

К.Г. Пугин^{1,2}, В.К. Пугина¹¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия²Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика

Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ В СТРУКТУРЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Для строительства автомобильных дорог требуется большое количество строительных материалов. Органоминеральные смеси, к которым относится асфальтобетон, являются основным строительным материалом для строительства верхних слоев дорожной конструкции. В целях снижения стоимости асфальтобетона часть природного минерального сырья возможно заменить отходами промышленных предприятий или отходами потребления. Исследования, проведенные в разных странах, показывают, что отходы могут быть использованы в технологических процессах получения строительных материалов наравне с природным сырьем. Вовлечение отходов в ресурсный цикл производства востребованных на рынке продуктов позволяет решить и вопросы экологии. Была произведена сравнительная оценка использования бурового шлама и отходов пластика на предмет их использования в структуре асфальтобетона. Предварительная оценка отходов пластика и буровых шламов по показателям экологической опасности показала, что превышений нормативов по содержанию тяжелых металлов в подвижной форме нет. Это позволяет рассматривать отходы в качестве сырьевого материала при производстве строительно-дорожных материалов без ограничения по экологической безопасности. Проведенные исследования показали, что состав асфальтобетонной смеси, в которой используется буровой шлам в качестве минерального порошка, соответствует требованиям, предъявляемым к асфальтобетону, и что отходы пластиков ПНД и ПВД могут рассматриваться в качестве армирующих и модифицирующих элементов в структуре асфальтобетона. Асфальтобетон, в состав которого входят отходы пластика, соответствует требованиям, предъявляемым к асфальтобетону, используемому для дорожного строительства. Сравнительный анализ полученных образцов асфальтобетона с добавлением бурового шлама и отходов пластика показал, что использование пластика позволяет получить более качественный асфальтобетон. Асфальтобетон, модифицированный пластиком, имеет более высокие прочностные показатели при разных температурах, что указывает на высокие эксплуатационные показатели в летний и зимний периоды. При формовании образцов было установлено, что смесь теряет подвижность быстрее, чем образцы с буровым шламом. Это указывает на повышенные требования к температурному режиму при укладке такой смеси в конструктивный слой при строительстве автомобильной дороги.

Ключевые слова: асфальтобетон, буровой шлам, отходы пластика, автомобильная дорога, строительство, строительно-дорожные материалы, технология утилизации.

K.G. Pugin^{1,2}, V.K. Pugina¹¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation²Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov,
Perm, Russian Federation

WASTE USE IN THE STRUCTURE OF ORGANOMINERAL COMPOSITES USED FOR THE CONSTRUCTION OF MOTORROADS

The construction of motorroads requires a large amount of building materials. Organomineral mixtures, which include asphalt concrete, are the main building material for the construction of the upper layers of the road structure. In order to reduce the cost of asphalt concrete, part of the natural mineral raw materials may be replaced by industrial waste or consumer waste. Studies carried out in different countries show that waste can be used in technological processes for obtaining building materials on a par with natural raw materials. The involvement of waste in the resource cycle of manufacture of products in demand on the market allows solving environmental issues. A comparative assessment was made of the use of drill cuttings and plastic waste for their use in the structure of asphalt concrete. A preliminary assessment of plastic waste and drill cuttings in terms of environmental hazard indicators showed that there is no excess of the standards for the content of heavy metals in mobile form. This makes it possible to consider waste as a raw material in the production of road construction materials

without any restrictions on environmental safety. The studies carried out have shown that the composition of the asphalt concrete mixture, in which drill cuttings are used as a mineral powder, meets the requirements for asphalt concrete. The conducted studies have shown that HDPE and LDPE waste plastics can be considered as reinforcing and modifying elements in the structure of asphalt concrete. Asphalt concrete, which includes plastic waste, meets the requirements for asphalt concrete used for road construction. Comparative analysis of the obtained asphalt concrete samples with the addition of drill cuttings and plastic waste showed that the use of plastic allows obtaining higher quality asphalt concrete. Asphalt concrete modified with plastic has higher strength characteristics at different temperatures, which indicates high performance in summer and winter. When molding the samples, it was found that the mixture loses mobility faster than samples with drill cuttings. This indicates the increased requirements for the temperature regime, when laying such a mixture in a structural layer during the construction of a motorroad.

