

Научная статья  
УДК 691.168  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-984-1001>  
EDN: QVKREJ



## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОСКОВ НА АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО

В.В. Ядыкина<sup>1</sup>, О.А. Михайлова<sup>1</sup> ✉, М.С. Лебедев<sup>2</sup>, Е.В. Фомина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
г. Белгород, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия

✉ ответственный автор  
[mihaylovalymar@mail.ru](mailto:mihaylovalymar@mail.ru)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время в дорожном строительстве с целью уменьшения энергозатрат и снижения вредных выбросов все более широко применяют технологии теплых асфальтобетонных смесей. Одним из способов понижения температуры приготовления асфальтобетонной смеси является применение добавок на основе природных и синтетических восков. В связи с этим актуальным является изучение влияния восковых добавок на свойства битумного вяжущего как основы асфальтобетонной смеси. Сцепление вяжущего с минеральным заполнителем является важнейшим свойством, определяющим долговечность асфальтобетонного покрытия. Цель данной статьи – изучение влияния добавок на основе синтетических восков на адгезионные свойства битумного вяжущего.

**Материалы и методы.** Представлены характеристики исследованных добавок на основе синтетических восков: Вискодор ПВ-2, Sasobit и Licomont BS-100. Для моделирования процессов старения вяжущего был использован метод прогрева в тонком слое по ГОСТ 18180 с увеличенным до 9 ч временем термостатирования. Для оценки адгезии исходного и модифицированного битумного вяжущего, а также вяжущего после старения, был применен метод кипячения в воде каменного материала, покрытого битумом, и оценка внешнего вида в соответствии с ГОСТ 11508. Изучение механизма сцепления битумного вяжущего с минеральным заполнителем проводилось посредством спектрального анализа.

**Результаты и обсуждение.** Произведен анализ влияния добавок на основе синтетических восков на сцепление битумного вяжущего с минеральным материалом. Выявлено изменение адгезионных свойств модифицированного исследуемыми добавками битума при термоокислительном старении. Проведено сравнение ИК-спектров исходного и модифицированного битума до и после взаимодействия с каменным материалом и определены различия в механизмах влияния вводимых добавок на сцепление с минеральным заполнителем. Установлено, что добавка Вискодор ПВ-2 значительно улучшает адгезию битума. При этом эффект улучшения адгезии указанной добавкой сохраняется и после термоокислительного старения, хотя несколько снижается. Импортные добавки Sasobit и Licomont BS-100 оказывают меньшее влияние на адгезионные свойства битума.

**Заключение.** Полученные результаты показывают, что применение добавок на основе синтетических восков улучшает адгезионные свойства битума, что положительно отразится на долговечности дорожного покрытия. Так как отечественная добавка Вискодор ПВ-2 превосходит по эффекту улучшения адгезионных свойств известные добавки Sasobit и Licomont BS-100, внедрение в производство исследуемой добавки взамен дорогостоящих импортных позволит одновременно улучшить качество асфальтобетонного покрытия и уменьшить его стоимость.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** адгезия, асфальтобетон, битум, битумное вяжущее, температуропонижающие добавки, воски, теплые асфальтобетонные смеси, минеральный материал, термоокислительное старение, поверхностно-активные вещества

**БЛАГОДАРНОСТИ:** авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи. Исследование выполнено с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

© Ядыкина В.В., Михайлова О.А., Лебедев М.С., Фомина Е.В., 2024



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

Статья поступила в редакцию 24.09.2024; одобрена после рецензирования 25.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Ядыкина В.В., Михайлова О.А., Лебедев М.С., Фомина Е.В. Влияние добавок на основе синтетических восков на адгезионные свойства битумного вяжущего // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 984-1001. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-984-1001>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-984-1001>

EDN: QVKREJ

## THE EFFECT OF SYNTHETIC WAX ADDITIVES ON ADHESIVE PROPERTIES OF BITUMEN BINDERS

Valentina V. Yadykina<sup>1</sup>, Olga A. Mikhailova<sup>1</sup>✉, Mikhail S. Lebedev<sup>2</sup>, Ekaterina V. Fomina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

✉ corresponding author  
[mihaylovalymar@mail.ru](mailto:mihaylovalymar@mail.ru)

### ABSTRACT

**Introduction.** Currently, in road construction, in order to reduce energy costs and harmful emissions, warm asphalt concrete mixture technologies are being increasingly used. One way to reduce the temperature of asphalt concrete mixture prepared is to use additives based on natural and synthetic waxes. In this regard, it is important to study the influence of wax additives on the properties of bitumen binder as a basic component of asphalt concrete mixture. The adhesion between the binder and the mineral filler is the most important property that determines the durability of an asphalt concrete pavement. The purpose of this article is to study the effect of synthetic wax additives on the adhesive properties of bitumen.

**Materials and methods.** The characteristics of the studied synthetic wax additives Viskodor PV-2, Sasobit and Licomont BS-100 have been presented. To simulate binder aging, the heating method in a thin layer, according to GOST 18180, was used with the temperature control time increased to 9 hours. To assess the adhesion between original and modified bitumen binder, as well as the aged binder, the method of boiling stone material coated with bitumen was used, and the assessment of its appearance in accordance with GOST 11508 was made. The study of the adhesion mechanism for the bitumen binder and the mineral filler was carried out by means of spectral analysis.

**Results and discussion.** The influence of synthetic wax additives on the adhesion between bitumen binder and mineral material was analyzed. A change in the adhesive properties of bitumen modified with the studied additives during thermal-oxidative aging was revealed. A comparison was made of the IR spectra of the original and modified bitumen before and after interaction with stone material and the differences in the mechanisms of affecting the adhesion to the mineral filler by the introduced additives were determined. It has been established that the Viskodor PV-2 additive significantly improves bitumen adhesion. Moreover, the effect of improved bitumen adhesion with this additive remains after thermal-oxidative aging, though slightly reduced. Imported additives Sasobit and Licomont BS-100 have a significantly less impact on the adhesive properties of bitumen.

**Conclusion.** The results obtained show that the use of synthetic wax additives improves the adhesive properties of bitumen, which can positively affect the durability of the road surface. Since the domestic additive Viskodor PV-2 is superior in the effect of improving the adhesive properties of bitumen compared to the studied additives Sasobit and Licomont BS-100, the introduction of this additive into production instead of expensive imported additives will provide both improvement in the quality of asphalt concrete pavement and reduction of costs.

© Yadykina V.V., Mikhailova O.A., Lebedev M.S., 2024



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

**KEYWORDS:** *adhesion, asphalt concrete, bitumen, bitumen binder, temperature-reducing additives, waxes, warm asphalt concrete mixtures, mineral material, thermal-oxidative aging, surfactants*

**ACKNOWLEDGMENTS:** *The authors express their gratitude to the Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial staff and the reviewers of the article. During investigation the equipment was used from the Center for High Technologies of BSTU named after. V.G. Shukhov.*

*The study was funded by the RNF grant No. 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115> / and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 of 03/24/2022.*

**The article was submitted: 24.09.2024; approved after reviewing: 25.10.2024; accepted for publication: 16.12. 2024.**

**All authors have read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

*For citation: Yadykina V.V., Mikhailova O.A., Lebedev M.S. The effect of synthetic wax additives on adhesive properties of bitumen binders. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 984-1001. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-984-1001>*

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционные горячие асфальтобетонные смеси, используемые для устройства дорожного покрытия, имеют значительное количество недостатков: большое потребление энергоресурсов, высокие температуры приготовления и укладки, что сопровождается выбросами парниковых газов и вредными условиями труда работников асфальтобетонных заводов и дорожных рабочих. Способом минимизации таких недостатков является применение технологий теплых асфальтобетонных смесей [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Теплые асфальтобетонные смеси готовят при температуре на 20–40 °С ниже, чем горячие, что достигается различными методами снижения вязкости дорожного битума. Применение технологий теплых асфальтобетонов позволяет решить целый ряд актуальных задач: экономия энергии, снижение вредных выбросов, улучшение условий труда работников, возможность внесения в состав большего количества переработанного асфальтобетона, возможность укладки смесей при более низких температурах окружающей среды, продление сезона дорожных работ [2].

В связи с вышеперечисленными преимуществами теплые асфальтобетонные смеси с каждым годом все шире применяются в дорожном строительстве. По прогнозам некоторых специалистов, в ближайшее время доля теплых асфальтобетонов может увеличиться до 40% от общего количества производимых асфальтобетонных смесей [3].

Негативным фактором при использовании добавок, снижающих вязкость битума, является вероятность снижения прочности асфальтобетона и устойчивости к колебно-

стидорожного покрытия при высоких летних температурах [4].

