

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

2025, Том 12, № 2 / 2025, Vol. 12, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2025.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS225.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS225 (<https://doi.org/10.15862/06SATS225>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

УДК 691.168

Повышение эффективности использования каменных материалов в составе асфальтобетона

^{1, 2}Пугин К.Г., ²Мушегян Е.Р.

¹ФГБОУ ВО «Пермский государственный
аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, Россия

²ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

Автор, ответственный за переписку: Пугин Константин Георгиевич, e-mail: 123zzz@rambler.ru

Аннотация. Один из основных факторов, которые обеспечивают долговечность является устойчивость структуры асфальтобетона к негативному воздействию воды. Создавая устойчивые во времени водонепроницаемые слои на уровне конструктивного слоя, поверхности зерен каменных материалов, снижая количество не замкнутых пор и наличие микротрещин на поверхности зерен щебня возможно достичь увеличения времени эксплуатации асфальтобетонного покрытия. В статье показано, что повышение эффективности использования каменных материалов в составе асфальтобетона возможно за счет направленного изменения свойств их поверхности. Один из способов такого регулирования является поверхностная обработка каменных материалов, водным раствором лигносульфонатов.

После обработки поверхности щебня раствором лигносульфоната и последующей термической сушке на поверхности образуется слой, который заполняет микропоры в поверхностной структуре известнякового

щебня. Установлено, что на эффективность использования раствора лигносульфоната влияют время и температура воздействия. Оценка показателей щебня при различной температуре и времени воздействия показали, что возможно снижение на 27,5 % показателя истираемости и на 50 % уменьшение показателя водопоглощения.

Показано, что использование щебня, подвергнутого поверхностной обработке лигносульфонатами позволяет достичь более высоких показателей у горячих плотных асфальтобетонов. Увеличились показатели водостойкости, водостойкости при длительном водонасыщении. Достигнутые показатели можно объяснить снижением пористости поверхностной структуры зерен щебня за счет коагуляции пор и микротрещин.

Ключевые слова: асфальтобетон; щебень; каменные материалы; лигносульфонат; поверхностная обработка; асфальтобетонное покрытие; упрочнение; износостойкость

Improving the efficiency of using stone materials in asphalt concrete

^{1,2}Konstantin G. Pugin, ²Eremia R. Mushegyan

¹Perm State Agrarian-Technological University
named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia
²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Corresponding author: Konstantin G. Pugin, e-mail: 123zzz@rambler.ru

Abstract. One of the key factors ensuring durability is the resistance of the asphalt concrete structure to the negative effects of water. By creating durable, waterproof layers at the level of the structural layer and the surface of stone material grains, reducing the number of unclosed pores, and minimizing microcracks on the surface of crushed stone grains, it is possible to extend the service life of asphalt concrete pavement. The article demonstrates that improving the efficiency of using stone materials in asphalt concrete can be achieved through targeted modification of their surface properties. One method of such modification is the surface treatment of stone materials with an aqueous solution of lignosulfonates.

After treating the crushed stone surface with a lignosulfonate solution and subsequent thermal drying, a layer forms that fills the micropores in the surface structure of limestone crushed stone. It has been

established that the efficiency of the lignosulfonate solution is influenced by the duration and temperature of exposure. Evaluation of crushed stone performance indicators at different temperatures and exposure times showed a possible reduction in abrasion loss by 27,5 % and a 50 % decrease in water absorption.

The study demonstrates that using crushed stone treated with lignosulfonates leads to improved performance in hot dense asphalt concrete mixtures. Indicators of water resistance and long-term water saturation resistance increased. The achieved results can be attributed to the reduced porosity of the crushed stone grain surface structure due to the sealing of pores and microcracks.

Keywords: asphalt concrete; crushed stone; stone materials; lignosulfonate; surface treatment; asphalt concrete pavement; strengthening; wear resistance

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

Для успешной реализации государственных программ по развитию транспортной сети требуется большое количество асфальтобетонной смеси, которая используется для устройства верхнего слоя конструкции автомобильных дорог. В состав асфальтобетонной смеси входят каменные материалы различного гранулометрического состава, битумное вяжущее и добавки улучшающие физико-механические или эксплуатационные показатели. Несущая способность асфальтобетонного покрытия во многом определяется характеристиками щебня. Они определяют способность дорожной одежды сопротивляться внешним нагрузкам, в первую очередь от транспортных средств и разрушающим воздействиям окружающей среды. В части районов России существует дефицит каменных материалов, обладающих высокими прочностными характеристиками, что увеличивает стоимость производства асфальтобетонной смеси за счет увеличения расходов на транспортирование щебня из других регионов. Транспортные расходы при этом могут достигать 20–35 % от стоимости самого щебня [1–4].

Одним из неблагоприятных факторов окружающей среды, который приводит к различным разрушениям асфальтобетонных покрытий, является неблагоприятное воздействие атмосферных и поверхностных вод. Длительное увлажнение структуры асфальтобетона, знакопеременные температурные воздействия (особенно при переходе через 0°C) приводят к ослаблению структурных связей компонентов асфальтобетона, разрушению и выкрашиванию минеральных зерен щебня и песка. Это формирует ускоренный износ покрытий, образование выбоин и трещин. Проникновение воды в структуру асфальтобетона приводит к отслаиванию битума от поверхности зерен каменных материалов, разрушению поверхностного слоя с последующим разрушением всей структуры асфальтобетона. Дополнительно разрушительное действие воды сказывается и на устойчивости структуры самих каменных материалов. Наличие микротрещин, незамкнутых пор на поверхности зерен каменных материалов способствует разрушению не только поверхностного слоя, а также и всего зерна. Это разрушение обусловлено расклинивающим действием воды при ее замерзании. Расширяясь при замерзании в микротрещине, вода расширяет трещину и проникает глубже при оттаивании. Повторение циклов замерзания оттаивания приводит к образованию новых трещин и расширению старых, разрушению поверхностного слоя, отслаиванию битумных пленок. Снижая водопоглощение, повышая водостойкость, морозостойкость каменных материалов (в частности щебня) можно значительно увеличить срок

эксплуатации асфальтобетонного покрытия за счет стабилизации характеристик поверхностной структуры зерен каменных материалов [5–8].

