of the I International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Oryol, September 29, 2017]*. Oryol: Orel State University named after I.S. Turgenev; 2017. p. 174–178. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36981281> (accessed 10th March 2021). (In Russ., abstract in Eng.).

16. Franks A. Nanotechnology. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1987; 20(12): 1442. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/20/12/001>.
 17. Gerasimov D.V., Ignatev A.A., Gotovtsev V.M. Phosphogypsum as a component of a dispersed-reinforced composite on the example of a granulated asphalt-concrete mix. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 12(5): 48SAVN520. Available at: <https://esj.today/PDF/48SAVN520.pdf> (accessed 20th May 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
-

Information about the authors:

Denis V. Gerasimov — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia, e-mail:

gerasimovdv@ystu.ru

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

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1086569

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202813639>

Aleksey A. Ignatev — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia, e-mail: ignatyevaa@ystu.ru

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

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=652263

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57214068730>

Valery M. Gotovtsev — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia, e-mail:

gotovtsev_vm@mail.ru

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

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=302357

Submitted: 20th May 2021. Revised: 27th July 2021. Published online: 14th September 2021.