Применение органических добавок – природных и синтетических восков – позволяет получить теплые асфальтобетонные смеси с повышенной прочностью и устойчивостью к колееобразованию. В качестве таких добавок используются органические амидные воски, монтан-воски, воски Фишера-Тропша, а также природные воски и парафины [5]. До недавнего времени ассортимент восковых добавок для битума был представлен исключительно импортными добавками (например, Sasobit, Licomont, Asphaltan и др.). На данный момент в условиях острой необходимости импортозамещения на рынке дорожного строительства появились отечественные восковые модификаторы, например, Вискодор [6].

Использование таких добавок позволяет снизить вязкость битума при температуре выше температуры плавления воска, и таким образом понизить температуру приготовления и укладки смеси. При понижении температуры вязкость битума в сравнении с немодифицированным увеличивается, что позволяет повысить прочность и колееустойчивость дорожного покрытия [7].

Многочисленные исследования [8, 9, 10, 11, 12] доказывают эффективность применения восковых добавок в теплых асфальтобетонных смесях в качестве модификатора реологии битума и для повышения прочностных свойств асфальтобетонного покрытия. Но тем не менее некоторые аспекты влияния восковых добавок на свойства битумного вяжущего и асфальтобетона изучены недостаточно полно.

Одним из наиболее важных свойств битумного вяжущего является сцепление с мине-

ральным материалом. Плохая адгезия между битумом и заполнителем приводит к отслаиванию вяжущего под воздействием воды и внешней нагрузки. В результате в дорожном полотне начинаются процессы эрозии, шелушения, образуются трещины [13]. Поэтому для получения качественного дорожного покрытия ключевым фактором при подборе состава битумного вяжущего является обеспечение высокой адгезии между битумом и минеральными компонентами асфальтобетонной смеси.

Взаимодействие битума и минерального материала предполагает комплекс процессов: физическая адсорбция в зоне контакта битума и минерального материала, хемосорбция, избирательная диффузия компонентов битума в минеральный материал под воздействием капиллярных сил<sup>1</sup>.

В настоящее время существует более 150 методов определения адгезионных свойств битума, причём общепринятых методов испытаний нет [14]. На основании литературных данных эти методы можно разделить на три группы: определение сил сцепления битума с различными материалами; определение стойкости битума к отслаивающему действию воды с различными материалами; определение адгезии как фундаментальной величины (измерение угла смачивания, энергии межфазного разрушения, адсорбционной способности и др.) [15].

В России наиболее распространен качественный (визуальный) метод определения в соответствии с Межгосударственным стандартом 11508. Его суть заключается в визуальной оценке степени покрытия минерального заполнителя битумом после кипячения в воде и сравнение с эталонными образцами.

Влияние восков на адгезию битума изучено недостаточно, и из-за разных подходов и методов оценки адгезии существуют некоторые противоречия в результатах исследований. Так, китайские исследователи [16], используя для оценки адгезии тест на отрыв на приборе ZQS6, выявили, что введение воска Sasobit увеличивает адгезию к минеральному материалу с ростом концентрации до 3%, но дальнейшее увеличение количества добав-

ки ведет к снижению адгезии. Исследователи из Харьковского национального автомобильно-дорожного университета [17] проводили испытания вяжущих, модифицированных восками Licomont BS-100 и Sasobit в соответствии с украинским стандартом СОУ 42.1-37641918 на сцепление со стеклом при 85°C. По их результатам, влияние указанных восков на сцепление было незначительным.

Сцеплением битумного вяжущего с поверхностью заполнителя должно быть не только высоким, но и стабильным во времени, что является одним из условий долговечности дорожного покрытия. Нагрев битума до высоких температур при приготовлении асфальтобетонной смеси вызывает термоокислительное старение битума, что, как следствие, ведет к ухудшению таких его свойств, как пластичность, эластичность, адгезия к минеральному заполнителю любого типа, что неминуемо приводит к преждевременному разрушению покрытий автомобильных дорог [18].

Изучение влияния температуропонижающих восковых добавок на адгезионные свойства битумного вяжущего является актуальной задачей. В данной статье впервые изучено влияние отечественной добавки на основе синтетических восков Вискодор ПВ-2 по сравнению с известными импортными температуропонижающими добавками, а также влияние процессов, протекающих при термоокислительном старении, на адгезионные свойства модифицированного битума.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вискодор ПВ-2 является модифицирующей битум добавкой на основе синтетических восков и катионных ПАВ. Данный модификатор разработан компанией ООО «Селена» в сотрудничестве с кафедрой автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Воски, входящие в состав добавки, обеспечивают снижение вязкости битумного вяжущего при температурах приготовления асфальтобетонной смеси, что позволяет понизить температуры ее пригот-

<sup>1</sup> Zelenskaya A.D., Chernetskaya S.V. Adhesion of bitumen film to the surface of mineral aggregate // Современные прикладные исследования: материалы четвертой национальной научно-практической конференции, Шахты, 16–18 марта 2020 года. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2020. С. 188-191.

ления и укладки<sup>2</sup>. Для улучшения адгезионных свойств в добавку введена смесь имидазолинов и амидоаминов, так как эффективность использования в качестве промотора адгезии подобных катионных ПАВ подтверждена многочисленными исследованиями<sup>3,4</sup> [19, 20].

Для проведения сравнительного анализа использованы восковые добавки импортного производства: Sasobit Licomont BS-100.

Добавка Licomont BS-100 (производство Clariant, Швейцария) является амидным воском, полученным в результате реакции жирных кислот с алифатическими диаминами. По результатам исследований [21, 22], введение в состав битума добавки Licomont BS-100 обеспечивает снижение вязкости при высоких технологических температурах и ее повышение при снижении температуры, что дает структурирующий эффект при температурах эксплуатации дорожного покрытия.

Добавка Sasobit (производство SasolWax, Германия) является полиэтиленовым воском, полученным в результате синтеза Фишера-Тропша. При температуре выше 120 °С он полностью растворяется в битуме, а при снижении температуры образует в нем сетчатую структуру, в результате чего повышается температура размягчения битумного вяжущего и его вязкость, что подтверждается исследованиями [23, 24, 25].

В качестве вяжущего в работе использован битум вязкий дорожной марки БНД 100/130 производства АО «Газпромнефть – Московский НПЗ».

Для проведения испытаний битум разогревали до температуры 150 °С, вводили 2% исследуемых добавок и с помощью лабораторной мешалки перемешивали при указанной температуре в течение 1 ч. Концентрация добавок 2% была выбрана как рациональная исходя из результатов исследований [6]. Для изучения влияния процессов старения на адгезионные свойства исходного и модифици-

рованного вяжущего полученные образцы битума распределяли на чашках Петри тонким слоем (4 мм) и термостатировали в течение 9 ч в сушильном шкафу при 163 °С.

В качестве минерального материала использовали отсев гранита фракции 0–4 мм (производство ОАО «Павловск Неруд»). Минеральный материал промывали дистиллированной водой и сушили при 110 °С в течение 2 ч. Для приготовления битумо-минеральной смеси в две фарфоровые чашки помещали по 30 г минерального материала и по 1,20 г испытуемого образца вяжущего с погрешностью не более 0,01 г. Чашки выдерживали в течение 20 мин при 140 °С. Затем битум и минеральный материал в чашках перемешивали шпателем до покрытия всей поверхности минерального материала вяжущими смесь выдерживали при комнатной температуре в течение 20 мин.

Полученную битумно-минеральную смесь выкладывали на металлическую сетку № 025 равномерным слоем, опускали сетку в стакан с кипящей дистиллированной водой и выдерживали в кипящей воде в течение 30 мин. По окончании кипячения сетку помещали в холодную воду на 3 мин, содержимое выкладывали на фильтровальную бумагу и оценивали результат согласно ГОСТ 11508 (метод А) визуально. Дополнительно оценку сцепления проводили весовым методом, основанным на измерении потери массы битума в процессе кипячения. Количественную характеристику определяли по формуле

$$Sn = \frac{(m_2 - m_0) \times 100}{(m_1 - m_0)};$$

где  $m_0$  – масса минерального материала, г;

$m_1$  – масса навески битумо-минеральной смеси до кипячения, г;

$m_2$  – масса навески битумо-минеральной смеси после кипячения, г;

<sup>2</sup> Михайлова О.А., Колесников Р.С. Исследование влияния добавок на основе синтетических восков на физико-механические свойства асфальтобетонной смеси // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова: Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Ч. 9. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 234–239

<sup>3</sup> Эфендиева Л.М., Мусалы В.Х., Насибова Г.Г. Исследование композиций, приготовленных на основе амидоаминов синтетических нефтяных кислот и моторных масел ак-15 в качестве присадки для битума // Материалы конференций, Сумгаит, 15–16 апреля 2021 года. Том 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ХИМИИ. Сумгаит: Сумгаитский государственный университет, 2021. С. 215–219.