Keywords: asphalt concrete, drill cuttings, plastic waste, motorroad, construction, road construction materials, recycling technology.

В настоящее время в России ведутся масштабные работы по строительству новых и реконструкции старых автомобильных дорог. Снижения экономических издержек возможно достичь за счет разработки новых технологий, позволяющих использовать отходы промышленности и потребления в качестве сырья [1–4]. Отходы различных промышленных производств по своим физико-механическим и другим свойствам зачастую не только не уступают природному сырью, но и превосходят его по ряду показателей. Это обусловлено большим разнообразием существующих промышленных производств, которые формируют образование отходов с различными свойствами [5–9].

При строительстве автомобильных дорог значительная часть бюджета отводится на производство асфальтобетона. Асфальтобетонная смесь является самым востребованным дорожно-строительным материалом для строительства дорожных покрытий в мире. Она имеет преимущества по сравнению с другими материалами, используемыми для верхнего слоя автомобильной дороги: продолжительный период эксплуатации; способность выдерживать большие внешние нагрузки; широкая вариация состава для использования в различных климатических условиях; низкая стоимость технологии строительства, содержания и ремонта; хорошие показатели ровности и комфорта; возможность повторного использования после завершения срока эксплуатации автомобильной дороги [9–12]. Для его производства используют минеральные компоненты, которые образуют каркас верхнего слоя покрытия, и вяжущее, которое скрепляет все минеральные части в единый монолит. В качестве минеральных компонентов используется щебень, песок, минеральный порошок. В качестве вяжущего используют битум. В состав асфальтобетонной смеси дополнительно могут входить различные добавки, позволяющие повысить прочностные и эксплуатационные характеристики асфальтобетона. Одним из вариантов снижения стоимости производства асфальтобетонной смеси является замена природных минеральных компонентов на отходы. В настоящее время разработаны и успешно применяются различные технологии такого замещения. В качестве минеральных компонентов используют металлургические шлаки, строительные отходы, отработанную формовочную смесь и другие виды промышленных отходов [13–15]. Использование отходов в составе асфальтобетонной смеси возможно, если физико-механические, химические и экологические показатели отходов близки к значениям заменяемого компонента. При большой разнице показателей использование отходов в составе приводит к снижению эксплуатационных и прочностных характеристик получаемых асфальтобетонов. Другим вариантом успешного применения отходов в составе асфальтобетонов является использование специфических свойств отходов, которые могут повысить прочностные или иные характеристики асфальтобетона. Примером может служить использование полимерных отходов в качестве модификаторов битума (для улучшения адгезии битума к минеральным компонентам), отходов целлюлозы, асбеста, пластика в качестве армирующей добавки (для повышения прочности, износостойкости, устойчивости к образованию колеи) [16, 17]. Данные отходы не имеют химического родства с природными компонентами, используемыми в асфальтобетоне, но улучшают характеристики асфальтобетонов за счет образования новых связей в структуре асфальтобетона.

Используя вышеобозначенные принципы подбора отходов для использования в составе строительного-дорожного материалов, можно выделить два крупнотоннажных отхода, которые могут быть успешно использованы в составе асфальтобетона. Это буровой шлам (отходы бурения нефтяных скважин) и отходы пластиков (полиэтилен низкого и высокого давления), образующихся при эксплуатации жилищно-коммунального хозяйства и в сфере потребления. По объему образования их можно отнести к крупнотоннажным отходам, достаточным для организации производства строительных материалов. Отходы имеют стабильное состояние на протяжении длительного периода. Все эти факторы позволяют рассматривать данные отходы в качестве сырьевых материалов для производства строительного-дорожного материалов.

Буровой шлам в своем составе имеет горную породу и до 5 % нефти. Содержание нефти зависит от геологических условий, технического состояния бурового оборудования, культуры производства работ. Нефть в данном случае рассматривается как источник легких углеводородов, способных повысить адгезионные свойства битума и снизить скорость старения битума при технологическом цикле производства асфальтобетона и эксплуатации. Ранее проведенные исследования показали возможность использовать буровой шлам в качестве инертного заполнителя для тротуарной плитки, бордюрного камня, бетонных смесей различного назначения, в составе керамических изделий. Исходя из предварительной оценки физико-механических свойств и гранулометрического состава было выдвинуто предположение, что буровой шлам возможно использовать в составе асфальтобетона в качестве минерального порошка.