В виду того, что значительная часть автомобильных дорог России эксплуатируется в условиях изменяющегося влажностного и температурного режимов поиск методов, позволяющих снизить негативное воздействие воды на структуру, является актуальной научной задачей, решение которой позволит увеличить безремонтный срок службы автомобильных дорог.

Физико-механические и эксплуатационные показатели асфальтобетонов определяются свойствами битумного вяжущего и каменных материалов. Низкая водостойкость структуры асфальтобетона обусловлена не высокой прочностью сцепления (адгезией) битума с поверхностью зерен каменных материалов. Для повышения адгезии битума используют полимерные добавки. Наибольшее распространение получили термоэластопласты на основе стирол-бутадиен стирола. За счет комплексного улучшения битумного вяжущего они позволяют повысить эксплуатационные показатели асфальтобетона, в частности, снизить скорость образования колеи, образование трещин [9].

Анализ научных публикаций, посвященных обеспечению эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий позволяет сделать вывод, что один из основных факторов обеспечивающий долговечность является устойчивость структуры асфальтобетона к негативному воздействию воды. Создавая устойчивые во времени водонепроницаемые слои на уровне конструктивного слоя (покрытия), поверхности зерен каменных материалов, снижая количество не замкнутых пор и наличие микротрещин на поверхности зерен щебня возможно достичь увеличения времени эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

Данную задачу можно решать с двух сторон. С одной стороны, модифицируя битум увеличивая его проникающую способность и повышая адгезию, снижая скорость старения, которая обусловлена потерей легких фракций углеводородов битума. С другой стороны, модифицируя поверхность зерен каменных материалов, придавая им шероховатую поверхность, снижая их способность впитывать воду поверхностными слоями, увеличивать хемосорбционные и физические контактные связи с битумом. Наибольшее развитие в настоящее время имеет первое направление, направленное на улучшение свойств битума, приданию битумному вяжущему заданных свойств в зависимости от природно-климатических условий эксплуатации асфальтобетонного покрытия и минералогического состава каменных материалов. Использование полимерно-битумных вяжущих позволяет повысить устойчивость

битумных пленок на поверхности зерен каменных материалов за счет замедления диффузии молекул воды сквозь пленку вяжущего. Для повышения эффекта замедления применяют поверхностно-активные вещества или специально подобранные адгезионно-активированные полимеры.

Хорошие результаты показали технологии использования полимеров, содержащих активные группы. Одним из таких является сополимер этилена с винилацетатом. Его поверхность образована карбонильной группой имеет основной характер, что позволяет улучшить адгезию битумного вяжущего к кислым породам, имеющим на поверхности отрицательный заряд [10].

Использование различных растворов способных на химическом уровне преобразовывать поверхностные слои зерен каменных материалов придавая им более высокую плотность за счет коагуляции пор и трещин позволяет расширить область использования каменных материалов, получаемых из малопрочных горных пород.

Кроме химического упрочнения применяются технологии, использующие для упрочнения каменных материалов органические и минеральные пропиточные составы. Для этих целей используют каменноугольное, сланцевое масло или их смесь. Так же можно отметить и использование для этих целей битумных эмульсий и битума при производстве так называемого «черного» щебня. Относительно новым способом упрочнения каменных материалов является обработка его поверхности расплавом серы. Такая обработка приводит к повышению значений водонепроницаемости, водостойчивости, морозостойкости [11–14]. Улучшение характеристик щебня объясняется коагуляцией капиллярно-пористой структуры поверхности известнякового щебня, что обеспечивает значительное снижение водопроницаемости и как следствие повышается морозостойкость [15–17].

Использование природных полимеров, к которым относится гидролизный лигнин, в составе асфальтобетона (в частности ЩМА) позволяет получить структуру щебеночно-мастичного асфальтобетона более устойчивую к внешним воздействиям при высоких температурах окружающей среды [18].

Анализ методов повышения потребительских свойств щебня позволил сделать предположение, что для эффективной реализации технологии по повышению потребительских свойств асфальтобетонов за счет улучшения характеристик щебня наиболее подходящим методом для реализации на территории Пермского края является пропитка каменных материалов лигносульфонатами. На территории Пермского края имеются производства по переработки древесины, побочными продуктами или отходами которых являются лигносульфонаты.

Методы и материалы исследования

Methods and materials of the study

В исследовании использовали щебень (фракция 10–20 мм) из осадочных пород (породы карбонатные) соответствующий ГОСТ 8267-93, прочностью М400, Лигносульфонат производства АО «Соликамскбумпром» в сухом состоянии с показателями: массовая доля основного вещества, не менее 58 %; рН = 4,7 раствора лигносульфоната; породный состав: ель, пихта.

Для обработки щебня использовали водный раствор лигносульфоната в соотношении лигносульфонат — вода (1:8). Обработку щебня раствором проводили при температуре $21 \pm 3^\circ\text{C}$ и $90 \pm 5^\circ\text{C}$, время обработки (замачивание) 6 часов. Сушка щебня проводилась до достижения постоянной массы при температуре $205 \pm 5^\circ\text{C}$.