<sup>4</sup> Миргородский В.А., Савинова С.А. Влияние свойств каменных материалов на выбор адгезионной добавки // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 80-й Юбилейной всероссийской научно-технической конференции, Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. С. 272–277.

Sn–сцепление битума с минеральным материалом, %.

Для оценки взаимодействия битума и модифицированных вяжущих до и после термостатирования с поверхностью минерального материала из гранитной породы был использован метод ИК-спектроскопии на приборе Vertex 70 (Bruker, Германия) в среднем ИК-диапазоне 4000–400 см<sup>-1</sup>. В качестве вяжущего использовались модельные системы, состоящие из битума с 10% каждой из добавок. Минеральный материал смешивался с вяжущими и выдерживался в течение суток. Далее зерна заполнителя, покрытые битумом, разогревались, битумная пленка механически снималась с поверхности минерального зерна и использовалась для приготовления спрессованной таблетки из смеси с KBr для исследования на спектрометре.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования сцепления с минеральным материалом исходного и модифицированного битума 2% исследуемых добавок битума до и после термостатирования представлены на рисунке 1 и в таблице.

Фотографии внешнего вида минерального материала с битумным покрытием после кипячения, представленные на рисунке 1,

свидетельствуют о том, что добавки Sasobit и Licomont BS-100 улучшают адгезионные свойства битума (с 21% до 36% и 48% соответственно) (см. таблицу), но увеличение сцепления битума с минеральным материалом согласно оценке по ГОСТ 11508 остается на уровне образца № 3 (покрытие менее ¼ поверхности минерального материала). После термостатирования адгезия битума с добавкой Sasobit возрастает с 36 до 47%, а с Licomont BS-100 с 48 до 56%, но в обоих случаях по ГОСТ 11508 также не превышает уровня образца № 3.

Наибольший эффект увеличения сцепления битума с каменным материалом наблюдается при введении добавки Вискодор ПВ-2 (с 21 до 99%, а по оценке согласно ГОСТ 11505 – от образца №3 до образца №1). После старения эффект улучшения адгезии добавкой Вискодор ПВ-2 также сохраняется достаточно высоким (91% и соответствует образцу №2). Такой эффект связан с присутствием в составе добавки аминных поверхностно-активных веществ, увеличивающих адгезию и термостабильность вяжущего.

На рисунке 2 представлены результаты сравнительного анализа методом ИК-спектроскопии состава исходного немодифицированного битума БНД 100/130 и битумов, модифицированных исследуемыми добавками.

Таблица  
Сцепление с минеральным материалом исходного и модифицированного битума  
Источник: составлено авторами.

Table  
Adhesion between mineral material and original and modified bitumen  
Source: compiled by the authors.

Введенная добавка	До прогрева		После прогрева	
	Сцепление битума с минеральным материалом, Sn, %	Оценка сцепления по ГОСТ 11508 соответствует образцу, №*	Сцепление битума с минеральным материалом, Sn, %	Оценка сцепления по ГОСТ 11508 соответствует образцу, №*
Без добавки	21	3	28	3
Sasobit	36	3	47	3
LicomontBS-100	48	3	56	3
Вискодор ПВ-2	99	1	91	2

где № 1 – минеральный материал покрыт битумом полностью;

№ 2 – покрыто битумом более ¾ минерального материала;

№ 3 – покрыто битумом менее ¾ минерального материала.

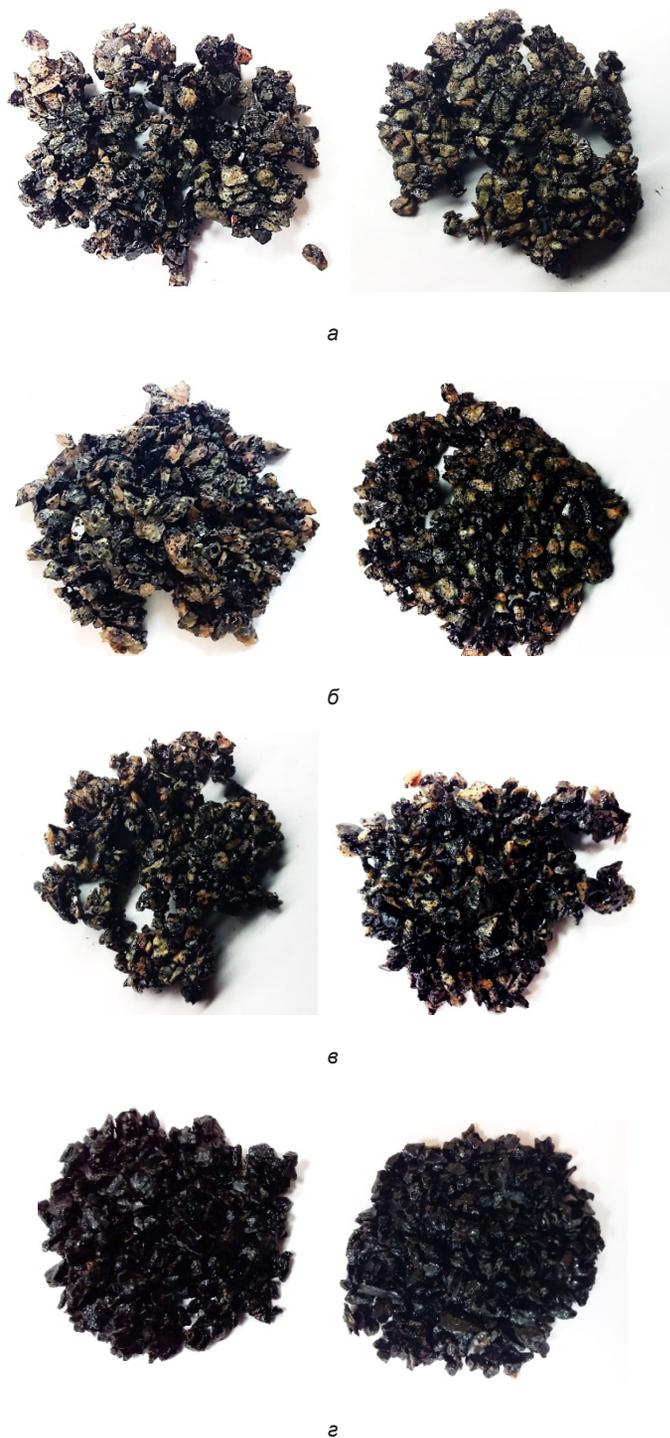


Рисунок 1 – Внешний вид минерального материала с битумным покрытием после кипячения, слева – исходное вяжущее, справа – после старения:  
а – битум без добавок; б – Sasobit; в – Licomont BS-100; г – Вискодор ПВ-2  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Appearance of mineral material with a bitumen coating after boiling:  
on the left – the original binder, on the right – the aged binder.  
а – bitumen without additives; б – Sasobit; в – Licomont BS-100; г – Viscodor PV-2  
Source: compiled by the authors.

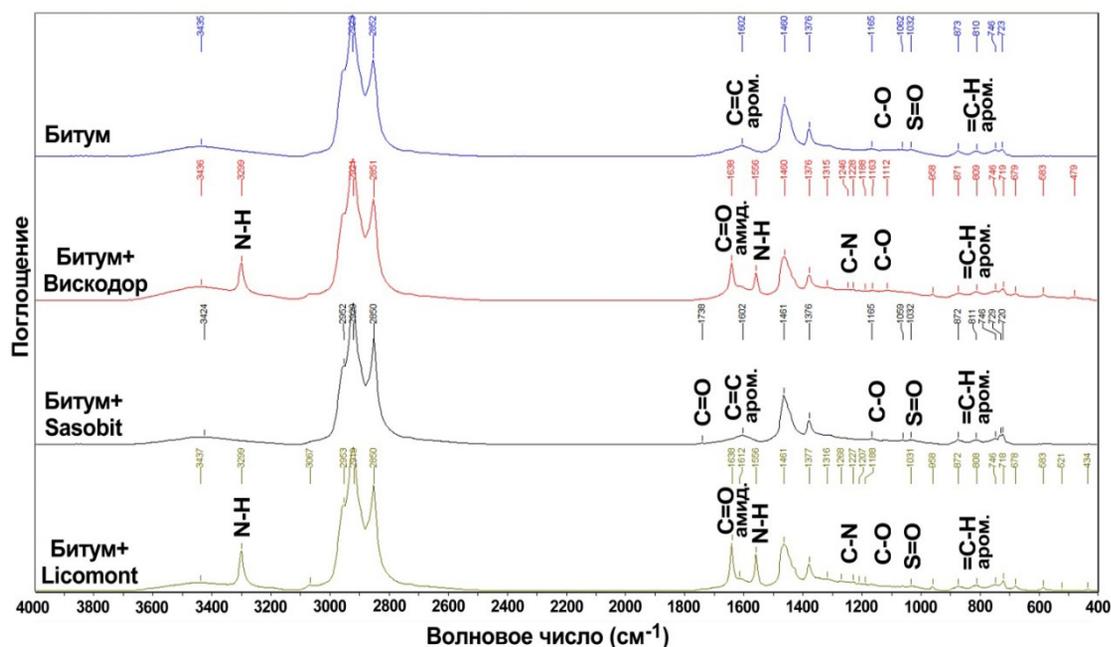


Рисунок 2 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного различными добавками  
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with various additives  
Source: compiled by the authors.