Отходы пластика при использовании в составе асфальтобетона могут играть роль армирующего элемента и модификатора битума, что позволит повысить эксплуатационные характеристики асфальтобетона. Для проведения исследования были выбраны пластики ПНД и ПВД, имеющие температуру плавления, достаточную для создания монолитных органоминеральных структур. Как показывают ранее проведенные исследования, при нагреве и смешивании минеральной части и битума пластик частично переходит в расплав битума, образуя модифицированный битум. Оставшаяся часть полимера равномерно распределяется в слое асфальтобетона, образуя в его структуре армирующие элементы. Это позволяет повысить прочностные свойства получаемого асфальтобетона.

Для проведения исследования были взяты три образца буровых шламов на нефтяной основе разных нефтяных месторождений Западной Сибири. Оценка возможности использования отходов в качестве сырья для производства строительных материалов по экологическим показателям определяли в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.3:3.50–08. Другие характеристики буровых шламов определяли: химическое потребление кислорода (ХПК) водной вытяжки – по ПНД Ф 14.1:2.4.190–03; сухой остаток – по ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.32–02; жесткость – по ПНД Ф 14.1 2 3.98–97; нефтепродукты – по РД 39-0147098-015–90. Оценку буровых шламов на соответствие характеристикам минеральных порошков проводили согласно методике ГОСТ Р 52129–2003. Испытания полученных образцов асфальтобетона выполняли по методикам, указанным в ГОСТ 9128–2013.

Для изготовления образцов асфальтобетона использовали: щебень фракции 10–20 (марка по дробимости М 1000); природный песок с модулем крупности $M_k = 1,80$; отсев дробления горных пород модуль крупности $M_k = 2,81$; минеральный порошок МП ГОСТ 52129–2003; битум БНД 60/90, произведенный ООО «Лукойл-Пермнефтеоргсинтез». Все материалы имеют контроль качества при производстве, что предполагает изготовление асфальтобетона высокого качества.

В качестве пластика были использованы отходы, образованные из полиэтилена низкого и высокого давления, произведенного по ГОСТ 16338–85 и ГОСТ 16337–77 соответственно.

Ранее был исследован состав образцов буровых шламов трех месторождений: выбуренная горная порода – до 65 %; вода – до 30 %; соединения хлоридов – от 0,1 до 0,8 %; соединения металлов – от 1 до 5 %; химические соединения, входящие в состав бурового раствора, – от 3 до 8 %; прочие компоненты и добавки бурового раствора – от 0,1 до 1,0 %. Степень загрязняющих агентов зависит от вида бурового раствора, который добавляется при бурении, оборуду-

дования, с помощью которого производят буровые работы, горной породы. Установлен большой разброс физико-химических показателей буровых шламов разных месторождений. Проведенные исследования показали, что превышений нормативов по содержанию тяжелых металлов в подвижной форме нет. Это дает основание рассматривать буровой шлам в качестве сырьевого материала при производстве строительно-дорожных материалов без ограничения по обеспечению экологической безопасности [18].

Результаты определения физико-химических показателей исследуемых образцов бурового шлама представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические показатели исследуемых буровых шламов

Образец	Определяемые характеристики				
	pH	ХПК, мг	нефтепродукты, мг/дм ³	сухой остаток, мг/дм ³	хлориды, мг/дм ³
№ 1	7,0 ± 0,05	580 ± 29	1,5 ± 0,30	620 ± 62	452,6 ± 25
№ 2	6,9 ± 0,05	1300 ± 65	4,4 ± 0,9	1590,0 ± 159	1411 ± 70
№ 3	7,8 ± 0,05	444 ± 22	2,70 ± 0,9	1800 ± 180	1650 ± 82
ПДК	6,5–9,0	30	0,05	1000	300

Исследование показало, что физико-химические показатели буровых шламов превышают значения ПДК. Полученные характеристики позволяют отнести буровые шламы, используемые в исследовании, к IV классу опасности для окружающей среды. Этот класс опасности позволяет использовать буровые шламы в качестве сырья при производстве строительных материалов.