Исследования поверхности и элементный состав поверхности щебня проводили на сканирующем электронном микроскопе S-3400N фирмы «HITACHI» с использованием спектрометра XFlashDetektor 4010 фирмы «BRUKER» для проведения рентгеноспектрального микроанализа. Анализ проводили по площади.

Щебень был испытан на основные показатели: прочность, истираемость, водопоглощение по ГОСТ 8269.0-97, ГОСТ 8267-93.

Образцы асфальтобетона испытывались согласно ГОСТ 9128-2013.

Результаты

Results

Оценка изменения поверхности зерен щебня после обработки раствором лигносульфоната основывалась на оценке изменения цвета поверхности, структуры поверхности и изменения спектрограммы поверхности.

Фотографии общего вида поверхности зерен щебня до обработки и после обработки лигносульфонатом представлены на рисунке 1.

После обработки зерен щебня лигносульфонатом поверхность приобрела насыщенный светло коричневый цвет, что визуально подтверждает изменение поверхностного слоя зерен щебня. Лигносульфонат заполнил открытые поры поверхностной структуры, образовав измененный слой.

Поверхность зерен щебня при увеличении в 1 000 раз полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа для необработанного и обработанного щебня представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.



Рисунок 1. Зерна щебня до обработки (слева), зерна щебня после обработки раствором лигносульфоната (справа) (фото автора)

Figure 1. Crushed stone grains before treatment (on the left) and after treatment with a lignosulfonate solution (on the right) (photo by the author)

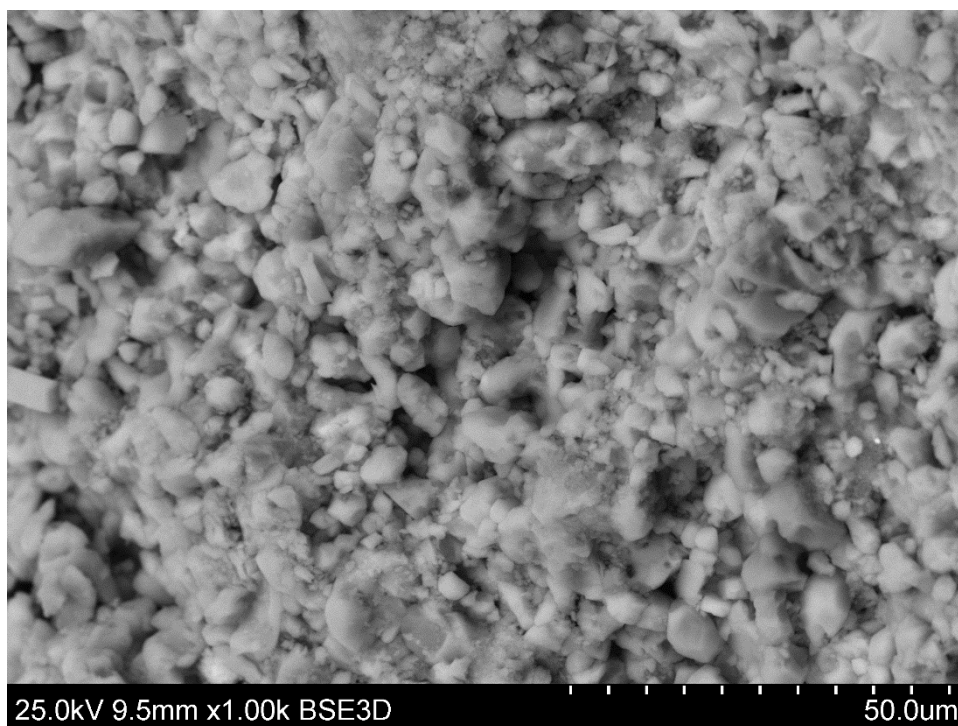


Рисунок 2. Исходная (природная) структура поверхности зерна щебня (фото автора)

Figure 2. Original (natural) surface structure of a crushed stone grain (photo by the author)

Исходная (природная) структура поверхности зерна известнякового щебня характеризуется развитой поверхностью с наличием большого количества незамкнутых пор и микротрещин, которые способствуют прониканию и задерживанию воды в структуре щебня. Это приводит к разрушению верхнего слоя щебня при долговременном переувлажнении за

счет расклинивающего действия воды и размягчения структуры известняка. Развитая поверхность дополнительно формирует большое значение удельной поверхности, которая требует повышенное содержание битумного вяжущего при использовании такого щебня в составе асфальтобетона. Для создания плотной водостойкой структуры асфальтобетона необходимо чтобы битум полностью покрывал всю поверхность щебня. При наличии не покрытых участков, не заполненных открытых пор и микротрещин вода, попадая в данные области будет быстро разрушать зерно щебня в процессе эксплуатации асфальтобетонного покрытия особенно в весенний период времени года, когда наблюдаются многочисленные переходы через ноль.

Создавая защитный слой на поверхности зерна щебня можно не только снизить количество битума в составе асфальтобетонной смеси, а также увеличить стойкость асфальтобетона к негативному действию воды в процессе эксплуатации.