При анализе ИК-спектра немодифицированного битума выявлено присутствие пиков, соответствующих деформационным (1460, 1376, 721  $\text{см}^{-1}$ ) и валентным (2952, 2922, 2851  $\text{см}^{-1}$ ) колебаниям  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$  групп, что показывает свойственное битуму высокое содержание в составе предельных углеводородов, парафинов и масел. Полоса 1604  $\text{см}^{-1}$  и пики в низкочастотной области (746, 807 и 873  $\text{см}^{-1}$ ) свидетельствуют о наличии ароматических структур в составе битума [26, 27].

При сравнении ИК-спектров исходного битума и модифицированного исследуемыми добавками можно отметить изменение интенсивности полос поглощения битума, а также появление новых пиков. Наиболее близок к спектру исходного битума ИК-спектр вяжущего, модифицированного добавкой Sasobit, что

объясняется тем, что данный модификатор является окисленным полиэтиленовым воском, для которого характерно высокое содержание предельных углеводородов, сходных свходящими в состав битума. Это также подтверждают и данные, полученные китайскими исследователями [27].

При введении в состав вяжущего добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 на ИК-спектрах появляются полосы 3299 и 1566  $\text{см}^{-1}$ , соответствующие валентным и деформационным колебаниям NH-групп, полоса в области 1638  $\text{см}^{-1}$ , доказывающая присутствие карбонильных групп третичных амидов, а также полоса в области 1248  $\text{см}^{-1}$ , свидетельствующая о наличии C-N-групп [28, 29]. Это объясняется наличием в составе Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 амидных соединений.

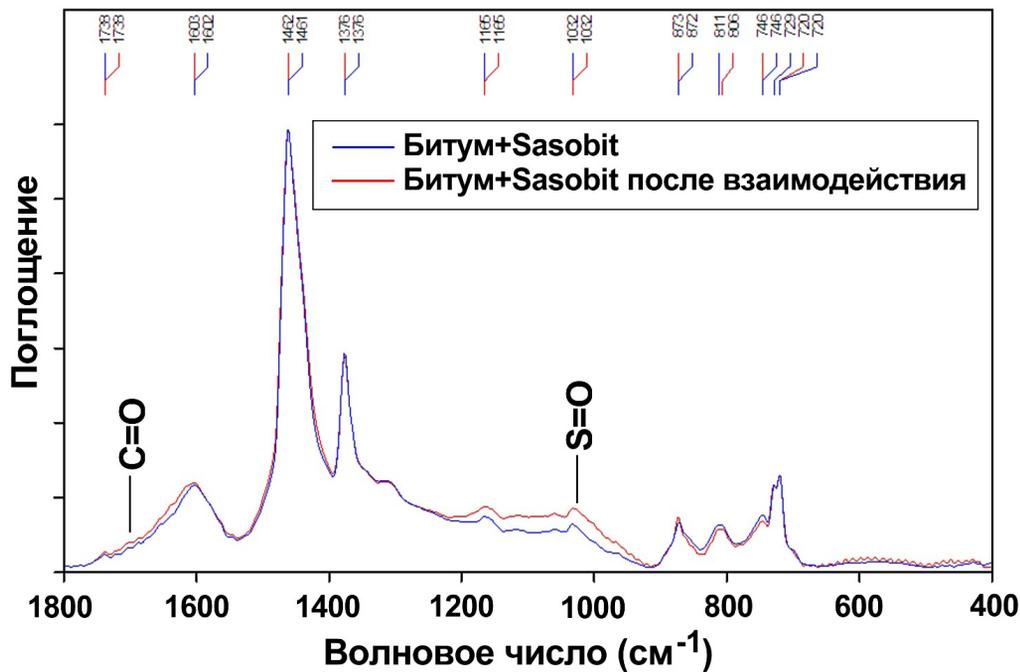


Рисунок 3 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Sasobit, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева  
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with Sasobit before and after interaction with the surface of grains of granite screenings  
 Source: compiled by the authors.

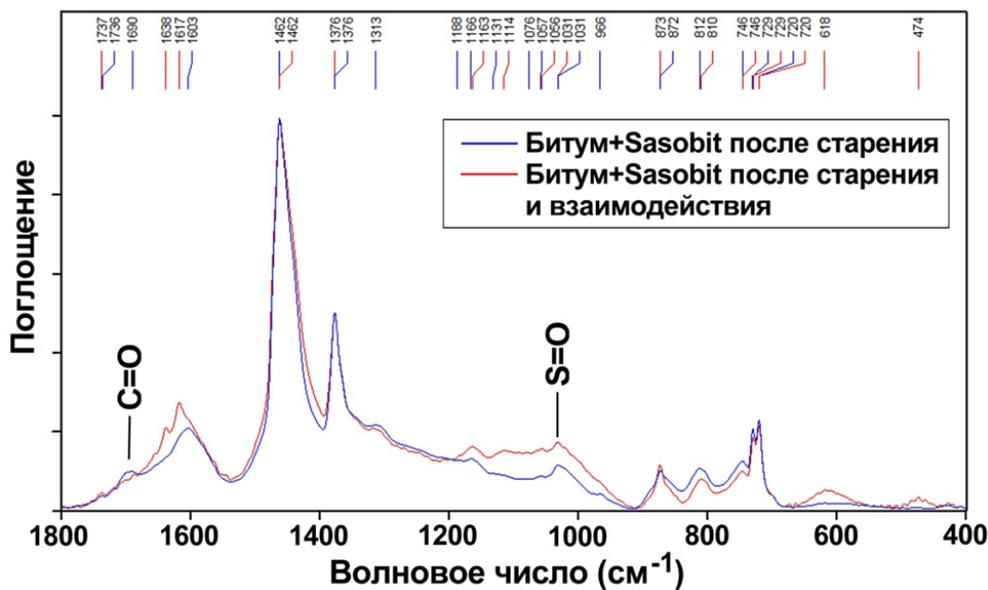


Рисунок 4 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Sasobit, после старения до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева  
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with Sasobit after aging before and after interaction with the surface of grains of granite screenings  
 Source: compiled by the authors.

При анализе ИК-спектров битума исходного и битума, модифицированного Sasobit, до и после взаимодействия с каменным материалом значительного изменения интенсивностей поглощения не обнаружено. Ввиду большой схожести картин изменения ИК-спектров немодифицированного битума и вяжущего с добавкой Sasobit в данной статье приведены только изменения ИК-спектра битума с Sasobit (рисунок 3). Увеличение количества сульфоксидных групп S=O ( $1031 \text{ см}^{-1}$ ) [26] и всей области  $\sim 900\text{--}1200 \text{ см}^{-1}$  после взаимодействия связано с присутствием в битуме, снятом с минерального материала, мельчайших частиц гранита – полиминеральной алюмосиликатной породы, имеющей максимумы поглощения на ИК-спектрах именно в этом диапазоне. Отсутствие значимого изменения интенсивностей полос ИК-спектра обусловлено тем, что добавка Sasobit не содержит в своем составе

поверхностно-активных веществ, и механизм взаимодействия с поверхностью твердых частиц носит, как и в немодифицированном битуме, преимущественно физический характер. Этим и объясняется невысокий показатель сцепления вяжущего с минеральным материалом (см. рисунок 1, таблицу).

При сравнении ИК-спектров битума, модифицированного Sasobit, после длительного прогрева до и после взаимодействия с гранитным отсевом, заметно, что в отобранном с поверхности минерального зерна вяжущем несколько уменьшается интенсивность пика, соответствующего колебаниям карбонильных групп C=O в области  $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$  (рисунок 4) [26], что также наблюдалось и в состаренном немодифицированном вяжущем. Это свидетельствует о некоторой адсорбции окисленных компонентов битумного вяжущего на поверхности минерального материала.