Оценка содержания пылеглинистых частиц в составе образцов бурового шлама и их зерновой состав показали, что они удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 52129–2003 и могут быть использованы в качестве минерального порошка. По своим свойствам исследуемые буровые шламы схожи с минеральным порошком марки МП-2 (минеральный порошок из некарбонатных горных пород).

Исследование физико-механических характеристик образцов асфальтобетона, в составе которого был использован обезвоженный буровой шлам в качестве минерального порошка, было проведено согласно ГОСТ 9128–2013. Были сформованы три серии образцов асфальтобетонной смеси. Компонентный состав асфальтобетонной смеси: песок – 12 %; щебень – 46 %; отсев дробления – 36 %; буровой шлам – 6 %; битум – 5,3 % свыше, 100 %. Полученные образцы асфальтобетона до испытания показаны на рис. 1.

Образцы асфальтобетона (состав 1, состав 2, состав 3) были получены на сертифицированном лабораторном оборудовании, в лаборатории по испытаниям строительно-дорожных материалов кафедры «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Основные результаты испытаний приведены в табл. 2.

По показателям полученная асфальтобетонная смесь относится к типу Б I марки. По результатам исследования было установлено, что все асфальтобетонные образцы соответствуют требованиям ГОСТ 9128–2013. Использование бурового шлама в количестве 6 % на углеводородной основе взамен минерального порошка позволяет получить асфальтобетон достаточного качества.



Рис. 1. Образцы асфальтобетона

Таблица 2

Физико-механические свойства асфальтобетонных образцов с буровым шламом

Наименование показателя	Требование ГОСТа	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Средняя плотность, г/см ³	Не установлено	2,39	2,35	2,43
Предел прочности при сжатии, МПа:				
– R50 °С	>1,2	1,34	1,30	1,2
– R20 °С	>2,5	2,52	2,55	2,60
– R0 °С	<11,0	10,6	9,8	10,4
Водостойкость	>0,85	0,89	0,93	0,95
Водонасыщение, %	1,5–4,0	1,90	1,70	1,85
Остаточная пористость, %	2,5–5,0	4,4	4,0	3,2

Были сформованы две серии образцов асфальтобетонной смеси, в состав которых в качестве модификатора вошли отходы ПНД (состав 1) и ПВД (состав 2). Компонентный состав асфальтобетонной смеси: щебень фракции 10–20 мм – 46 %; песок – 12 %; отсев дробления – 39 %; минеральный порошок – 3 %; битум БНД 60/90 – 5 % (сверх минеральной части). Отходы пластика в количестве 4 % были добавлены в состав дополнительно сверх 100 % от общего состава асфальтобетонной смеси. Полученные физико-механические характеристики образцов асфальтобетона представлены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические характеристики асфальтобетона с добавлением пластика

Наименование показателя	Требование ГОСТа	Состав 1	Состав 2
Средняя плотность, г/см ³	Не установлено	2,36	2,35
Предел прочности при сжатии, МПа:			
– R50 °С	>1,2	1,5	1,6
– R20 °С	>2,5	4,9	5,0
– R0 °С	<11,0	9,6	9,9
Водостойкость	>0,85	0,93	0,94
Водонасыщение, %	1,5–4,0	1,8	1,7
Остаточная пористость, %	2,5–5,0	3,4	3,3

По результатам исследования было установлено, что все асфальтобетонные образцы с содержанием ПНД и ПВД 4 % соответствуют требованиям ГОСТ 9128–2013.

Сравнительный анализ полученных образцов асфальтобетона с добавлением бурового шлама и отходов пластика показал, что использование пластика позволяет получить более качественный асфальтобетон. Асфальтобетон, модифицированный пластиком, имеет более высокие прочностные показатели при разных температурах. Предел прочности при сжатии у асфальтобетонных образцов с содержанием пластика при температуре 50 °С в среднем на 32–35 % выше, чем у образцов на буровом шламе. При температуре 20 °С этот показатель в среднем на 90–92 % выше у образцов с пластиком по сравнению с образцами на буровом шламе. Это указывает на наличие высоких эксплуатационных свойств асфальтобетонного покрытия в летний период эксплуатации. Покрытие будет более устойчиво к внешним нагрузкам, меньше вероятность появления термической колеи. Снижение предела прочности при сжатии у асфальтобетонных образцов с содержанием пластика при температуре 0 °С в среднем на 10–12 % указывает на более высокие эксплуатационные свойства в зимний период времени. При низких температурах важно, чтобы асфальтобетонное покрытие сохраняло пластичность. Повышение показателя прочности при 0 °С указывает, что битум стремится перейти в хрупкое состояние, при этом возникают трещины в покрытии и формируется шелушение верхнего слоя и разрушение минерального остова. При

