

Научная статья
УДК 625.85.06
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>
EDN: RSHWAO



ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО К ТЕРМИЧЕСКИМ ДЕФОРМАЦИЯМ

М.А. Высоцкая¹, В.С. Лесовик¹, Я.М. Катрич¹, Д.Ю. Егоров²

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
2000 «ИНФРАТЕСТ»,
г. Санкт-Петербург, Россия
✉ ответственный автор
roruri@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Комплексное воздействие динамических нагрузок, климатических факторов, агрессивных сред является драйвером преждевременного деформирования асфальтобетонных покрытий. Основными типами разрушений являются: пластические деформации в виде колеи, возникающие при высоких положительных температурах; усталостные трещины в покрытии, образующиеся от действия многократных повторяющихся нагрузок; низкотемпературные поперечные трещины, возникающие в области отрицательных температур при охлаждении покрытия. По современным представлениям, вклад вяжущего в образование обозначенных дефектов достигает до 90–100%. Однако битум утрачивает свои оригинальные свойства, вступая во взаимодействие с минеральным порошком и формируя асфальтовяжущее, которое выполняет роль связующего в асфальтобетоне. Поэтому прогнозирование поведения асфальтобетонов в широком диапазоне температур и особенно в отрицательной его части целесообразно выполнять, опираясь не на битумное вяжущее, а на асфальтовяжущее.

Материалы и методы. Экспериментальные лабораторные исследования материалов выполнены в соответствии с ГОСТ 33133–2014, ГОСТ Р 58400.1–2019, ГОСТ 32761–2014, ГОСТ 58401.1–2019, ГОСТ Р 58400.8–2019, ГОСТ Р 58400.11–2019. В роли объектов исследования выступал битум, наполненный минеральными порошками из известняка и пыли электрофильтров асфальтобетонного завода.

Результаты. Обнаружены значительные изменения свойств исходного битума под влиянием различной степени наполнения минеральным порошком из известняка и пыли электрофильтров. Показано, что наполнение вяжущего минеральным порошком (пылью) в максимально допустимом концентрационном пределе изменяет параметр марки PG (X) на три позиции с 64 °C до 82 °C. Кардинальные данные получены для низкотемпературной устойчивости образцов с обрушением параметра ($\pm Y$) с величины -34 °C до -22 °C. Выявляя параметры, отвечающие за низкотемпературное растрескивание системы на уровне асфальтовяжущего, возможно масштабировать знания и на асфальтобетоны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: битумное вяжущее, PG марка, минеральный порошок, асфальтовяжущее, BBR-тест, ABCD-тест, DSR-тест

Статья поступила в редакцию 02.05.2024; одобрена после рецензирования 22.07.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Высоцкая М.А., Лесовик В.С., Катрич Я.М., Егоров Д.Ю. Влияние минеральных порошков на устойчивость битумного вяжущего к термическим деформациям // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 770–785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>

© Высоцкая М.А., Лесовик В.С., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>

EDN: RSHWAO

THE INFLUENCE OF MINERAL POWDERS ON THE RESISTANCE OF BITUMEN BINDER TO THERMAL DEFORMATIONS

Marina A.I. Vysotskaya¹, Valeriy S. Lesovik¹, Yaroslav M. Katrich¹, Dmitriy Y. Egorov²

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

²Limited liability company "INFRATEST",
St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author
roruri@rambler.ru

ABSTRACT

Introduction. The complex influence of dynamic loads, climatic factors, and aggressive environments is the driver of premature deformation of asphalt concrete pavements. The main types of failure are: plastic rutting deformations occurring at high temperatures above zero; fatigue cracks in the pavement caused by repeated loads; low-temperature transverse cracks occurring in the area with temperatures below zero while pavement cooling. According to modern concepts, the contribution of the binder to the formation of the described defects reaches 90–100%. However, bitumen loses its original properties, interacting with mineral powder and forming an asphalt binder, which acts as a binder in asphalt concrete. Therefore, it is advisable to predict the behavior of asphalt concrete in a wide range of temperatures, and especially in low-temperature part, relying not on the bitumen binder, but on the asphalt binder.

Materials and methods. Experimental laboratory studies of materials were carried out in accordance with GOST 33133–2014, GOST R 58400.1–2019, GOST 32761–2014, GOST 58401.1–2019, GOST R 58400.8–2019, GOST R 58400.11–2019. The objects of study were bitumen filled with mineral powders from limestone and dust from electric filters of an asphalt concrete plant.

Results. Significant changes in the properties of the original bitumen were revealed under the influence of varying degrees of filling with mineral powder from limestone and dust from electric filters. It was shown that filling the binder with mineral powder (dust) in the maximum permissible concentration limit changes the PG (X) brand parameter by three positions from 64 °C to 82 °C. More fundamental data were obtained for the low-temperature stability of samples with a collapse of the parameter ($\pm Y$) from -34 °C to -22 °C. By identifying the parameters responsible for low-temperature cracking of the system at the binder level of asphalt, it is possible to scale the knowledge to asphalt concretes.

KEYWORDS: bitumen binder, PG grade, mineral powder, asphalt binder, BBR-test, ABCD-test, DSR-test

The article was submitted 02.05.2024; approved after reviewing 22.07.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

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. Vysotskaya M.A., Lesovik V.S., Katrich Ya.M., Egorov D.Yu. The influence of mineral powders on the resistance of bitumen binder to thermal deformations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 770-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>

© Vysotskaya M.A., Lesovik V.S., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

За последний десяток лет дорожно-строительная и сопутствующие ей отрасли совершили стремительный качественный рывок. Синергия поступательного движения отраслей дала удивительный результат в части формирования обновленной нормативной базы по оценке качества и долговечности дорожных материалов и композитов, что, в свою очередь, подтянуло качество, расширило номенклатуру производимой продукции и в целом изменило подход к производству битумных вяжущих и щебня для асфальтобетонных смесей.

Тем не менее комплексное воздействие динамических нагрузок, климатических факторов, агрессивных сред при возможном низком качестве сырьевых материалов все также является драйвером преждевременного деформирования асфальтобетонных покрытий. К основным типам их разрушения в последнее время принято относить: пластические деформации в виде колеи, возникающие при высоких положительных температурах; усталостные трещины в покрытии, образующиеся от действия многократных повторяющихся нагрузок, в основном весной и осенью при переувлажненном земляном полотне; низкотемпературные поперечные трещины, возникающие в области отрицательных температур при охлаждении покрытия.

По современным представлениям вклад вяжущего в образование обозначенных дефектов достаточно весом, а в ряде случаев достигает 90–100% [1, 2, 3]. Так, решающую роль вид и качество битумного вяжущего играют в коррозионной стойкости асфальтобетонных. Актуальным исследовательским трендом является анализ вяжущих для возможности прогнозирования поведения асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог при низких (отрицательных) температурах. Подобный интерес обусловлен тем, что вклад вяжущего в образование низкотемпературных трещин доходит до 90% [1, 4, 5].

Практика показывает, что образование низкотемпературных трещин на асфальтобетонном покрытии возможно даже в отсутствии нагрузки от подвижного состава. Истоком таких негативных явлений могут служить усадочные и растягивающие напряжения, возникающие вследствие значительного однократного понижения температуры окружающего воздуха.