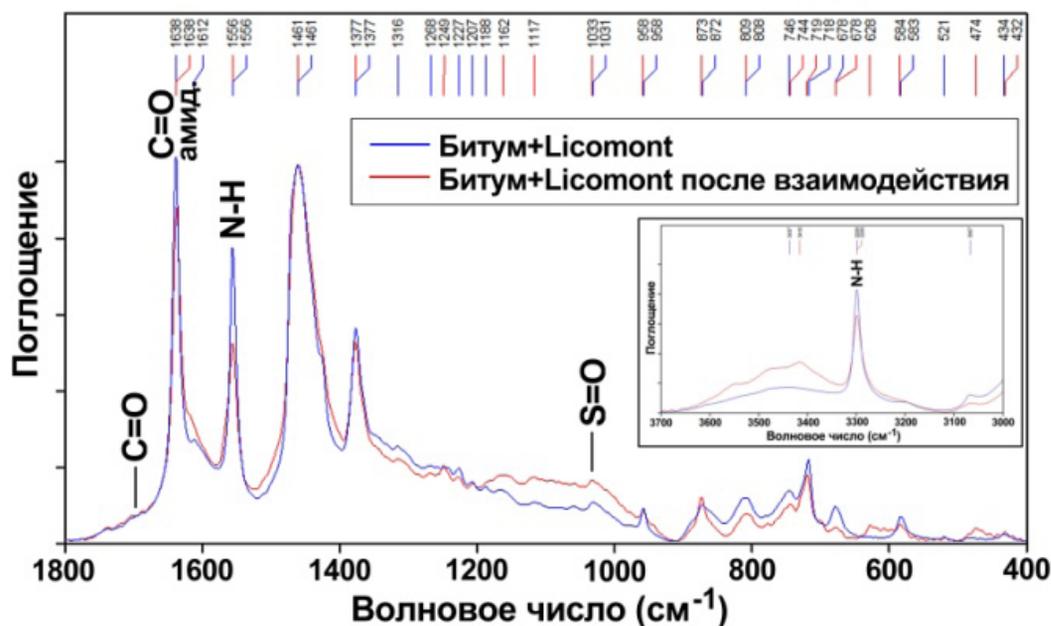


Рисунок 5 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Licomont BS-100, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with Licomont BS-100 before and after interaction with the surface of grains of granite screenings  
Source: compiled by the authors.

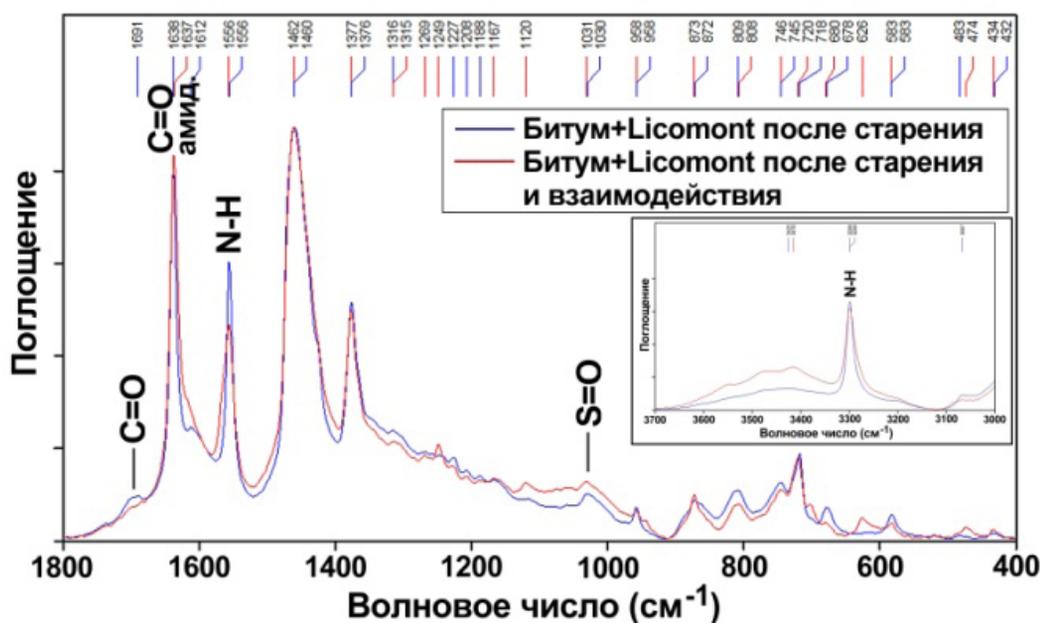


Рисунок 6 – ИК-спектры битума, модифицированного Licomont BS-100, после старения до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – FT-IR spectra of bitumen modified with Licomont BS-100 after aging before and after interaction with the surface of grains of granite screenings  
Source: compiled by the authors.

Поскольку добавка Licomont BS-100 представляет собой амидный воск, она содержит в своем составе поверхностно-активные вещества. Это способствует реализации, помимо физического взаимодействия модифицированного битума с минеральными частицами, химической адсорбции с поверхностью. В результате этого при сравнении ИК-спектров модифицированного указанным воском вяжущего, снятых до и после взаимодействия с минеральным материалом (рисунок 5), заметно значительное снижение интенсивности полос поглощения функциональных групп добавки таких, как N-H (3299 и 1556  $\text{cm}^{-1}$ ) и C=O в амидах (1638  $\text{cm}^{-1}$ ) [28, 29]. Однако ввиду того, что реакционные группы в составе добавки соединены с длинными и сложными углеводородными структурами с большой молекулярной массой, действие ПАВ этой добавки локализовано в местах контакта амидного воска в массе битума с минеральной поверхностью. Этим можно объяснить невысокую адгезию модифицированного битумного вяжущего с гранитным заполнителем.

Механизм адгезии состаренного вяжущего с добавкой Licomont BS-100 не меняется, если судить по ИК-спектрам (рисунок 6). Пики, характеризующие функциональные группы добавки N-H (3299 и 1556  $\text{cm}^{-1}$ ), уменьшают свою интенсивность после взаимодействия. Полоса C=O группы в амидах (1638  $\text{cm}^{-1}$ ) практически не меняет интенсивности, поскольку на нее накладываются профили O-H-групп, сорбированных бромидом калия при пробоподготовке, высота которых в образце после взаимодействия оказалась существенно выше. Дополнительный вклад в адгезионные свойства после старения вносят окисленные компоненты битума, характеризующиеся полосой поглощения карбонильной группы C=O (~1700  $\text{cm}^{-1}$ ), которых в битуме после смешения с гранитным отсевом становится несколько меньше. Выводы об изменении содержания сульфоксидных групп S=O (1031  $\text{cm}^{-1}$ ) сделать затруднительно, поскольку в битумах после взаимодействия присутствуют мельчайшие частицы гранита.

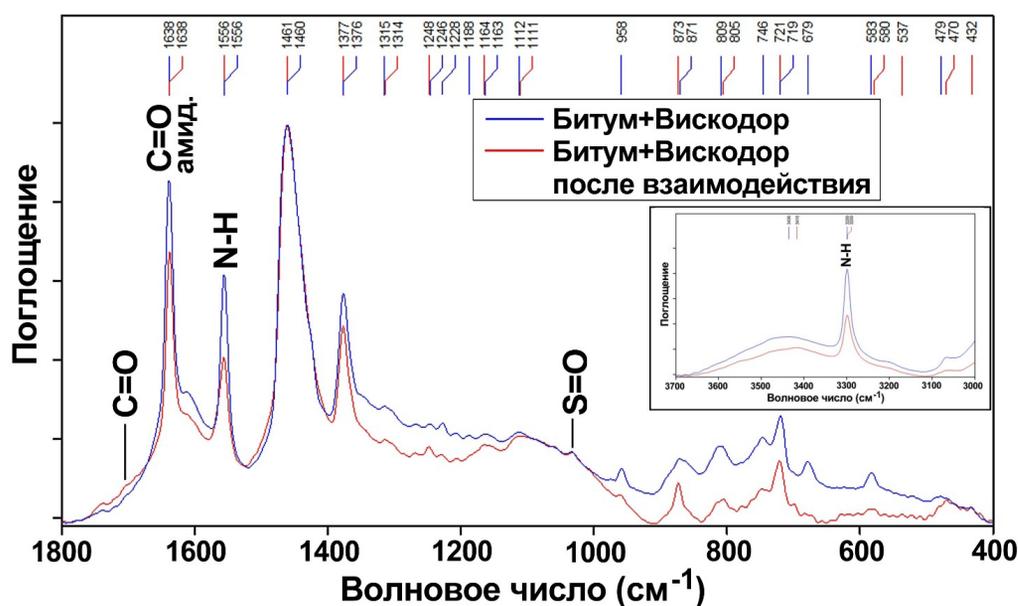


Рисунок 7 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Вискодор ПВ-2, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева  
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – FT-IR spectra of bitumen samples modified by Viskodor PV-2 before and after interaction with the surface of grains of granite screenings  
Source: compiled by the authors.