формовании образцов было установлено, что асфальтобетонная смесь с пластиком теряет подвижность быстрее, чем образцы с буровым шламом. Это указывает на повышенные требования к температурному режиму при укладке такой смеси в конструктивный слой при строительстве автомобильной дороги.

Буровые шламы, образующиеся при бурении нефтяных месторождений, могут рассматриваться как сырье для производства минерального порошка для асфальтобетонов. Содержание в буровом шламе нефти рассматривается как положительный момент и может быть использовано для производства активированного минерального порошка. Такое использование позволяет снизить количество битума в составе асфальтобетона и получить значительную экономию материальных ресурсов. Проведенные исследования показали, что состав асфальтобетонной смеси: песок – 12 %; щебень – 46 %; отсев дробления – 36 %; буровой шлам – 6 %; битум – 5,3 % свыше 100 % – соответствуют требованиям ГОСТа. Буровой шлам на нефтяной основе можно рекомендовать для включения в состав асфальтобетона до 6 %.

Отходы пластиков ПНД и ПВД могут рассматриваться в качестве армирующих и модифицирующих элементов в структуре асфальтобетона. Асфальтобетон, в состав которого входят: щебень фракции 10–20 мм – 46 %; песок – 12 %; отсев дробления – 39 %; минеральный порошок – 3 %; битум БНД 60/90 – 5 % и отходы пластика 4 % – соответствует требованиям ГОСТа на асфальтобетон. При использовании такой асфальтобетонной смеси необходимо строго выдерживать температуру укладки, так как снижение температуры резко повышает жесткость смеси, снижая коэффициент уплотнения асфальтобетона.

Отходы бурения и пластиковые отходы положительно влияют на процессы структурообразования в органоминеральных смесях. С их помощью возможно получать асфальтобетоны с повышенными физико-механическими и эксплуатационными показателями.

Сравнительная оценка технологий использования отходов бурения и отходов пластиков ПНД и ПВД показала, что технология утилизации в составе асфальтобетона для отходов пластика более выгодна, чем для бурового шлама. Отходы пластика в большей степени положительно влияют на структурообразование асфальтобетона, выступая в качестве армирующего элемента для структуры и в качестве модификатора, улучшая свойства битума. Буровой шлам выступает в качестве инертного элемента, формирующего минеральный остов асфальтобетона, и в незначительной степени влияет на свойства битума. В целом оба отхода могут быть использованы для производства органоминеральных смесей, применяемых для строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

Список литературы

1. Пугин К.Г., Юшков В.С. Использование вторичных материалов для цементобетонных покрытий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 1. – С. 144–151.
2. Тюрюханов К.Ю. Пугин К.Г. Исследование взаимодействия битума с минеральными частицами в асфальтобетоне // Транспортные сооружения. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 19.
3. Получение экологически безопасных материалов на основе отработанного формовочного песка сталелитейного производства / Я.И. Вайсман, К.Г. Пугин, Л.В. Рудакова, И.С. Глушанкова, К.Ю. Тюрюханов // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 3. – С. 109–115.
4. Пугин К.Г., Юшков В.С. Отходы металлургических предприятий для создания цветного асфальтобетона // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21, №. 5. – С. 4–7.