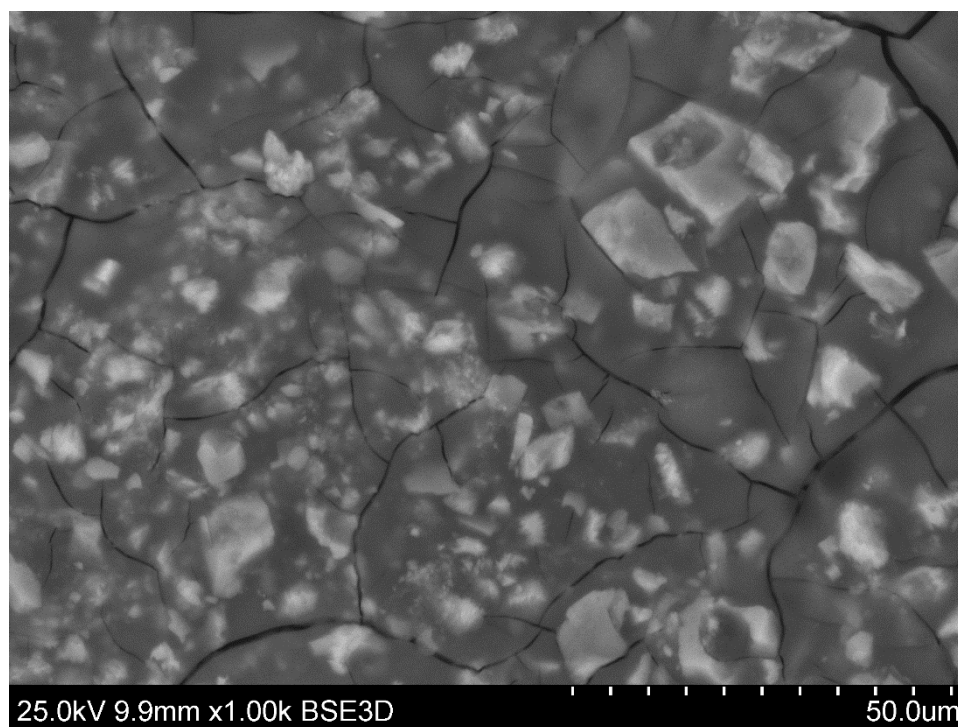


Рисунок 3. Структура поверхности зерна щебня, обработанного раствором лигносульфоната (фото автора)

Figure 3. Surface structure of a crushed stone grain treated with a lignosulfonate solution (photo by the author)

Полученные снимки поверхности щебня показали, что при обработке раствором лигносульфоната и последующей термической сушке на поверхности образуется слой, из лигнина, который заполняет микропоры в поверхностной структуре щебня. Лигнин является ароматическим природным полимером, который входит в состав древесины. Многообразие связей, возникающих при формировании

молекул лигнина, приводит к созданию полимера нерегулярного строения. Древесина хвойных пород содержит примерно 23–38 % лигнина, в то время как лиственные породы содержат от 14 до 25 %.

Спектрограмма поверхности исходного щебня и обработанного раствором лигносульфоната представлены на рисунках 4 и 5 соответственно.

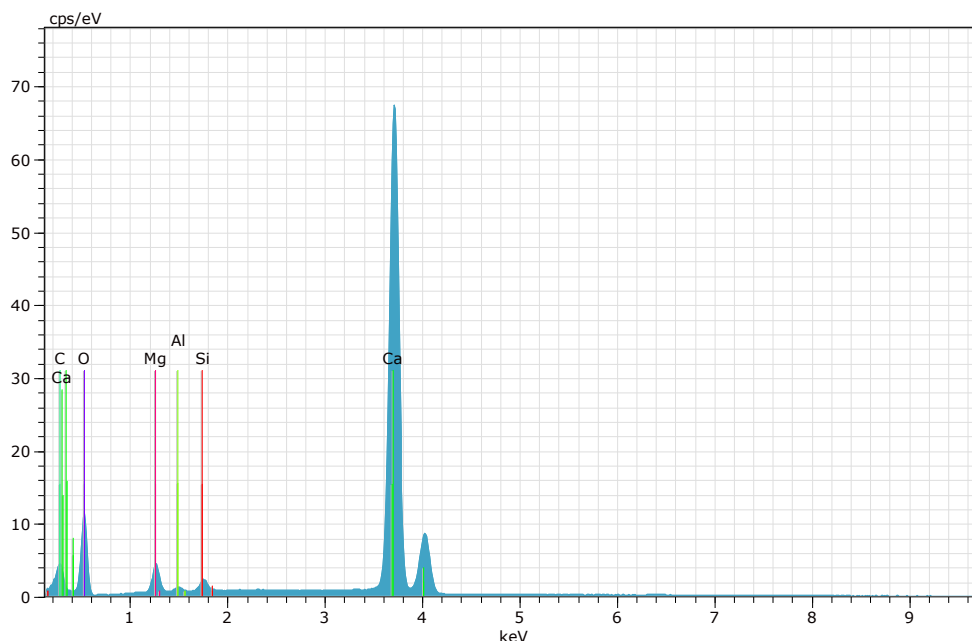


Рисунок 4. Спектрограмма поверхности исходного щебня (составлено автором)

Figure 4. Spectrogram of the surface of untreated crushed stone (compiled by the author)