Решение обозначенной проблемы в настоящее время осуществляется посредством прогнозирования поведения битумных вяжущих, используемых в дорожных композитах,

под действием низких температур. К числу методов низкотемпературного тестирования относятся: определение температуры хрупкости битума на приборе Фрааса [6], оценка температуры стеклования [7], BBR-тест [4], DSR-тест с использованием для испытаний пластин диаметром 4 мм [4, 8] и ABCD-тест [9, 10, 11].

Необходимо отметить, что с переходом на метод объемно-функционального проектирования асфальтобетона, подразумевающий использование битумного вяжущего по PG, где нижняя граница марки демонстрирует фактическую работоспособность при отрицательной температуре и должна обеспечивать низкотемпературную трещиностойкость всего композита, была надежда, что этот вид дефектов на покрытии останется в отраслевой истории. Однако зарубежный опыт [4, 5] свидетельствует, что после разработки спецификаций на битумные вяжущие и запуска системы Superpave в промышленную эксплуатацию проблема разрушений поверхности покрытий автомобильных дорог, вызванных термическим растрескиванием асфальтобетона, не была решена. В 2017 г. было зафиксировано, что тридцать из тридцати шести ответивших агентств США сообщили о преждевременных разрушениях поверхности асфальтобетонного покрытия в виде расслоения (эрозии) или растрескивания.

Российские ученые-практики [1, 3, 12] также неоднократно заявляли о несоответствии трещиностойкости битумного вяжущего реальному поведению асфальтобетона при низких температурах.

На наш взгляд, проблема кроется не в битуме или асфальтобетоне, а в методологии оценки трещиностойкости структурных систем асфальтобетона. В соответствии с классической теорией структуры асфальтобетона он складывается тремя структурами: макро, мезо и микро. Таким образом, асфальтобетон является высоконаполненной полидисперсной системой [13] (рисунок 1), где каждая из структур проявляет максимум своего влияния в восприимчивости асфальтобетона к различным климатическим и деформативным воздействиям.

Остановимся подробнее на микроструктуре смеси, состоящей из минерального порошка и битума. Технологичность и специфика свойств битума определили весьма широкий круг сфер его использования. Однако ввиду особенностей рецептур изделий битум практически всегда утрачивает свои оригинальные свойства, вступая во взаимодействие с другими компонентами [14, 15, 16].

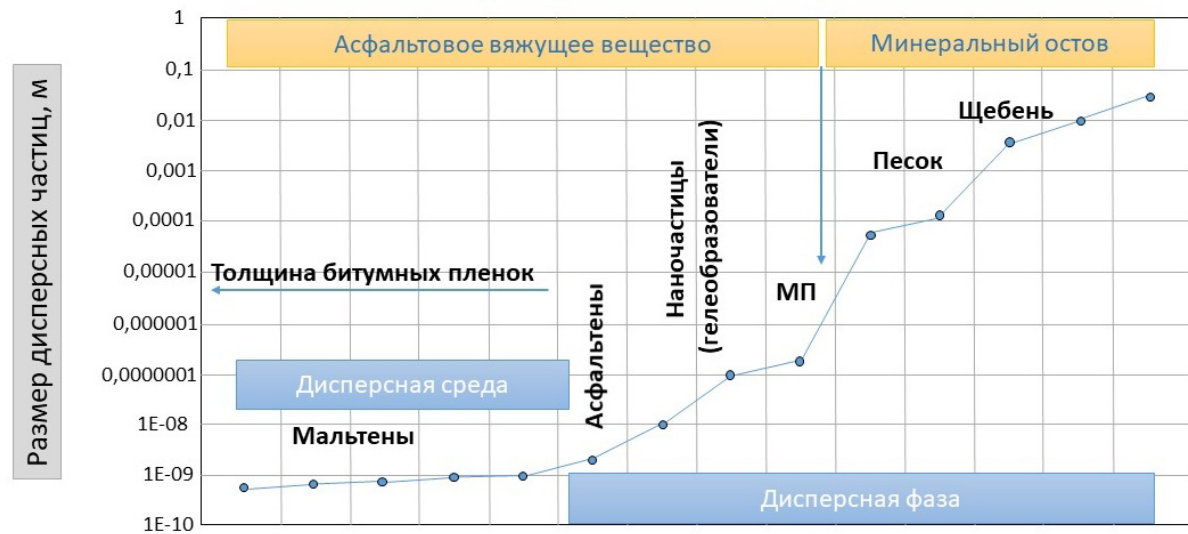


Рисунок 1 – Полидисперсность состава асфальтобетона [13]

Figure 1 – Polydispersity of asphalt concrete composition [13]

В составе асфальтобетонных смесей, сочетающихся с дисперсной составляющей смеси – минеральным порошком, образует асфальтовяжущее вещество (АВВ), которое кардинально отличается от битума и выступает в качестве связующего компонента в асфальтобетоне. При этом именно АВВ в основном определяет восприимчивость асфальтобетона к температурам как высоким положительным, так и низким отрицательным. В то время как минеральный каркас рассеивает и перераспределяет внутренние напряжения в композите на различных масштабных уровнях.

Таким образом, прогнозирование поведения асфальтобетонов в широком диапазоне температур и особенно в отрицательной его части, целесообразно выполнять, опираясь не на битумное вяжущее, а на асфальтовяжущее. По нашему мнению, такой подход будет способствовать получению адекватного результата, соответствующего фактическим температурным способностям работы асфальтобетона в покрытии.

Цель представленной работы – оценить динамику изменения свойств битума под влиянием

различной степени наполнения минеральным порошком из известняка и пыли. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: изучить показатели свойств базового битума в соответствии с методологией PG; изготовить композиции АВВ с различной степенью наполнения и оценить показатели их свойств, в том числе по PG; выполнить тестирование низкотемпературных параметров базового битума и АВВ по методикам BBR и ABCD; проанализировать влияние минеральных порошков кислой и основной природы, а также их концентрации на свойства формирующегося АВВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании в качестве базового вяжущего рассматривался битум из специализированной линейки нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) по спецификации ГОСТ 33133–2014¹, соответствующий марке БНД 70/100. Тестирование по ГОСТ Р 58400.1–2019² соотносит вяжущее с PG64-34. Температура размягчения битума 48 °С.

¹ ГОСТ 33133–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2015. 7 с.

² ГОСТ Р 58400.1–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом температурного диапазона эксплуатации. М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.

Таблица 1
Показатели свойств минеральных порошков
Источник: составлено авторами.

Table 1
Properties' indicators of mineral powders
Source: compiled by the authors.

Показатели	Известняк		Пыль электрофильтров	
	Фактические значения	Требования ГОСТ		Фактические значения
		МП-2	МП-3	
Зерновой состав, % по массе, - мельче 2 мм; -мельче 0,125 мм; - мельче 0,063 мм	100 93,8 91,5	100 не менее 85 не менее 70	100 не менее 75 не менее 60	100 91,9 90,7
Истинная плотность, кг/м ³	2650	-	-	2781
Средняя плотность, кг/м ³	1950	-	-	2064
Пористость, %	32	не более 35	не более 40	27,8
Битумоемкость, г	55,3	не более 65	не более 80	54,7
Набухание образцов из смеси МП с битумом, %	2,1	не более 2,5	не более 3,0	2,3
Удельная поверхность, кг/м ²	2285	-	-	2300

В таблице 1 приведены сведения о минеральных порошках (МП), используемых в отрасли для приготовления асфальтобетонных смесей из молотого известняка, относящегося к карбонатной (основной) породе и пыли электрофильтров асфальтобетонных заводов, где главным породообразующим минералом является кварц (SiO₂) – кислая порода. Тестирование минеральных порошков выполнялось по стандартным методикам, изложенным в ГОСТ 32761–2014³.