5. Ядыкина В.В., Траутвайн А.И. Влияние активности наполнителей из техногенного кремнеземсодержащего сырья на прочность цементных систем // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 5–1. С. 174–179.
6. Степушин А.П., Сабуренкова В.А. Надежность цементобетонных покрытий аэродромов // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. – 2017. – № 1 (48). – С. 84–89.
7. Исследование углеродминеральных продуктов горючих сланцев в качестве сырья для получения минеральных компонентов / В.Д. Галдина, Е.В. Гурова, О.И. Кривонос, М.С. Черногородова // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. – 2016. – № 2 (48). – С. 82–89.
8. Применение электросталеплавильных шлаков в конструкциях нежестких дорожных одежд / А.С. Погромский, Г.С. Духовный, Т.В. Аниканова, Ш.М. Рахимбаев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – 100 с.
9. Arabani M., Mirabdolazimi S.M. Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder // *J. of Materials Science and Engineering*. – 2011. – Vol. 528, iss. 10–11. – P. 3866–3870.
10. Эффективное использование пород шахтных отвалов в дорожном строительстве / А.Г. Доля, Д.А. Шатворян, Д.В. Смирнова, И.П. Жуков // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. – 2017. – № 2 (124). – С. 94–101.
11. Котлярский Э.В., Кочнев В.И., Давлятова Д.Ю. Автоматизированное проектирование асфальтобетонных смесей с заданными свойствами // *Наука и техника в дорожной отрасли*. – 2015. – № 1 (71). – С. 27–29.
12. Weiguang Zhang. Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: A state-of-the-art review based on application in the United States // *International Journal of Pavement Research and Technology*. – 2017. – Vol. 10, iss. 5. – P. 434–445. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.003>.
13. Effects of coarse aggregate angularity on the microstructure of asphalt mixture / Junfeng Gao, Hainian Wang, Yin Bu, Zhanping You, MohdRosliMohd Hasan, Muhammad Irfan // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 183. – P. 472–484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.170>
14. Primary investigation on the relationship between microstructural characteristics and the mechanical performance of asphalt mixtures with different compaction degrees / Pengfei Liu, Jing Hu, Gustavo Canon Falla, Dawei Wang, Sabine Leischner, Markus Oeser // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 223. – P. 784–793. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.039>.
15. Effect of aggregate contact characteristics on densification properties of asphalt mixture / Iange Li, Peilong Li, Jinfei Su, Yu Xue, Wenyu Rao // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 204. – P. 691–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.023>.
16. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements / Reginald B. Kogbara, Eyad A. Masad, Emad Kassem, A. (Tom) Scarpas, Kumar Anupam // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 114. – P. 602–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002>.
17. Impact of particle morphology on aggregate-asphalt interface behavior / Dongliang Kuang, Ben Zhang, Yuan Jiao, Jianhong Fang, Huaxin Chen, Lu Wang // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 132. – P. 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.132>
18. Власов А.С., Пугин К.Г., Сурков А.А. Геоэкологическая оценка технологии использования отходов бурения в составе асфальтобетона // *Нефтяное хозяйство*. – 2020. – № 12. – С. 139–142.