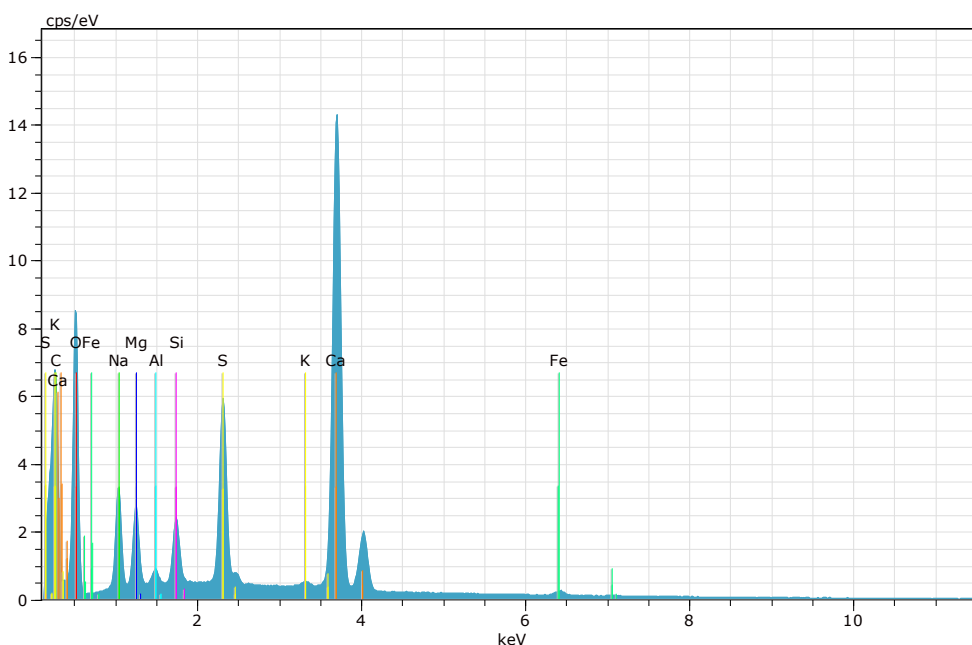


Рисунок 5. Спектрограмма щебня, обработанного раствором лигносульфоната (составлено автором)

Figure 5. Spectrogram of crushed stone treated with a lignosulfonate solution (compiled by the author)

Анализ спектрограмм поверхностей обработанного и не обработанного щебня позволил определить вещественный состав, который сформировался на поверхности зерен щебня после обработки раствором лигносульфоната. Вещественный состав поверхностей до и после обработки представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 / Table 1

Вещественный состав исходной поверхности щебня
Elemental composition of the original crushed stone surface

Химический элемент <i>Chemical element</i>	Весовая доля элемента, % <i>Weight fraction of the element, %</i>	Атомная доля элемента, % <i>Atomic fraction of the element, %</i>	Возможное отклонение значения, % <i>Possible deviation of the value, %</i>
C	11,85	18,75	1,51
O	51,63	61,30	5,96
Mg	2,21	1,73	0,15
Al	0,14	0,10	0,03
Si	0,35	0,24	0,04
Ca	37,76	17,89	1.13

Составлено автором / Compiled by the author

Таблица 2 / Table 2

Вещественный состав поверхности обработанного щебня
Elemental composition of the treated crushed stone surface

Химический элемент <i>Chemical element</i>	Весовая доля элемента, % <i>Weight fraction of the element, %</i>	Атомная доля элемента, % <i>Atomic fraction of the element, %</i>	Возможное отклонение значения, % <i>Possible deviation of the value, %</i>
C	38,68	45,06	4,37
O	50,42	44,10	5,62
Na	4,38	2,67	0,32
Mg	2,25	1,30	0,15
Al	0,30	0,15	0,04
Si	0,88	0,44	0,06
S	3,2	1,40	0,14
Ca	13,74	4,80	0,43
Fe	0,26	0,07	0,03

Составлено автором / Compiled by the author

Вещественный состав поверхности исходного и обработанного раствором лигносульфоната щебня показал, что после обработки на поверхности фиксируется увеличение содержания углерода и железа. Данные химические элементы усиливают адгезию битума к такой поверхности. Присутствие магния, алюминия так же способствуют созданию более прочных связей с битумом. В этом случае можно рекомендовать поверхностную обработку водным раствором лигносульфоната каменных материалов, полученных из кислых горных пород. Создание своеобразной прокладки между поверхностью каменного материала и битумом, которая эффективно создает прочные связи с минеральным материалом с одной стороны и прочные связи с битумом с другой стороны

позволит расширить варианты использования кислых горных пород для производства асфальтобетонов обладающих повышенным сроком эксплуатации.

Полученные данные лабораторных исследований характеристик (дробимости, истираемости и водопоглощения) исходного щебня и щебня, обработанного лигносульфонатом представлены в таблице 3. Обработку щебня раствором лигносульфонатом проводили при температуре $21 \pm 3^\circ\text{C}$ и $90 \pm 5^\circ\text{C}$, время обработки (выдержка) 3 и 6 часов.

Таблица 3 / Table 3

Показатели щебня до и после обработки
Crushed stone properties before and after treatment

Характеристика <i>Characteristic</i>	Контрольный образец <i>Control sample</i>	Температура $21 \pm 3^\circ\text{C}$ <i>Temperature $21 \pm 3^\circ\text{C}$</i>		Температура $90 \pm 5^\circ\text{C}$ <i>Temperature $90 \pm 5^\circ\text{C}$</i>	
		Выдержка 3 часа <i>Exposure 3 hours</i>	Выдержка 6 часов <i>Exposure 6 hours</i>	Выдержка 3 часа <i>Exposure 3 hours</i>	Выдержка 6 часов <i>Exposure 6 hours</i>
Марка щебня по дробимости (потеря массы при испытании, %) <i>Crushed stone grade by crushability (mass loss during testing, %)</i>	400 (23,2 %)	400 (20,7 %)	600 (18,3 %)	600 (19,9 %)	800 (15,8 %)
Марка щебня по истираемости (потеря массы при испытании, %) <i>Crushed stone grade by abrasion (mass loss during testing, %)</i>	И-2 (33,5 %)	И-2 (30,1 %)	И-2 (26,8 %)	И-2 (27,4 %)	И-1 (24,3 %)
Водопоглощение, % <i>Water absorption, %</i>	3,8	2,7	2,3	2,4	1,9

Составлено автором / Compiled by the author

Оценка показателей щебня при различных температурных воздействиях и времени воздействия показали, что использование водного раствора лигносульфоната является перспективным для улучшения поверхностных структур каменных материалов. Возможно снижение на 27,5 % показателя истираемости на 50 % уменьшение показателя водопоглощения. Более высокая температура раствора для пропитки способствует раскрытию микротрещин, снижает вязкость лигносульфоната, что приводит к более глубокой обработке поверхностного слоя щебня.