В исследовании битумная матрица объединялась с минеральными порошками для приготовления асфальтовязующего вещества (АВВ) с различной степенью наполнения. В исследовании использовались МП с максимально близкой удельной поверхностью (см. таблицу 1). Удельная поверхность тонкодисперсных порошков измерялась на приборе РСХ-10АК.

В соответствии с положением системы

объемно-функционального проектирования, изложенным в ГОСТ 58401.1–2019⁴, при проектировании составов асфальтобетонных смесей, в зависимости от условий движения транспортных средств и размера номинального максимального зерна заполнителя, нормируется величина Н – отношение пыль/вяжущее. В соответствии с нормативным документом, Н – соотношение между эффективным количеством битумного вяжущего в смеси и содержанием в ней дисперсной минеральной части, прошедшей через сито 0,063 мм.

В исследовании отношение пыль/вяжущее принималось от 0,8 до 1,6 с шагом в 0,2. Таким образом, битумная матрица наполнялась дисперсным МП в следующем соотношении (таблица 2). В таблице 2 представлены рецепты приготавливаемых АВВ с присвоением индекса для удобства чтения и анализа графической части.

³ ГОСТ 32761–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования. М.: ФГУП Стандартинформ, 2014. 10 с.

⁴ ГОСТ 58401.1–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.

Таблица 2

Составы исследуемых АБВ

Источник: составлено авторами.

Table 2

Compositions of the studied ABB

Source: compiled by the authors.

Рецептура АБВ (отношение МП/битум), части	Вид минерального порошка	
	известняк	пыль электрофильтров
	индекс состава АБВ	
0,8 : 1	1.1	2.1
1,0 : 1	1.2	2.2
1,2 : 1	1.3	2.3
1,4 : 1	1.4	2.4
1,6 : 1	1.5	2.5

Для изготовления образцов АБВ битумное вяжущее нагревалось до температуры 140 °С. В разогретый битум, при постоянном перемешивании, вносилась навеска минерального порошка. Для обеспечения идентичности термальной истории образцов, перемешивание осуществлялось верхнеприводной лопастной мешалкой ИКА в течение 10 мин, после чего готовые образцы термостатировались в сушильном шкафу еще 15 мин. Подобные технологические операции были выполнены и для контрольной серии битума. Образцы АБВ разной степени структурированности тестировали для оценки динамики изменения температуры размягчения по КиШ.

Оставшаяся часть образцов была разделена для оценки влияния вида минерального порошка и степени наполнения им битумной матрицы. Динамику структурных изменений оценивали посредством испытаний балок из АБВ на изгиб (BBR), (рисунок 2); образцов, разрушенных с использованием «Устройства растрескивания битумного вяжущего» (ABCD), (рисунки 3 и 4), а также сдвиговой устойчивости (DSR), (рисунок 5). Исследования выполнялись в соответствии с ГОСТ Р 58400.10⁵, ГОСТ Р 58400.8⁶ и ГОСТ Р 58400.11⁷. Эта часть

образцов подвергалась повторному разогреву для обеспечения технологичности работы со смесью для формирования образцов правильной геометрической формы в виде балки (BBR) и кольца (ABCD).

Перед началом процедуры испытания для образца исходного битума оценивали температуру, при которой его динамическая вязкость находилась в диапазоне (0.28 ± 0.03) Па • с, для наполненных битумных систем температура изготовления всех образцов составляла (165 ± 3) °С. Образцы АБВ для уменьшения седиментационного эффекта от оседания частиц МП подвергались резкому охлаждению.

Суть испытаний на BBR заключалась в тестировании образцов битума и АБВ при низкой температуре для определения их способности сопротивляться сосредоточенной статической нагрузке. Температура испытания обеспечивалась замораживанием образцов при установленной температуре в соответствии с функциональным типом вяжущего. После каждого периода кондиционирования проверялась твердость образцов битума или АБВ в реометре с изгибающейся балкой. В процессе тестирования фиксировалась жесткость и скорость изменения жесткости.

⁵ ГОСТ Р 58400.10–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения свойств с использованием динамического сдвигового реометра (DSR). М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.

⁶ ГОСТ Р 58400.8–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения жесткости и ползучести битума при отрицательных температурах с помощью реометра, изгибающего балочку (BBR). М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

⁷ ГОСТ Р 58400.11–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения температуры растрескивания при помощи устройства ABCD. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

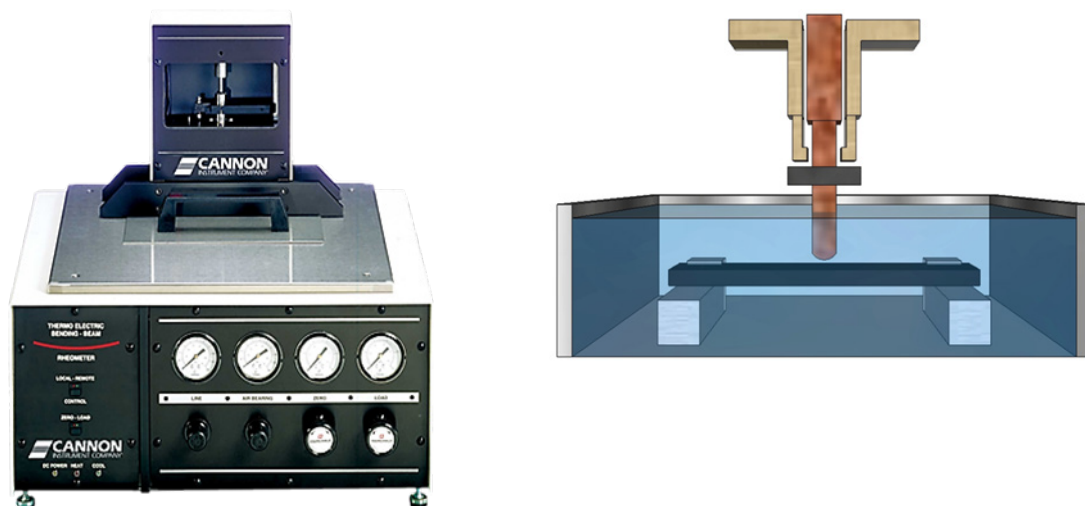


Рисунок 2 – Общий вид образца балки из АБВ и принципа тестирования на ВВР
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – General view of a beam sample made from ABB and the principle of BBR testing
Source: compiled by the authors.

В соответствии с методикой оценки марки битумного вяжущего по PG для испытаний на реометре с изгибающейся балкой (BBR) и определения температуры растрескивания битумного вяжущего (ABCD) используют системы, состаренные методом RTFOT (технологическое старение) и PAV (старение в процессе эксплуатации). В виду того, что битум при технологических температурах объединялся и перемешивался с различным минеральным порошком, старением RTFOT пренебрегли, так как в процессе перемешивания происходило технологическое старение.