References

1. Pugin K.G., Iushkov V.S. Ispol'zovanie vtorichnykh materialov dlia tsementobetonnykh pokrytii [The use of secondary materials for cement concrete pavements]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2013, no. 1, pp. 144–151.
2. Tiuriukhanov K.Iu. Pugin K.G. Issledovanie vzaimodeistviia bituma s mineral'nymi chastitsami v asfal'tobetone [Study of the interaction of bitumen with mineral particles in asphalt concrete] *Transportnye sooruzheniia*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 19.
3. Vaisman Ia.I., Pugin K.G., Rudakova L.V., Glushankova I.S., Tiuriukhanov K.Iu. Poluchenie ekologicheskii bezopasnykh materialov na osnove otrabotannogo formovochnogo peska staleliteinogo proizvodstva [Obtaining environmentally friendly materials on the basis of waste foundry sand of steel production] *Teoreticheskaiia i prikladnaia ekologiia*, 2018, no. 3, pp. 109–115.
4. Pugin K.G., Iushkov V.S. Otkhody metallurgicheskikh predpriatii dlia sozdaniia tsvetnogo asfal'tobetona [Waste from metallurgical enterprises for the creation of colored asphalt concrete] *Ekologiia i promyshlennost' Rossii*. 2017. Vol. 21. no. 5. pp. 4–7.
5. Yadykina V.V., Trautvain A.I. Vliianie aktivnosti napolnitelei iz tekhnogenno kremnezemsoderzhashchego syr'ia na prochnost' tsementnykh system. [The influence of the active filler based on the technogenic siliceous raw materials on the strength cement systems]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no 5–1. pp. 174–179.
6. Stepushin A.P., Saburenkova V.A. Nadezhnost' tsementobetonnykh pokrytii aerodromov. [Reliability of the concrete airport pavement]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2017, no. 1 (48), pp. 84–89.
7. Galdina V.D., Gurova E.V., Krivonos O.I., Chernogorodova M.S. Issledovanie uglepodmineral'nykh produktov goriuchikh slantsev v kachestve syr'ia dlia polucheniia mineral'nykh komponentov. [Research of carbon of the mineral products combustible slates as raw materials for reception of the mineral components asphalt concrete]. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii*. 2016, no. 2 (48), pp. 82–89.
8. Pogromskii A.S., Dukhovnyi G.S., Anikanova T.V., Rakhimbaev Sh.M. Primenenie elektrostaleplavil'nykh shlakov v konstruktsiakh nezhestkikh dorozhnykh odezhd. [The use of electric steel slag in the construction of non-rigid pavements]. Belgorod: izdatelstvo BSTU, 2018. 100 p.
9. M. Arabani, S.M. Mirabdolazimi. Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder. *J. of Materials Science and Engineering*. vol. 528, iss. 10–11, 25 April 2011, pp. 3866–3870.
10. Dolia A.G., Shatvorian D.A., Smirnova D.V., Zhukov I.P. Effektivnoe ispol'zovanie porod shakhtnykh otvalov v dorozhnom stroitel'stve [Efficient use of mine waste rock in road construction] *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*, 2017, no. 2 (124), pp. 94–101.
11. Kotliarskii E.V., Kochnev V.I., Davliatova D.Iu. Avtomatizirovannoe proektirovanie asfal'tobetonnykh smesei s zadannymi svoistvami [Computer-aided design of asphalt concrete mixtures with specified properties] *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*, 2015, no. 1 (71), pp. 27–29.
12. Weiguang Zhang. Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: A state-of-the-art review based on application in the United States, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2017, Vol. 10, Issue 5, pp. 434–445. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.003>.
13. Junfeng Gao, Hainian Wang, Yin Bu, Zhanping You, MohdRosliMohd Hasan, Muhammad Irfan. Effects of coarse aggregate angularity on the microstructure of asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 183, pp. 472–484, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.170>
14. Pengfei Liu, Jing Hu, Gustavo Canon Falla, Dawei Wang, Sabine Leischner, Markus Oeser. Primary investigation on the relationship between microstructural characteristics and the mechanical performance of asphalt mixtures with different compaction degrees, *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 223, pp. 784–793. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.039>.
15. Iange Li, Peilong Li, Jinfei Su, Yu Xue, Wenyu Rao. Effect of aggregate contact characteristics on densification properties of asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 204, pp. 691–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.023>.
16. Reginald B. Kogbara, Eyad A. Masad, Emad Kassem, A. (Tom) Scarpas, Kumar Anupam. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements, *Construction and Building Materials*, 2016, Vol. 114, pp. 602–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002>.
17. Dongliang Kuang, Ben Zhang, Yuan Jiao, Jianhong Fang, Huaxin Chen, Lu Wang. Impact of particle morphology on aggregate-asphalt interface behavior, *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 132, pp. 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.132>.
18. Vlasov A.S. Pugin K.G. Surkov A.A. Geoekologicheskaya otsenka tekhnologii ispol'zovaniya othodov bureniya v sostave asfal'tobetona. *Neftyanoe hozyaystvo*, 2020, no. 12, pp. 139–142.

Получено 06.04.2021

Об авторах

Пугин Константин Георгиевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры строительных технологий Пермского государственного аграрно-технологического университета имени академика Д.Н. Прянишникова (614990, г. Пермь, Петропавловская ул., 23); профессор кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

Пугина Вероника Константиновна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры охраны окружающей среды Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: veronika815@inbox.ru).

About the authors

Konstantin G. Pugin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm State Agrarian University of Technology named after Academician D.N. Pryanishnikov (23, Petropavlovskaya st., Perm, 614990, Russian Federation); Professor, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Veronika K. Pugina (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Department of the Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: veronika815@inbox.ru).