Для оценки влияния поверхностной обработки щебня на характеристики асфальтобетона были сформованы и испытаны образцы, соответствующие типу А, марки П. Для приготовления асфальтобетонной смеси использовался: щебень, фракция 10–20 мм (30 %) и фракция 5–10 мм (23 %), отсев дробления с модулем крупности $M_k = 1,7$; минеральный порошок МП-1 (3 %); битум БНД 90/130, (5,4 %). Основные показатели асфальтобетона, полученного из исходного щебня (образец № 1) и обработанного лигносульфонатом (образец № 2) представлены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Основные показатели образцов
Key performance indicators of the samples

Наименование показателя <i>Parameter name</i>	Требования ГОСТ 9128 <i>GOST 9128 requirements</i>	Значение / <i>Value</i>	
		Образец № 1 <i>Sample No. 1</i>	Образец № 2 <i>Sample No. 2</i>
Водонасыщение, % <i>Water saturation, %</i>	2,0–5,0	2,72	2,06
Предел прочности при сжатии: При температуре 50°C, МПа <i>Compressive strength: at 50°C, MPa</i>	Более 0,9	1,54	1,68
При температуре 20°C, МПа <i>at 20°C, MPa</i>	более 2,2	2,43	2,74
При температуре 0°C, МПа <i>at 0°C, MPa</i>	менее 12,0	8,98	8,97
Водостойкость <i>Water resistance</i>	более 0,85	0,90	0,94
Водостойкость при длительном водонасыщении <i>Water resistance after long-term water saturation</i>	более 0,75	0,82	0,91
Сдвигоустойчивость <i>Shear resistance</i>	более 0,87	0,93	0,93

Составлено автором / *Compiled by the author*

Основные показатели образцов асфальтобетона полученные с использованием щебня прошедшем обработку лигносульфонатом превышают показатели образцов асфальтобетона полученных с использованием необработанного щебня. Поверхностная обработка известнякового щебня создала более прочный поверхностный слой у зерен щебня, тем самым обеспечила повышение предела прочности при сжатии при температуре 50°C на 9 %, при температуре 20°C на 10 %. Увеличились показатели водостойкости, водостойкости при длительном водонасыщении. Достигнутые показатели можно объяснить снижением пористости поверхностной структуры зерен щебня за счет заполнения пор и микротрещин на поверхности зерен щебня лигнином. Полученные показатели асфальтобетонных образцов в целом коррелируются с общепринятой теорией структурообразования асфальтобетона и не противоречит другим исследователям.

Выводы

Conclusions

Повышение эффективности использования каменных материалов в составе асфальтобетона возможно за счет направленного изменения свойств их поверхности. Один из способов такого регулирования является поверхностная обработка каменных материалов, позволяющая снизить вероятность проникновения воды в структуру щебня при эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

Водный раствор лигносульфоната возможно использовать для улучшения характеристик каменных материалов, полученных из малопрочного известняка.

После обработки поверхности щебня раствором лигносульфоната и последующей термической сушке на поверхности образуется слой, из лигнина, который заполняет микропоры в поверхностной структуре щебня. Спектрограммы поверхности исходного щебня и обработанного раствором лигносульфоната подтверждают формирование нового, с химической точки зрения, слоя способного создать прочные связи с битумным вяжущим.

Установлено, что на эффективность использования раствора лигносульфоната влияют время и температура воздействия. Оценка показателей щебня при различной температуре и времени воздействия показали, что возможно снижение на 27,5 % показателя истираемости и на 50 % уменьшение показателя водопоглощения. Более высокая температура раствора для пропитки способствует раскрытию микротрещин, снижает вязкость лигносульфоната, что приводит к более глубокой обработке поверхностного слоя щебня.

Для придания устойчивости получаемого слоя природного полимера на поверхности щебня необходимо проводить сушку при температуре 200-300°C.

Использование щебня, подвергнутого поверхностной обработке лигносульфонатами позволяет достичь более высоких показателей у горячих плотных асфальтобетонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Курденкова, И.Б.** Развитие нормативной базы на щебень для асфальтобетона / И.Б. Курденкова // Промышленное и гражданское строительство. — 2020. — № 12. — С. 38–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44574380> DOI: [10.33622/0869-7019.2020.12.38-44](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.12.38-44) EDN: [HXIHAI](https://www.edn.ru/entry/14022025-HXIHAI) (дата обращения: 14.02.2025).
2. **Пугин, К.Г.** Использование хризотил-асбеста при производстве асфальтобетонных смесей / К.Г. Пугин, О.В. Яконцева // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2023. — Т. 1. — С. 323–327. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60034469> EDN: [BZRMFX](https://www.edn.ru/entry/14022025-BZRMFX) (дата обращения: 14.02.2025).
3. **Пугин, К.Г.** Повышение эксплуатационных показателей асфальтобетона, используемого для транспортного строительства / К.Г. Пугин, О.В. Яконцева // Химия. Экология. Урбанистика. — 2021. — Т. 3. — С. 141–145. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46192088> EDN: [AMDJPZ](https://www.edn.ru/entry/14022025-AMDJPZ) (дата обращения: 14.02.2025).
4. **Тюрюханов, К.Ю.** Исследование взаимодействия битума с минеральными частицами в асфальтобетоне / К.Ю. Тюрюханов, К.Г. Пугин // Транспортные сооружения. — 2018. — Т. 5. — № 1. — С. 19. URL: <https://t-s.today/20SATS118.html> DOI: [10.15862/20SATS118](https://doi.org/10.15862/20SATS118) EDN: [UPMKPC](https://www.edn.ru/entry/14022025-UPMKPC) (дата обращения: 14.02.2025).