Испытание выполнялось при пяти температурах: -10, -16, -22, -28, -34 °С. Время термостатирования образцов составляло 60 мин.

Испытание ABCD проводилось в соответствии с ГОСТ Р 58400.8⁸⁷, со скоростью охлаждения 20 °С/час. Опыт постановки эксперимента показал, что в ряде случаев при тестировании наполненных систем целесообразно рассматривать более высокие скорости охлаждения для уменьшения сегрегации наполненной системы в виду седиментации частиц МП. Инварное кольцо прибора обеспечивает удержание вяжущего в период, когда кольцо из АБВ охлаждается и сжимается

(усаживается). Образец разрушается вокруг выступа из-за более высоких концентраций напряжений, возникающих в этой области во время охлаждения. Схематично образцы до и после тестирования представлены на рисунке 3. Очевидно, что в наполненных системах усадка и концентрация напряжений при охлаждении будут протекать иначе. Температура растрескивания T_{ABCD} определяется как температура, при которой образец разрушается при заданной скорости охлаждения.

Итогом тестирования является комплекс данных: температура растрескивания T_{ABCD} , скачок деформаций и напряжение разрушения. Формат получаемых данных в режиме тестирования представлен на рисунке 4.

Посредством тестирования битумных вяжущих на BBR или ABCD определяется низкотемпературная составляющая марки PG ($\pm Y$). Оценка верхнего параметра (X), соответствующего максимальной температуре дорожного покрытия, которую будет способно воспринять используемое в составе вяжущее без потери работоспособности, выполняется на реометре динамического сдвига (DSR) AntonPaar MCR 302 с диаметром испытательной плиты 25 мм.

⁸⁷ ГОСТ Р 58400.11–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения температуры растрескивания при помощи устройства ABCD. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

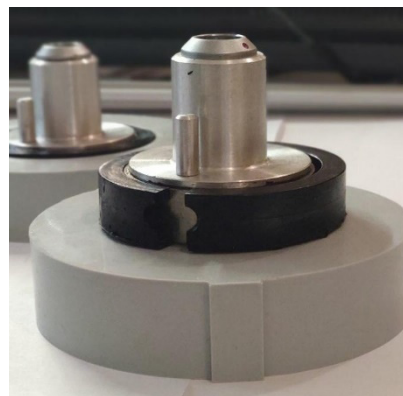


Рисунок 3 – Общий вид образца кольца из АВВ и принципа тестирования ABCD
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – General view of ABB ring sample and ABCD testing principle
Source: compiled by the authors.

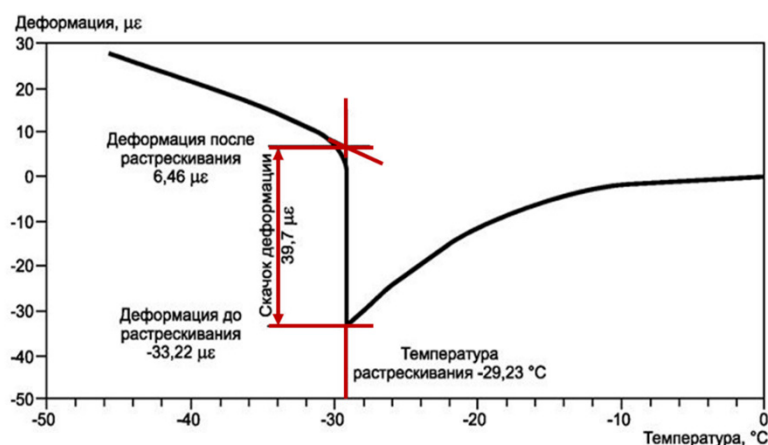


Рисунок 4 – Формат отображения данных при тестировании на ABCD
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Data display format for testing on ABCD
Source: compiled by the authors.

Сущность метода заключается в оценке сдвиговой устойчивости битумного вяжущего или АВВ путем осцилляционной сдвиговой деформации образца и определении значений комплексного модуля сдвига и фазового угла. Для этого подвижные битумные системы с запасом заливали в силиконовую форму так, чтобы обеспечить обрезку готового образца. При тестировании применялась испытательная система с диаметром плит 25 мм. Время термостатирования образцов при начальной температуре испытаний составляло 60 мин. Исследование выполнялось с использованием нескольких температурных режимов на одном образце битума или АВВ. Фиксировались фазовые углы δ и комплексные модули сдвига

систем G^* . Испытание выполнялось при четырех температурах.

Посредством оценки изменения параметров ($X \pm Y$) базового битума в процессе его наполнения МП выявляли динамику изменения его свойств при переходе в асфальтовяжущее.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось выше, в структуре асфальтобетона АВВ определяет восприимчивость асфальтобетона к температурам. Данные, представленные на рисунке 5, демонстрируют логичную зависимость: увеличение концентрации МП в битумной матрице формирует теплоустойчивую структуру асфальтовяжущего.

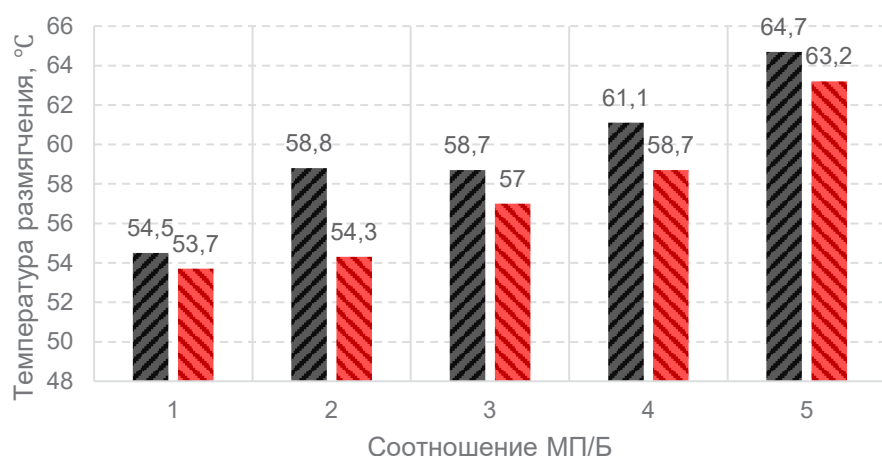


Рисунок 5 – Влияние вида и концентрации МП на температуру размягчения битума
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Influence of the type and concentration of mineral powders (MP) on the softening temperature of bitumen
Source: compiled by the authors.