ПАВ на основе амидов жирных кислот растительных масел, входящие в состав Вискодора ПВ-2, способствуют химическому взаимодействию с активными центрами поверхности заполнителя в дополнение к физическим взаимодействиям, имеющим место на межфазной границе. Это подтверждают результаты ИК-спектроскопии – после взаимодействия интенсивности полос поглощения функциональных групп добавки (N-H (3299 и 1556 см<sup>-1</sup>) и C=O в амидах (1638 см<sup>-1</sup>) значительно снижа-

ются (рисунок 7). В целом картина очень похожа на ИК-спектры битума, модифицированного добавкой Licomont BS-100 (см. рисунок 5). Но в композиции Вискодор ПВ-2 реакционные группы входят не только в состав восков, как в Licomont BS-100, но и в состав отдельных соединений ПАВ. За счет действия ПАВ достигается хорошая адгезия с каменным материалом, значительно превосходящая все другие составы (см. таблицу, рисунок 1).

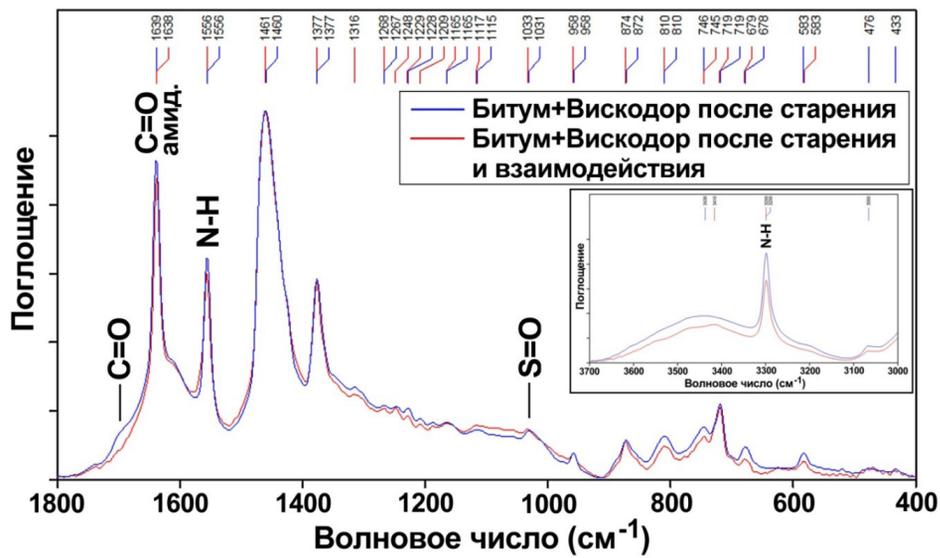


Рисунок 8 – ИК-спектры образцов состаренного битума, модифицированного Вискодор ПВ-2, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева  
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – FT-IR spectra of samples of aged bitumen modified by ViscodorPV-2 Before and after interaction with the surface of grains of granite screenings  
 Source: compiled by the authors.

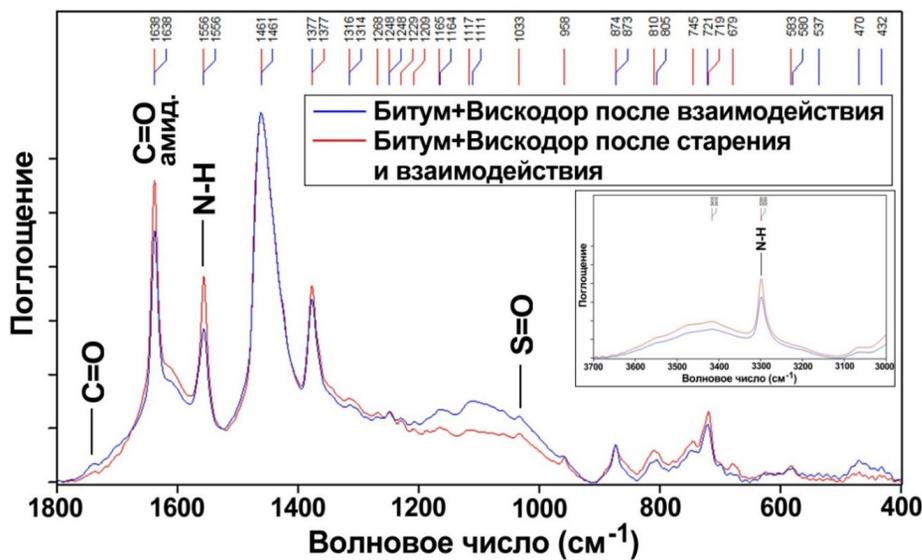


Рисунок 9 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Вискодор ПВ-2, взятого с поверхности зерен гранитного отсева до и после старения  
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with Viscodor PV-2 taken from the surface of grains of granite screenings before and after aging  
 Source: compiled by the authors.

Необходимо отметить, что наблюдаемое на ИК-спектрах уменьшение интенсивностей полос поглощения добавки 3299, 1638 и 1556  $\text{см}^{-1}$  значительно сильнее проявляет себя в несостаренном вяжущем. В состаренном битуме оно также заметно (рисунок 8). Дополнительный вклад в адгезию после старения здесь так же, как и на других составах, вносят окисленные компоненты битума, характеризующиеся полосой поглощения группы  $\text{C}=\text{O}$  ( $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$ ).

Сопоставление ИК-спектров вяжущих с добавкой Вискодор ПВ-2 после взаимодействия с поверхностью минеральных зерен показало, что после термостатирования происходит уменьшение интенсивностей полос поглощения, характеризующих и сульфоксидную ( $\text{S}=\text{O}$ ), и карбонильную ( $\text{C}=\text{O}$ ) группу самого битума (рисунок 9). При этом в области функциональных групп самой добавки все сильно меняется. После старения и последующего взаимодействия с гранитом амидных групп в битуме становится больше, чем до прогрева. Это происходит потому, что в случае несостаренного вяжущего процесс адгезии путем химического взаимодействия ПАВ на основе амидов с поверхностью гранита происходит значительно более интенсивно, чем после старения. Можно предположить, что после старения изменяется механизм адгезии при использовании добавки Вискодор ПВ-2. Адгезия частично осуществляется за счет карбонильных и сульфоксидных соединений, которых после взаимодействия в битуме становится меньше, чем до старения. Таким образом, может происходить определенное переструктурирование битума с восками и ПАВ в составе Вискодора ПВ-2 (в том числе за счет химических процессов) в результате старения, которое впоследствии сказывается на процессах взаимодействия с каменным материалом. Все это приводит к некоторому ухудшению величины адгезии по сравнению с несостаренным вяжущим (см. таблицу, рисунок 1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы выявлено, что все исследуемые восковые добавки несколько улучшают адгезионные свойства битума, но эффективность и механизм улучшения сцепления вяжущего с материалом в данных добавках различны. Так, сцепление битумного вяжущего с добавкой Sasobit возрастает до 36%, с Licomont BS-100 – до 48%, с Вискодор ПВ-2 – до 99% в сравнении с показателем сцепления битума без добавок – 21%.

Результаты ИК-спектроскопии битума, модифицированного Sasobit, до и после взаимодействия с минеральным материалом, показывают, что механизм взаимодействия с поверхностью твердых частиц носит преимущественно физический характер. Это обусловлено тем, что добавка не содержит в своем составе поверхностно-активных веществ.

При анализе ИК-спектров битума, модифицированного Licomont BS-100, до и после взаимодействия с минеральным материалом, выявлено, что механизм взаимодействия с поверхностью минерального материала обусловлен не только физическим взаимодействием, но и посредством химической абсорбции за счет присутствия в составе амидов жирных кислот, выступающих в качестве поверхностно-активных веществ, но эффект увеличения адгезии менее значимый, чем при введении добавки Вискодор ПВ-2, дополнительно содержащей в своем составе комплекс имидазолинов.