5. **Pugin, K.G.** The use of polymer materials in the composition of asphalt concrete / K.G. Pugin, O.V. Yakontseva, V.K. Salakhova, A.M. Burgonutdinov // Materials Research Proceedings. "Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment". — 2022. — P. 150–155. URL: <https://mrforum.com/product/9781644901755-27/> DOI: [10.21741/9781644901755-27](https://doi.org/10.21741/9781644901755-27) EDN: [QSLQOB](https://www.edn.net/9781644901755-27) (дата обращения: 14.02.2025).
6. **Андронов, С.Ю.** Равномерное распределение фибры в холодных асфальтобетонных смесях с вязким микродиспергированным битумом / С.Ю. Андронов, В.И. Алферов, А.В. Кочетков, Ю.Э. Васильев // Транспортные сооружения. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 14. URL: <https://t-s.today/17SATS120.html> DOI: [10.15862/17SATS120](https://doi.org/10.15862/17SATS120) EDN: [YYNIHR](https://www.edn.net/17SATS120) (дата обращения: 14.02.2025).
7. **Кириухин, Г.Н.** К вопросу о теории структуры асфальтобетона / Г.Н. Кириухин // Дороги и мосты. — 2019. — № 1(41). — С. 247–261. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45648800> EDN: [STEFLL](https://www.edn.net/45648800) (дата обращения: 14.02.2025).
8. **Qin, X.** Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers / X. Qin, A. Shen, Y. Guo [и др.] // Construction and Building Materials. — 2018. — Vol. 159. — P. 508–516. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817322225> DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012) EDN: [YKQ TWO](https://www.edn.net/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012) (дата обращения: 14.02.2025).
9. **Ядыкина, В.В.** Водо- и морозостойкость щебеночно-мастичного асфальтобетона, приготовленного на битуме, модифицированном сэйвиленом / В.В. Ядыкина, С.Н. Наволокина, А.М. Гридчин // Вестник СибАДИ. — 2022. — Т. 19. — № 1(83). — С. 102–113. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48123253> DOI: [10.26518/2071-7296-2022-19-1-102-113](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-102-113) EDN: [VCXQEX](https://www.edn.net/10.26518/2071-7296-2022-19-1-102-113) (дата обращения: 14.02.2025).
10. **Фомин, А.Ю.** Новые серосодержащие материалы для дорожного строительства / А.Ю. Фомин, В.Г. Хозин // Строительные материалы. — 2016. — № 12. — С. 80–82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27656935> EDN: [XHFOGR](https://www.edn.net/27656935) (дата обращения: 26.02.2025).
11. **Глинянова, И.Ю.** Теоретические основы разработки способа получения модифицированного известнякового щебня на основе отходов промышленного производства в сверхкритических жидкостных средах / И.Ю. Глинянова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2017. — № 50(69). — С. 24–29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32321698> EDN: [YMOSMB](https://www.edn.net/32321698) (дата обращения: 26.02.2025).
12. **Фомин, А.Ю.** Высокопрочный серощебень из карбонатных пород для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд / А.Ю. Фомин, Р.Н. Аскарлова, В.Г. Хозин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2022. — № 1(59). — С. 54–63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48233309> DOI: [10.52409/20731523_2022_1_54](https://doi.org/10.52409/20731523_2022_1_54) EDN: [VBHJTW](https://www.edn.net/10.52409/20731523_2022_1_54) (дата обращения: 26.02.2025).
13. **Фомин, А.Ю.** Новые серосодержащие материалы для дорожного строительства / А.Ю. Фомин, В.Г. Хозин // Строительные материалы. — 2016. — № 12. — С. 80–82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27656935> EDN: [XHFOGR](https://www.edn.net/27656935) (дата обращения: 26.02.2025).
14. **Кунаев, В.А.** Разработка и исследование математической модели процесса гидрофобизации шлакового щебня / В.А. Кунаев, А.С. Кадыров, И.В. Георгиади // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. — 2017. — № 4(103). — С. 298–306. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32254224> EDN: [YLGEDR](https://www.edn.net/32254224) (дата обращения: 26.02.2025).
15. **Sakib, N.** A review of the evolution of technologies to use sulphur as a pavement construction material / N. Sakib, A. Bhasin, Md.K. Islam // International Journal of Pavement Engineering. — 2021. — Vol. 22. — № 3. — P. 392–403. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2019.1612064> DOI: [10.1080/10298436.2019.1612064](https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1612064) (дата обращения: 26.02.2025).
16. **Solovieva, V.** High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces / V. Solovieva, I. Stepanova, D. Soloviev // Lecture notes in civil engineering. — 2020. — № 50. — P. 339–345. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-0454-9_35 DOI: [10.1007/978-981-15-0454-9_35](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_35) EDN: [PNXJ V X](https://www.edn.net/10.1007/978-981-15-0454-9_35) (дата обращения: 26.02.2025).
17. **Fediuk, R.** A critical review on the properties and applications of sulfur-based concrete / R. Fediuk, Y.H. Mugahed Amran, M.A. Mosaberpanah [и др.] // Materials. — 2020. — Vol. 13. — № 21. — P. 1–23. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/21/4712> DOI: [10.3390/ma13214712](https://doi.org/10.3390/ma13214712) EDN: [EEYRIB](https://www.edn.net/10.3390/ma13214712) (дата обращения: 26.02.2025).