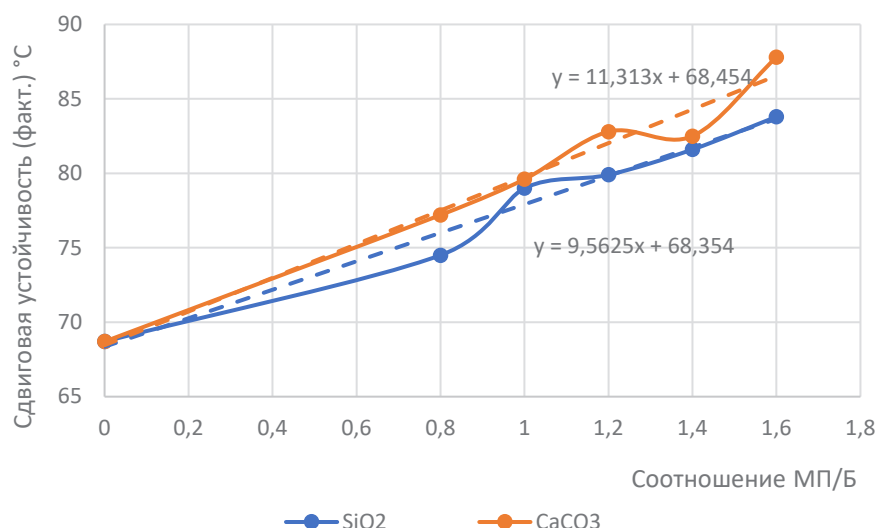


Рисунок 6 – Динамика изменения сдвиговой устойчивости битума под влиянием МП
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dynamics of changes in the shear stability of bitumen under the influence of mineral powders (MP)
Source: compiled by the authors.

Как видно, введение в битум, с температурой размягчения 48 °С, минерального порошка способствует увеличению этого показателя. Другими словами, наблюдается прямая зависимость между степенью наполнения битумной матрицы минеральным порошком и ее теплоустойчивостью. Вполне обоснована и вторая зависимость: системы, наполненные минеральным порошком из известняка

(CaCO₃) отличаются от параллели, наполненной пылью электрофильтров (SiO₂), более высокими значениями температуры размягчения. Так, прирост температуры размягчения составов АВБ с индексом 1.5 и 2.5 составил 34,8 и 31,7% соответственно.

Однако знаковой позицией системы Superpave [17,18, 19], в РФ это методология объёмно-функционального проектирования

асфальтобетона, является отсутствие «классических» эмпирических свойств битумных вяжущих, к числу которых относится и температура размягчения. В основу методологии положены фактические температурные диапазоны эксплуатации битумного вяжущего в составе асфальтобетонного покрытия. В связи с этим представляло интерес исследование динамики изменения вязкоупругих свойств битума в процессе его наполнения минеральными порошками различной концентрации и природы.

В соответствии с данными по сдвиговой устойчивости ABB относительно исходного битума (рисунок 6) наблюдается значительное увеличение сдвиговой устойчивости системы по мере ее наполнения минеральным порошком.

Функции кривых, полученные при тестировании ABB по методу «Кольцо и шар» и DSR, являются возрастающими. Однако если по приросту температуры размягчения ABB возможно судить об увеличении теплостойкости системы (косвенно), то параметр сдвиговой устойчивости – это результат реологических испытаний и отправная точка в определении марки вяжущего PG.

Полученные данные демонстрируют (см. рисунок 6), что битум в процессе минимального наполнения минеральными порошками (индекс

составов 1.1 и 2.1) изменил свой верхний показатель марки (X) с 64 °C до 76 °C и 70 °C соответственно. Наполнение битумной матрицы максимальной концентрацией минеральных порошков (индекс составов 1.5 и 2.5) повысило марку системы до 82 °C. Результаты эксперимента удивительны, так как достижение столь высоких марок PG (X) реализуется посредством глубокой модификации битумов различными добавками. Логично предположить возможность получения более значимых результатов по сдвиговой устойчивости битумных систем в случае использования вязких битумов, ПБВ, а также при использовании более пористых МП.

Однако это тот случай, когда получаемый результат приемлем и работает при формировании структуры асфальтобетона в команде позитивных синергетических эффектов, регулируя пластические деформации композита.

Более интересен и значим блок информации по изменению низкотемпературных параметров битума в процессе наполнения минеральными порошками. Как отмечалось, в исследовании было задействовано два альтернативных метода BBR-тест и ABCD-тест, позволяющих оценить в марке PG низкотемпературную устойчивость ($\pm Y$). Анализ выполненного эксперимента изложен в графическом виде на рисунке 7.

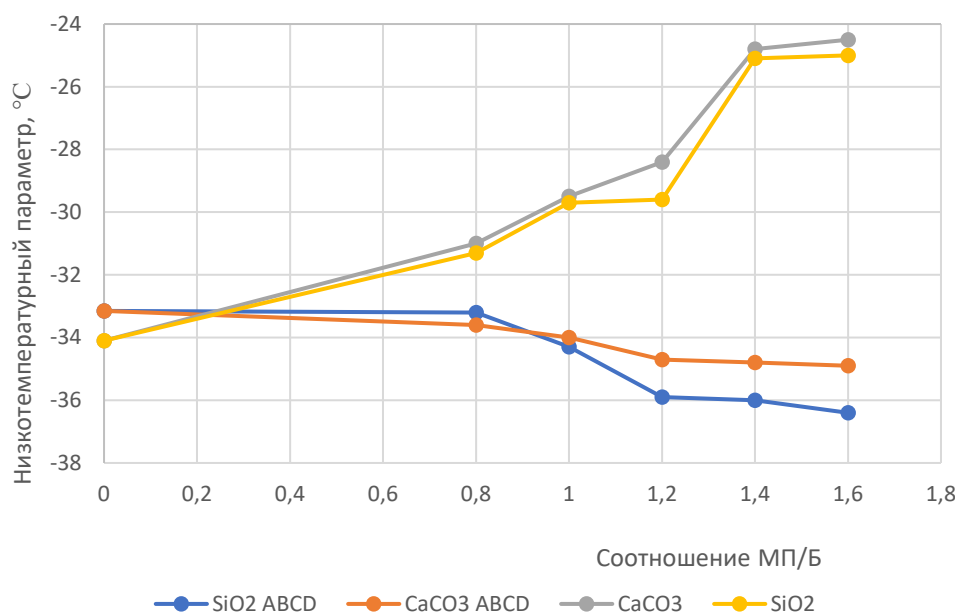


Рисунок 7 – Динамика изменения низкотемпературной устойчивости битума под влиянием МП при определении методами ABCD и BBR
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Dynamics of changes in low-temperature stability of bitumen under the influence of mineral powders (MP), being determined by the ABCD and BBR tests
Source: compiled by the authors.

Данные, полученные при испытании образцов АВВ по различным методикам, противоречивы. Однако в части тестирования базового битума наблюдаются незначительные отклонения показателей в пределах -1°C . Это позволяет предположить, что специфика полученных результатов может быть отнесена на счет малоизученности наполненных битумных систем и малой выборкой экспериментальных наработок по рассматриваемой тематике.

Важно отметить, что аналогичный тренд зависимостей при изучении низкотемпературной устойчивости модифицированных SBS битумных вяжущих был получен коллективом авторов [4]. Данные исследователей имеют следующий вид (рисунок 8).

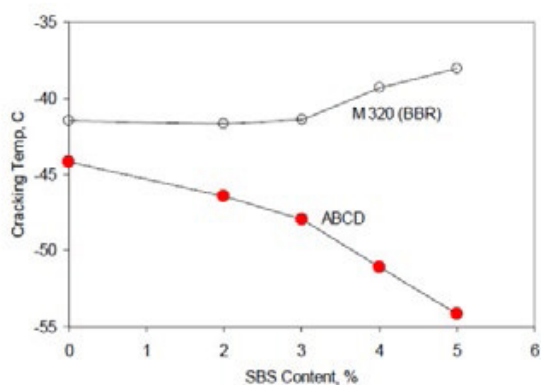


Рисунок 8 – Влияние концентрации СБС на температуру растрескивания вяжущего при определении методами ABCD и BBR [4]

Figure 8 – Effect of SBS concentration on the cracking temperature of the binder applying ABCD and BBR methods [4].