Наилучшей адгезией к минеральному материалу обладает битум, модифицированный добавкой Вискодор ПВ-2 (99% согласно оценке по весовому методу и соответствие образцу № 1 по ГОСТ 11508), благодаря наличию в его составе поверхностно-активных веществ. Усиление сцепления вяжущего с минеральным материалом за счет химической адсорбции подтверждают результаты ИК-спектроскопии – после взаимодействия интенсивности полос поглощения функциональных групп добавки ( $\text{N-H}$  (3299 и 1556  $\text{см}^{-1}$ ) и  $\text{C}=\text{O}$  в амидах (1638  $\text{см}^{-1}$ ) снижаются. После прогрева эффект усиления адгезионных свойств вяжущего с добавкой по сравнению с исходным битумом сохраняется, хотя и несколько снижается по сравнению с показателями сцепления модифицированного вяжущего до прогрева. Вискодор ПВ-2 по эффективности улучшения адгезионных свойств битума не уступает и даже значительно превосходит импортные восковые добавки Sasobit и Licomont BS-100. Из этого следует, что применение комплексной добавки Вискодор ПВ-2 в составе асфальтобетонной смеси взамен импортных добавок на основе восков в результате улучшения адгезионных свойств вяжущего позволит повысить прочность и долговечность дорожного покрытия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yadykina V.V., Akimov A. E., Trautvain A.I, Kholopov V.S. Influence of DAD-TA temperature-reducing additive on physical and mechanical

- properties of bitumen and compaction of asphalt concrete. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 327. pp. 1–5. DOI 10.1088/1757-899X/327/3/032006.
2. Kenneth A., Yaw A.T. Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review. *Open Journal of Civil Engineering*. 2016. № 6. P. 84–93. DOI:10.4236/ojce.2016.62008.
  3. Лессинч В.П., Бегей А.А. Расширение строительного сезона при устройстве асфальтобетонного покрытия за счет использования теплого асфальтобетона на основе твердых углеводов // *Вестник Луганского государственного университета им. Владимира Даля*. 2023. № 1(67). С. 101–106.
  4. Kalgin Yu.I., Alshahwan A., Panevin N.I. Structural and Mechanical Properties of Modified Hot and Warm Mix Asphalt Concrete. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023. No. 2(58). P. 71–75. DOI 10.36622/VSTU.2023.2.58.008.
  5. Алшахван А., Калгин Ю.И. Обзор технологий приготовления тёплых асфальтобетонных смесей // *Молодой ученый*. 2019. № 32(270). С. 102–107.
  6. Ядыкина В.В., Михайлова О.А. Влияние температуропонижающих добавок на основе синтетических восков на свойства битума // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023. № 3. С. 8–18. DOI 10.34031/2071-7318-2022-8-3-8-18.
  7. Смирнов Д.С., Броднева В.Е., Лобанова А.С. Анализ опыта применения теплых асфальтобетонных смесей // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. № 4(50). С. 455–461.
  8. Rezaeizadeh H.M., Valenzuela W., Rezagholilou A. New Models for the Properties of Warm Mix Asphalt with Sasobit. *CivilEng*. 2022. Vol. 3, No. 2. P. 347–364. DOI 10.3390/civileng3020021.
  9. Remisova E. Effect of additives on reducing temperature during asphalt mixtures production. 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 2017. Vol. 17. P. 123–130. DOI 10.5593/sgem2017/62/S26.016.
  10. Киндеев О.Н., Высоцкая М.А., Курлыкина А.В. Наполненные битумные композиции в строительной индустрии // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2023. Т. 50, № 1. С. 194–206. DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-1-194-206.
  11. Zhang H., Zhang H., Ding H. Thermal stress calculation of wax-based warm mix asphalt considering thermorheologically complex behavior. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 368. P. 130488. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.130488.
  12. QiuYa., Xie Q., Ding H., Xuan W. A novel method for determining the wax precipitation temperature in wax-based warm mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023. Vol. 24, No. 2. DOI 10.1080/10298436.2023.2287143.
  13. Дюрягина А.Н., Бызова Ю.С., Саликова Н.С. Изучение влияния модификаторов на процессы смачивания минеральных наполните-
  - лей гидрофобность битумных пленок // *Химический журнал Казахстана*. 2022. № 3(79). С. 28–38. DOI 10.51580/2022-3/2710-1185.77.
  14. Pstrowska K., Gunka V., Sidunlu Adhesion in Bitumen aggregate System: Adhesion Mechanism and Test Methods. *Coatings*. 2022. Vol. 12, No. 12. p. 1934. DOI 10.3390/coatings12121934.
  15. Dyuryagina A.N., Degert A.I., Lutsenko A.A., Shirina T.V. Current state of the methods for determining the adhesive and cohesive properties of road bitumen // *Химический журнал Казахстана*. 2023. No. 4(84). pp. 101–117. DOI 10.51580/2023-4.2710-1185.44.
  16. Peng Ch., Yang H., You Zh. Investigation of Adhesion Performance of Wax Based Warm Mix Asphalt with Molecular Dynamics Simulation. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 17. P. 5930. DOI 10.3390/ma15175930.
  17. Пыриг Я.И., Галкин А.В. Сравнительная оценка влияния энергосберегающих добавок на свойства битума // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2020. № 90. С. 114–124. DOI 10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.114.
  18. Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю., Обухов А.Г., Есипова Ю.Ю. Устойчивость модифицированных вяжущих на основе окисленных и остаточных битумов к термодеструкции // *Вестник СибАДИ*. 2017; 6(58): 140–147. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-140-147](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-140-147)
  19. Шестаков Н.И., Хохлова Н.В., Приходько А.Ю. Влияние термостабилизирующих добавок на адгезионные свойства битумов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 2(782). С. 52–62. DOI 10.32683/0536-1052-2024-782-2-52-62.
  20. Ядыкина В.В., Холопов В.С., Михайлова О.А. Изменение свойств битума, модифицированного температуропонижающими добавками // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2022. № 3(155). С. 100–104.
  21. Silva H.M.R.D., Oliveira, J.R.M. Peralta J., Zoorob S.E. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Construction and Building Materials*. 2010. № 9. Pp. 1621–1631. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.030
  22. Sigwarth T., Büchner J., Wistuba M. P. Bio-Degradable Wax to Modify Asphalt Binder for Warm Mix Asphalt. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 16. P. 10219. DOI 10.3390/su141610219.
  23. Jamshidi A., Hamza M.O., You Z. Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit: State-of-the-art. *Construction and Building Materials*. 2013. № 38. Pp. 530–553. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.015.
  24. Zhao G. Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt. 2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials. 2012. № 16. Pp. 1230–1236. DOI:10.1016/j.egypro.2012.01.196.
  25. Tong B., Song, X., Shen, J., Jiang, T., Chen, J., Niu, J. Effect of Sasobit warm mix on micro properties of asphalt with different degrees of regeneration // *Frontiers in Materials*. 2022. № 9. DOI 10.3389/fmats.2022.950550.

26. Weigel S., Stephan D., The prediction of bitumen properties based on FTIR and multivariate analysis methods// *Fuel*. 2017. Vol. 208. Pp. 655–661. DOI 10.1016/j.fuel.2017.07.048.

27. Yue M., Yue J., Wang R., Xiong Y. Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit and polymers using linear amplitude sweep test// *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 289. P. 123054. DOI 10.1016/j.conbuildmat. 123054.

28. Шарафиева Р.Р., Умарова Н.Н., Сопин В.Ф. Применение методов ИК-спектроскопии и хемометрики в анализе имидазолинов// *Вестник Технологического университета*. 2023. Т. 26, № 6. С. 62–65. DOI 10.55421/1998-7072 2023 26 6 62.

29. Аюпов Л.И., Потапова Р.И., Казакулов Д.А., Хакимуллин Ю. Н. Исследование составов дорожных поверхностно-активных веществ // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 3(45). С. 178–188.

## REFERENCES

1. Yadykina V.V., Akimov A.E., Trautvain A.I., Kholopov V.S. Influence of DAD-TA temperature-reducing additive on physical and mechanical properties of bitumen and compaction of asphalt concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327: 1–5. DOI 10.1088/1757-899X/327/3/032006.

2. Kenneth A., Yaw A.T. Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review. *Open Journal of Civil Engineering*. 2016; 6: 84–93. DOI:10.4236/ojce.2016.62008.

3. Lessinch V.P., Begey A.A. Expansion of the construction season in the construction of asphalt concrete pavement due to the use of warm asphalt concrete based on solid hydrocarbons. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalja*. 2023; 1(67): 101–106. (In Russ.)

4. Kalgin Yu.I., Alshahwan A., Panevin N.I. Structural and Mechanical Properties of Modified Hot and Warm Mix Asphalt Concrete. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 2(58): 71–75. DOI 10.36622/VSTU.2023.2.58.008.

5. Alshakhvan A., Kalgin Yu.I. Review of technologies for the preparation of warm asphalt concrete mixtures. *Molodojuchenyj*. 2019; 32(270): 102–107. (In Russ.)