18. Ле Чан Минь Дат. Применение гидролизного лигнина в качестве стабилизирующей добавки для щебеночно-мастичного асфальтобетона / Ле Чан Минь Дат, В.Б. Балабанов, М.Ю. Проценко // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2019. — Т. 9. — № 2. — С. 334–341. URL: https://journals.istu.edu/izvestia_invest/journals/2019/29/articles/09 DOI: [10.21285/2227-2917-2019-2-334-341](https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-2-334-341) EDN: [RDMEAE](https://www.edn.ru/rdmeae) (дата обращения: 26.02.2025).

Сведения об авторах:

Пугин Константин Георгиевич — доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, Россия, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, e-mail: 123zzz@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=622336
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/F-8610-2019>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55823720700>

Мушегян Еремия Робертович — аспирант, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, e-mail: eremmush@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3657-739X>

Статья получена: 28.04.2025. Принята к публикации: 28.05.2025. Опубликовано онлайн: 23.07.2025.

REFERENCES

1. Kurdenkova I.B. Development of the regulatory framework for crushed stone for asphalt concrete. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;(12):38–44. DOI: [10.33622/0869-7019.2020.12.38-44](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.12.38-44). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Pugin K.G., Yakontseva O.V. [Use of chrysotyl asbestos in the production of asphalt concrete mixtures]. In: [Modernization and scientific research in the transport complex]. 2023;1:323–327. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60034469> (accessed 14th February 2025). (In Russ.).
3. Pugin K.G., Yakontseva O.V. Increasing the performance indicators of asphalt concrete used for transport construction. *Chemistry. Ecology. Urbanism*. 2021;3:141–145. (In Russ., abstract in Eng.).
4. Tyuryukhanov K.Yu., Pugin K.G. Research of the interaction of bitumen with mineral particles in asphalt concrete. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018;5(1):19. DOI: [10.15862/20SATS118](https://doi.org/10.15862/20SATS118). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Pugin K.G., Yakontseva O.V., Salakhova V.K., Burgonutdinov A.M. The use of polymer materials in the composition of asphalt concrete. *Materials Research Proceedings*. 2022;150–155. DOI: [10.21741/9781644901755-27](https://doi.org/10.21741/9781644901755-27). (In Eng.).
6. Andronov S.Yu., Alferov V.I., Kochetkov A.V., Vasiliev Yu.E. Uniform fiber distribution in cold asphalt mixtures with viscous microdispersed bitumen. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;7(1):14. DOI: [10.15862/17SATS120](https://doi.org/10.15862/17SATS120). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Kiryukhin G.N. On the theory of asphalt concrete structure. *Dorogi i mosty*. 2019;1(41):247–261. (In Russ., abstract in Eng.).
8. Qin X., Shen A., Guo Y., et al. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers. *Construction and Building Materials*. 2018;159:508–516. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012). (In Eng.).
9. Yadykina V.V., Navolokina S.N., Gridchin A.M. Water- and frost-resistance of crushed stone mastic asphalt concrete prepared on sevelen-modified bitumen. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(1):102–113. DOI: [10.26518/2071-7296-2022-19-1-102-113](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-102-113). (In Eng.).
10. Fomin A.Yu., Khozin V.G. New sulfur-containing materials for road construction. *Construction Materials*. 2016;(12):80–82. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27656935> (accessed 26th February 2025). (In Eng.).

11. Glinyanova I.Yu. Theoretical basis for the development of the method for the production of modified crushed limestone based on industrial waste in supercritical fluid media. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2017;50(69):24–29. (In Eng.).
12. Fomin A.Y., Askarova R.N., Khozin V.G. High-strength crushed stone from carbonate rocks for the arrangement of bases in road pavement structures. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022;1(59):54–63. DOI: [10.52409/20731523_2022_1_54](https://doi.org/10.52409/20731523_2022_1_54). (In Eng.).
13. Fomin A.Yu., Khozin V.G. New sulfur-containing materials for road construction. *Construction Materials*. 2016;(12):80–82. (In Eng.).
14. Kunayev V.A., Kadyrov A.S., Georgiadi I.V. Development and investigation of the mathematical model of the process of hydrophobization of slag crushed stone. *Construction Materials*. 2017;4(103):298–306. (In Eng.).
15. Sakib N., Bhasin A., Islam Md.K. A review of the evolution of technologies to use sulphur as a pavement construction material. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021;22(3):392–403. DOI: [10.1080/10298436.2019.1612064](https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1612064). (In Eng.).
16. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D. High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces. *Lecture notes in civil engineering*. 2020;50:339–345. DOI: [10.1007/978-981-15-0454-9_35](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_35). (In Eng.).
17. Fediuk R., Amran Y.H.M., Mosaberpanah M.A., et al. A critical review on the properties and applications of sulfur-based concrete. *Materials*. 2020;13(21):1–23. DOI: [10.3390/ma13214712](https://doi.org/10.3390/ma13214712). (In Eng.).
18. Le Chan Min Dat, Balabanov V.B., Protsenko M.Yu. Use of hydrolytic lignin as a stabilising additive for crushed stone-mastic asphalt concrete. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2019;9(2):334–341. DOI: [10.21285/2227-2917-2019-2-334-341](https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-2-334-341). (In Eng.).

Information about the authors:

Konstantin G. Pugin — Perm State Agrarian-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: 123zzz@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=622336
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/F-8610-2019>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55823720700>

Eremia R. Mushegyan — Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: eremmush@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3657-739X>

Submitted: 28th April 2025. Revised: 28th May 2025. Published online: 23rd July 2025.