Анализ полученных результатов и изложенных в [4] демонстрирует, что BBR-тест незначительно реагирует на введение полимерного модификатора до 3%, после чего фиксирует повышение температуры растрескивания при увеличении концентрации SBS. В рассматриваемом случае, при минимальном наполнении битума минеральными порошками (составы 1.1 и 2.1), также наблюдается незначительное отклонение показателей от базового битума. После чего график зависимости низкотемпературной устойчивости системы от степени ее наполненности МП начинает демонстрировать повышение температуры растрескивания или прирост жесткости образцов АВВ.

Напротив, ABCD-тест показывает постепенное, но отчетливое уменьшение температуры растрескивания, то есть улучшение низкотемпературной трещиностойкости при

увеличении концентрации как минерального порошка (см. рисунок 7), так и полимера (см. рисунок 8).

Полученные зависимости по ABCD-тесту исследователи [4] попытались объяснить с позиции, что модифицированные битумные вяжущие под действием высоких термических напряжений могут проявлять достаточно большое удлинение без разрушения, при этом поглощая эти напряжения без растрескивания. Вследствие таких рассуждений было предложено анализировать модифицированные вяжущие путем измерения их деформации при разрушении.

Очевидно, что для рассматриваемой системы АВВ не характерны удлинения без разрушений. Однако, следуя фрактальному подходу [13] в структурообразовании асфальтобетона, когда каждая из его структур рассматривается как геометрическое повторение самой себя на следующем масштабном уровне (самоподобие), становится справедливым утверждение о возможности переноса знаний о небольшой части фрактала на весь фрактал и наоборот.

В соответствии с отраслевыми знаниями [20, 21] механизм образования низкотемпературных трещин можно представить следующим образом: композит (асфальтобетон, АВВ) при охлаждении претерпевает термическую усадку, которой сопротивляются его структурные связи между средой и фазой (минеральной составляющей различного масштаба), проявляющиеся как растягивающие напряжения. Превышение пороговых значений растягивающих напряжений запускает процесс трещинообразования. Было установлено [20, 22], что коэффициент температурного расширения асфальтобетона рассматривался как диапазон низких температур и напрямую зависит не только от вида и марки используемого битумного вяжущего, но и его содержания. Для композитов, включающих в свой состав повышенное содержание вяжущего, характерны более высокие температурные деформации.

Подобные заключения в полной мере объясняют полученные данные ABCD-теста (см. рисунок 8). Увеличение доли МП в образце уменьшало объем битума, а соответственно, и склонность образца АВВ к изменению своих геометрических размеров под действием изменяющихся температур. Таким образом, с ростом концентрации минерального порошка в АВВ происходило нарастание пороговых значений растягивающих напряжений (рисунок 9).

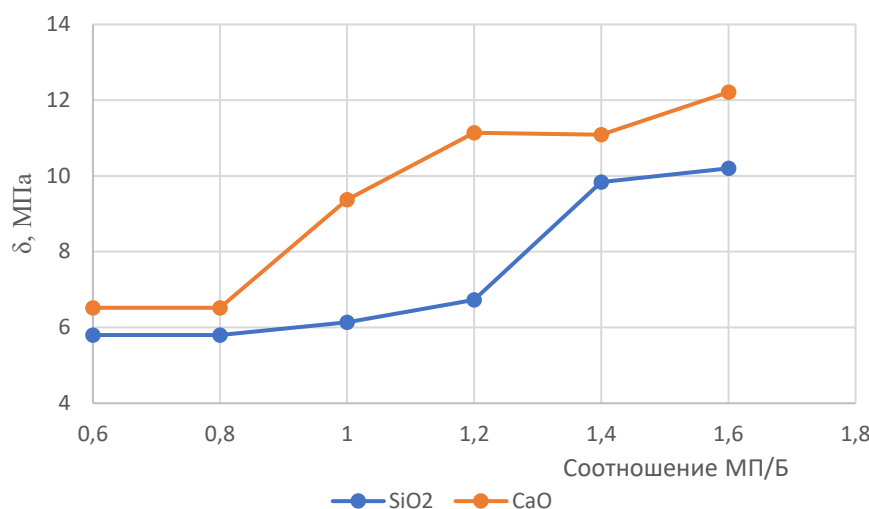


Рисунок 9 – Влияние концентрации МП и его природы на напряжение разрушения битума при ABCD-тесте
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Effect of mineral powder (MP) concentration and its nature on stress of bitumen destruction during the ABCD test
Source: compiled by the authors.

Однако существующие закономерности, связывающие увеличение содержания минерального порошка в асфальтовяжущем с понижением его пластичности и повышением хрупкости и деформативности при низких температурах, ставят под сомнение корректность использования для наполненных битумных систем показателя «температура растрескивания» при ABCD-тесте.

Значимым преимуществом ABCD при оценке низкотемпературной устойчивости битумных систем и особенно наполненных битумных матриц является возможность оценки напряжения разрушения (σ , МПа) образцов, изучения их поведения и сопротивления распространению трещин с понижением температуры испытания.

Целесообразность использования ABCD-теста для наполненных битумных систем подтверждают выводы исследовательских коллективов [5, 23, 24], отмечающие, что результаты протоколов испытаний в значительной степени определяются не только свойствами тестируемых систем, их прочностью, но и коэффициентом температурного расширения сжатия, вариативность значений которого обширна, но является индивидуальным показателем тестируемой системы.

Возвращаясь к обсуждению данных рисунка 9, необходимо подчеркнуть, что при оценке

величины напряжения разрушения (δ) необходимо учитывать температурный диапазон испытаний или модуль показателя. Так, в диапазоне положительных температур величина энергии разрушения битумосодержащих композитов характеризует их прочностные качества. Однако переход в область отрицательных температур диктует обратную зависимость: чем выше показатель δ , тем более жестким будет композит, тем хуже будет его трещиностойкость. Сопоставление результатов рисунков 7 и 9 привлекает внимание перегибом графиков в точке, соответствующей индексам составов АВВ 1.3 и 2.3. Можно предположить, что дальнейшее увеличение концентрации МП в составе АВВ будет переводить систему в хрупкое малодеформативное состояние.

Изложенные данные являются существенной доказательной базой качественных процессов, происходящих в структуре асфальтобетона в процессе его приготовления при объединении битума с МП. Полученные результаты позволяют оценить, каким образом вид и концентрация МП корректируют РГ марку битумного вяжущего относительно его базовых свойств (таблица 3). Данные для оценки низкотемпературной устойчивости ($\pm Y$) принимались по BBR-тесту.

Таблица 3

Динамика изменения PG марки битумного вяжущего при наполнении МП
Источник: составлено авторами.

Table 3

Dynamics of change in PG grade of bitumen binder when mineral powder (MP) is filled
Source: compiled by the authors.