6. Yadykina V.V. Mikhailova O.A. The effect of temperature-reducing additives based on synthetic waxes on the properties of bitumen. *Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*. 2023; 3: 8–18. DOI 10.34031/2071-7318-2022-8-3-8-18. (In Russ.)

7. Smirnov D.S. Brodneva V.E., Lobanova A.S. Analysis of application experience of warm asphalt mixes. *News of the KSUAE*. 2019; 4(50): 455–461. (In Russ.)

8. Rezaeizadeh H.M., Valenzuela W., Rezagholilou A. New Models for the Properties of Warm Mix Asphalt with Sasobit. *CivilEng*. 2022; Vol. 3, No. 2: 347–364. DOI 10.3390/civileng3020021.

9. Remisova E. Effect of additives on reducing temperature during asphalt mixtures production. *17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017*, Albena, Bulgaria. 2017; 17: 123–130. DOI 10.5593/sgem2017/62/S26.016.

10. Kindeev O.N., Vysotskaya M.A., Kurykina A.V. Filled bituminous compositions in the construction industry. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023; 50(1): 194–206. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2023-50-1-194-206>

11. Zhang H., Zhang H., Ding H. Thermal stress calculation of wax-based warm mix asphalt considering thermorheologically complex behavior. *Construction and Building Materials*. 2023; 368: 130488. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.130488.

12. Qiu Ya., Xie Q., Ding H., Xuan W. A novel method for determining the wax precipitation temperature in wax-based warm mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; Vol. 24, No. 2. DOI 10.1080/10298436.2023.2287143.

13. Dyuryagina A.N., Byzova Yu.S., Salikova N.S., Ostrovnoy K.A., Gorshkova T.A., Savel'yeva P.O. Study of the influence of modifiers on the processes of wetting mineral fillers and hydrophobicity of bitumen films. *Chem. J. Kaz.* 2022, 3(79), 28–38. DOI: <https://doi.org/10.51580/2022-3/2710-1185.77>

14. Pstrowska K., Gunka V., Sidunlu Adhesion in Bitumen aggregate System: Adhesion Mechanism and Test Methods. *Coatings*. 2022; Vol. 12, No. 12: 1934. DOI 10.3390/coatings12121934.

15. Dyuryagina A.N., Degert A.I., Lutsenko A.A., Shirina T.V. Current state of the methods for determining the adhesive and cohesive properties of road bitumen. *Chemical Journal of Kazakhstan*. 2023; 4(84): 101–117. DOI 10.51580/2023-4.2710-1185.44.

16. Peng Ch., Yang H., You Zh. Investigation of Adhesion Performance of Wax Based Warm Mix Asphalt with Molecular Dynamics Simulation. *Materials*. 2022; Vol. 15, No. 17: 5930. DOI 10.3390/ma15175930.

17. Pyrig Ya.I., Galkin A.V. Comparative assessment of the effect of energy-saving additives on bitumen properties. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*. 2020; 90: 114–124. (In Russ.) DOI 10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.114.

18. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Obukhov A.G., Esipova J.Yu. Stability of modified binders on basis of oxidized and residual bitumens to thermodestructions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 6(58): 140–147. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-140-147](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-140-147)

19. Shestakov N.I., Khokhlova N.V., Prikhodko A.Yu. The effect of heat-stabilizing additives on the adhesive properties of bitumen. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; (2): 52–62. (In Russ.) DOI: 10.32683/0536-1052-2024-782-2-52-62.

20. Yadykina V.V. Kholopov V.S. Mikhailova O.A. Changing the properties of bitumen modified with tem-

perature&reducing additives. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2022; 3(155): 100–104. (In Russ.)

21. Silva H.M.R.D., Oliveira, J.R.M. Peralta J., Zoorob S.E. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Construction and Building Materials*. 2010; 9: 1621–1631. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.030

22. Sigwarth T., Büchner J., Wistuba M. P. Bio-Degradable Wax to Modify Asphalt Binder for Warm Mix Asphalt. *Sustainability*. 2022; 14, No. 16: 10219. DOI 10.3390/su141610219.

23. Jamshidi A., Hamza M.O., You Z. Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit: State-of-the-art. *Construction and Building Materials*. 2013; 38: 530–553. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.015.

24. Zhao G. Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt. *2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials*. 2012; 16: 1230–1236. DOI:10.1016/j.egypro.2012.01.196.

25. Tong B., Song, X., Shen, J., Jiang, T., Chen, J., Niu, J. Effect of Sasobit warm mix on micro properties of asphalt with different degrees of regeneration. *Frontiers in Materials*. 2022; 9. DOI 10.3389/fmats.2022.950550.

26. Weigel S., Stephan D., The prediction of bitumen properties based on FTIR and multivariate analysis methods. *Fuel*. 2017; 208: 655–661. DOI 10.1016/j.fuel.2017.07.048.

27. Yue M., Yue J., Wang R., Xiong Y. Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit and polymers using linear amplitude sweep test. *Construction and Building Materials*. 2021; 289. P: 123054. DOI 10.1016/j.conbuildmat. 123054.

28. Sharafieva R.R., Umarova N.N., Sopin V.F. Application of ir spectroscopy and chemometrics in the analysis of imidazolines. *Herald of technological university*. 2023; Vol. 26, No. 6: 62–65. (In Russ.) DOI 10.55421/1998-7072 2023 26 6 62.

29. Ayupov L.I., Potapova R.I., Kazakulov D.A., Khakimullin Yu.N. Road surfactants composition investigation. *News of the KSUAE*. 2018; 3(45): 178–188. (In Russ.)

### ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

*Ядыкина В.В. Постановка цели и задачи исследования, разработка алгоритма методики проведения исследования, научное сопровождение при подготовке статьи, доработка и корректировка выводов.*

*Михайлова О.А. Описание материалов и методов проведения исследования, обзор литературы. Выполнение эксперимента по оценке адгезионных свойств образцов, обработка результатов исследования, подготовка и оформление статьи.*

*Лебедев М.С. Проведение спектрального анализа образцов, обработка и оформление резуль-*

*татов исследования, анализ и интерпретация данных.*

*Фомина Е.В. Консультирование по вопросам проведения экспериментов и написанию статьи.*

### COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Yadykina V.V. Statement of the purpose and objectives of the study; development of an algorithm for the methodology of the study, scientific support in the preparation of the article, revision and correction of conclusions.*

*Mikhailova O.A. Description of the materials and methods of the study; review of the literature, conducting an experiment to assess the adhesive properties of samples. Processing of research results, preparation and formatting of the article.*

*Lebedev M.S. Spectral analysis of samples, processing and registration of research results, analysis and interpretation of data.*

*Fomina E.V. Consulting on experiments and writing the article.*

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ядыкина Валентина Васильевна – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автомобильные и железные дороги» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8289-2361>,

**SPIN-код:** 2468-5657,

**e-mail:** [vvya@intbel.ru](mailto:vvya@intbel.ru)

*Михайлова Ольга Анатольевна – аспирант кафедры «Автомобильные и железные дороги» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-5896-5524>,

**SPIN-код:** 1581-1030,

**e-mail:** [mihaylovalymar@mail.ru](mailto:mihaylovalymar@mail.ru)

*Лебедев Михаил Сергеевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-образовательного центра «Аддитивные технологии» Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, г. Томск, пр-т Ленина, д. 36).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3194-9238>,

**SPIN-код:** 7102-9514,

**e-mail:** [michaell1987@yandex.ru](mailto:michaell1987@yandex.ru)

*Фомина Екатерина Викторовна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительные материалы и конструкции» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0542-0963>,

**SPIN-код:** 5270-6285,

**e-mail:** [fomina.katerina@mail.ru](mailto:fomina.katerina@mail.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Yadykina Valentina V. – Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Department of Roads and Railways of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8289-2361>,

**SPIN-code:** 2468-5657,

**e-mail:** [vvya@intbel.ru](mailto:vvya@intbel.ru)

*Mikhailova Olga A. – postgraduate student at the Department of Roads and Railways of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-5896-5524>,

**SPIN-code:** 1581-1030,

**e-mail:** [mihaylovalymar@mail.ru](mailto:mihaylovalymar@mail.ru)

*Lebedev Mikhail S. – Cand. of Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Scientific and Educational Center “Additive Technologies”, National Research Tomsk State University (634050, Tomsk, Lenin Ave., 36).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3194-9238>,

**SPIN-code:** 7102-9514,

**e-mail:** [michaell1987@yandex.ru](mailto:michaell1987@yandex.ru)

*Fomina Ekaterina V. – Cand. of Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Department of Building Materials and Structures of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0542-0963>,

**SPIN-code:** 5270-6285,

**e-mail:** [fomina.katerina@mail.ru](mailto:fomina.katerina@mail.ru)