Рецептура АВВ (отношение МП/вяжущее), части	Вид минерального порошка	
	известняк	пыль электрофильтров
	PG марка	
битум	64-34	
0,8 : 1	76-28	70-28
1,0 : 1	76-28	76-28
1,2 : 1	76-28	76-28
1,4 : 1	82-22	76-22
1,6 : 1	82-22	82-22

Полученные переходы марок PG вяжущего (см. таблицу 3) коррелируют с графиками зависимости напряжения разрушения наполненных битумных систем по ABCD-тесту. АВВ, наполненные в соотношении 1,2:1 (МП:Б), имеют на рисунке 9 перегибы, свидетельствующие о переходе системы под действием низких температур в иное реологическое состояние (нарастание хрупкости). Данные BBR-теста демонстрируют, что это точка перехода системы относительно базового битума на две марки вниз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка динамики изменения свойств битума под влиянием различной степени наполнения минеральным порошком из известняка и пыли электрофильтров продемонстрировала значительное изменение свойств исходного битума.

Наполнение вяжущего минеральным порошком (пылью) в максимально допустимом концентрационном пределе (по ГОСТу) изменяет параметр марки PG (X) на три позиции с 64 °C до 82 °C. Более кардинальные данные получены для низкотемпературной устойчивости образцов с обрушением параметра ($\pm Y$) с величины -34 °C до -22 °C!

Таким образом, полученные результаты могут являться ответом на вопрос: почему трещиностойкость битума не отвечает реальной трещиностойкости асфальтобетона при эксплуатации. Формирование АВВ в структуре асфальтобетона происходит в неконтролируемой исследователями области. Наблюдающееся нарастание жесткости системы, особенно

в области низких температур, демонстрирует ее неспособность сопротивляться температурным факторам, на которые был рассчитан битум в ее составе, а следовательно, физическим проявлением этих структурных эффектов будет температурное трещинообразование. Особенно необходимо отметить, что базовый битум, используемый в эксперименте, отличался высокими показателями марки относительно своих аналогов. Надо полагать, что более вязкие марки битума и ПБВ в процессе формирования АВВ проявят большую склонность к структурированию и нарастанию хрупких свойств системы.

Интересные, на первый взгляд противоречивые, данные были получены при тестировании образцов АВВ по методикам BBR и ABCD для оценки низкотемпературных параметров. Выполненный анализ продемонстрировал, что полученные данные полностью согласуются между собой. Однако в случае использования теста ABCD целесообразно опираться на данные по напряжению разрушения, позволяющие в динамике фиксировать реакцию системы на вид и степень наполнения, а также улавливать ее реологические изменения, так как более жесткие смеси с высокой прочностью и малым перемещением обладают худшей стойкостью к образованию трещин.

В ходе исследования было установлено: влияние минеральных порошков кислой и основной природы, а также их концентрации на начальном этапе формирования свойства АВВ разнятся незначительно. Возможно отметить, что изменение марки PG-битума, наполненного известняковым минеральным

порошком, происходит более резко, что связано с его высокой структурирующей способностью. Очевидно, в виду разной природы МП, а следовательно, реакционной способности по отношению к битуму, отличия проявятся при исследовании коррозионной устойчивости сформированных АБВ.

Подводя итог, можно утверждать, что необходимо расширять и продолжать программу исследований низкотемпературных реологических параметров не только различных вяжущих, но и АБВ являющихся микроструктурой асфальтобетонов. Очевидно, что, выявляя параметры, отвечающие за низкотемпературное растрескивание системы на микроуровне, станет возможным масштабировать знания и на асфальтобетоны – макроуровень.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колесник Д.А. Определение низкотемпературной трещиностойкости асфальтобетона // Мир дорог. 2023. №154. С. 80–86.
2. Колесник Д.А., Шапченко Д.В. Новые тенденции в области испытаний асфальтобетона // Мир дорог. 2018. №115. С. 44–46.
3. Пахаренко Д.В., Колесник Д.А. Опыт-экспериментальные работы ЗАО «ВАД» // Дорожная техника. 2016. №1. С. 28–35.
4. Elwardany M.D., Planche J.-P., King G. Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced surface damage // Construction and Building Materials. 2020. № 255. P. 119331. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119331.
5. Elwardany M.D., King G., Planche J.-P., Rodezno C., Christensen D., Fertig III R.S., Kuhn K.T., Bhuiyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage // Asphalt Paving Technol. J. Assoc. AsphaltPavingTechnol. 2019. Vol 88.
6. Рябов В.Г., Ширкунов А.С., Шуверов В.М. Получение дорожной битумной композиции с улучшенными низкотемпературными характеристиками // Вестник ПНИПУ. 2016. № 3. С. 115–125. DOI: 10.15593/2224-9400/2016.3.09.
7. Zolotarev V. Methods for determining stresses at key temperatures // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 345. P. 128365. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128365.
8. Gorbatova V.N., Gordeeva I.V., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Nikol'skii V.G., Egorov V.M. Effect of the active powder of discretely devulcanized rubber on bitumen properties at low temperatures // Nanotechnologies in Construction. 2023. Vol. 15(1). Pp. 72–83. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-1-72-83.
9. Небрятенко Д.Ю. ABCD – метод оценки низкотемпературного поведения дорожных вяжущих // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. 2022. № 1 (39). С. 37–41. DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-37-41.
10. Лебедев Е.В., Зуров Б.А., Высоцкий М.М., Небрятенко Д.Ю. Оценка свойств дорожных вяжущих при низких температурах методом ABCD // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т.18, № 2 (28). С. 81–89. DOI: 10.34708/GSTOU. 2022.40.59.007.
11. Егоров Д.Ю., Небрятенко Д.Ю. Применение метода ABCD при анализе низкотемпературных свойств состаренных ординарных и модифицированных битумов // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 3 (90). С. 73–82.
12. Кирюхин Г.Н. К оценке температурной трещиностойкости асфальтобетона // Наука и техника в дорожной отрасли. 2018. №1 (83). С.27–30.
13. Кирюхин Г.Н. К вопросу о теории структуры асфальтобетона // Дороги и мосты. 2019. №1 (41). С. 247–261.
14. Ярцев В.П., Долженкова М.В., Петрова Н.В. Влияние наполнителей и нанодобавок на эксплуатационные свойства композитов на основе битума // Вестник ТГТУ. 2014. Т. 20, № 4. С. 801–809.
15. Лебедев М.С. Чулкова И.Л. Исследование реологических свойств битумных композиций, наполненных золами-уноса различного состава // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 47–52. DOI: 10.12737/22365.
16. 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.
17. Mr. Robert B. McGennis, Dr. Scott ShuEer, Dr. Hussain U. Bahia. Справочные данные по методам тестирования Битумных вяжущих Суперпейв (Superpave) в США № FHWA-SA-94-069 // Федеральное управление шоссейных дорог. США: Министерство транспорта США. 1994. 118 с.
18. Blazejowski K., OlszackiJa., Peciakowski H. BitumnyjSpravocnik // ORLEN Asfaltsp. z o.o. – Plock, 2017. 142 p.
19. John I., Bangi M.R. and Lawrence M. Effect of Filler and Binder Contents on Air Voids in Hot-Mix Asphalt for Road Pavement Construction // Open Journal of Civil Engineering. 2021. № 11. Pp.255-289. DOI: 10.4236/ojce.2021.113016.
20. Сериков Д.Л., Кравченко С.Е. Экспериментальные исследования влияния компонентов асфальтобетонной смеси на структурную устойчивость асфальтобетона // Автомобильные дороги и мосты. 2016. №2 (18). С. 48–55.
21. Кирюхин Г.Н., Смирнов Е.А., Зайцев Н.Ю. Влияние температуры на прочность нежестких дорожных одежд //Автомобильные дороги. 2022. № 1 (1082). С. 118–122.
22. Кравченко С.Е., Сериков Д.Л. К вопросу о теоретической и экспериментальной оценке структурной устойчивости асфальтобетона // Строительная наука и техника. 2009. № 3 (24). С. 35–40.
23. Akentuna M., Kim S.S., Nazzal M., Abbas A.R. Asphalt Mixture CTE Measurement and the Determination of Factors Affecting CTE // Journal of Materials in Civil Engineering. 2017. Vol. 29 (6). P.04017010. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001840.

24. Marasteanu M., Zofka A., Turos M., Li X., Velasquez R., Li X., Buttlar W., Paulino G., Braham A., Dave E., Ojo J., Bahia H., Williams C., Bausano J., Gallistel A., McGraw, J. Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements National Pooled Fund Study 776. Minnesota. Department of Transportation, 2004. 338 p.

REFERENCES

1. Kolesnik D.A. Determination of low-temperature crack resistance of asphalt concrete. *Mir dorog*. 2023; 154: 80–86. (in Russ.)
2. Kolesnik D.A., Shapchenko D.V. New trends in the field of asphalt concrete testing. *Mir dorog*. 2018; 115: 44–46. (in Russ.)
3. Pakharensko D.V., Kolesnik D.A. Experimental work of CJSC "VAD". *Dorozhnajatehnika*. 2016; 1: 28–35. (in Russ.)
4. Elwardany M.D., Planche J.-P., King G. Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced surface damage. *Construction and Building Materials*. 2020; 255: 119331. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119331.
5. Elwardany M.D., King G., Planche J.-P., Rodezno C., Christensen D., Fertig III R.S., Kuhn K.T., Bhuiyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage. *Asphalt Paving Technol: J. Assoc. Asphalt Paving Technol*. 2019; Vol 88.
6. Ryabov V.G., Shirkunov A.S., Shuverov V.M. Obtaining a road bitumen composition with improved low-temperature characteristics. *Bulletin of PNRPU*. 2016; 3: 115–125. DOI: 10.15593/2224-9400/2016.3.09. (in Russ.)
7. Zolotarev V. Methods for determining stresses at key temperatures. *Construction and Building Materials*. 2022; Vol. 345: 128365. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128365.
8. Gorbatoва V.N., Gordeeva I.V., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Nikol'skii V.G., Egorov V.M. Effect of the active powder of discretely devulcanized rubber on bitumen properties at low temperatures. *Nanotechnologies in Construction*. 2023; 15(1): 72–83. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-1-72-83.
9. Nebratenko D.Y. ABCD – a method for evaluating the low-temperature behavior of road binders. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region: scientific and Technical Journal*. 2022; 1 (39): 37–41. DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-37-41. (in Russ.)
10. Lebedev E.V., Zurov B.A., Vysotsky M.M., Nebratenko D.Yu. Assessment of the properties of road binders at low temperatures by the ABCD method. *Herald of GSTOU. Technical Sciences*. 2022; XVIII, 2 (28): 81–89. DOI: 10.34708/GSTOU. 2022.40.59.007. (in Russ.)
11. Egorov D.Yu., Nebratenko D.Yu. Application of abcd method for analysis of low-temperature properties of aged ordinary and modified bitumens. *ESSUTM Bulletin*. 2023; 3 (90): 73–82. DOI 10.53980/24131997_2023_3_73. (in Russ.)
12. Kiryukhin G.N. On the assessment of thermal crack resistance of asphalt concrete. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2018; 1 (83): 27–30. (in Russ.)
13. Kiriukhin G.N. On the theory of the structure of asphalt concrete. *Dorogiimosty*. 2019; 1 (41): 247–261. (in Russ.)
14. Yartsev V.P., Dolzhenkova M.V., Petrova N.V. Influence of fillers and nano-additives on the performance properties of bitumen-based composites. *Transactions of the TSTU*. 2014; 20 (4): 801–809. (in Russ.)
15. Lebedev M.S., Chulkova I.L. Study of rheological characteristics of bitumen composites with different fly ashes. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; 11: 47–52. DOI: 10.12737/22365. (in Russ.)
16. Kindeev O.N., Vysotskaya M.A., Kurlykina 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>
17. Mr. Robert B. McGennis, Dr. Scott ShuEer, Dr. Hussain U. Bahia. Reference data on testing methods of Bitumen binders Superpave (Superpave) in the USA No. FHWA-SA-94-069. *Federal Highway Administration. USA: US Department of Transportation*. 1994: 118. (in Russ.)
18. Blazejowski K., Olszacki Ja., Peciakowski H. Bitumnyj Spravocnik. *ORLEN Asfalt sp. z o.o. – Plock*, 2017. 142.
19. John I., Bangi M.R. and Lawrence M. Effect of Filler and Binder Contents on Air Voids in Hot-Mix Asphalt for Road Pavement Construction. *Open Journal of Civil Engineering*. 2021; №11: 255–289. DOI: 10.4236/ojce.2021.113016.
20. Serikov D.L., Kravchenko S.E. Experimental studies of the influence of asphalt concrete mixture components on the structural stability of asphalt concrete. *Roads and Bridges*. 2016; 2 (18): 48–55. (in Russ.)
21. Kiryukhin G.N., Smirnov E.A., Zaitsev N.Yu. The influence of temperature on the strength of non-rigid road clothes. *Avtomobil'nyedorogi*. 2022; 1 (1082): 118–122. (in Russ.)
22. Kravchenko S.E., Serikov D.L. On the theoretical and experimental assessment of the structural stability of asphalt concrete. *Stroitel'najanaukaitehnika*. 2009; 3 (24): 35–40. (in Russ.)
23. Akentuna M., Kim S.S., Nazzal M., Abbas A.R. Asphalt Mixture CTE Measurement and the Determination of Factors Affecting CTE. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. Vol. 29 (6): 04017010. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001840.
24. Marasteanu M., Zofka A., Turos M., Li X., Velasquez R., Li X., Buttlar W., Paulino G., Braham A., Dave E., Ojo J., Bahia H., Williams C., Bausano J., Gallistel A., McGraw, J. Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements National Pooled Fund Study 776. Minnesota. Department of Transportation, 2004. 338 p.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Высоцкая М.А. Общее руководство, формулирование цели задач и выводов, работа с текстом статьи, внесла основной вклад в ее написание.

Лесовик В.С. Научное консультирование, работа с текстом статьи.

Катрич Я.М. Обработка экспериментальных данных.

Егоров Д.Ю. Проведение лабораторных исследований ABCD-теста.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Vysotskaya M.A. General guidance, formulation of the purpose of tasks and conclusions, work with the text of the article, has made the main contribution to the manuscript writing.

Lesovik V.S. Scientific consulting, work with the text material.

Katrich Ya.M. Processing of experimental data.

Egorov D.Yu. Conducting laboratory studies of the ABCD test.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Высоцкая Марина Алексеевна – канд. техн. наук, доц. кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4572-7839>, **Scopus Author ID:** 55780438500, **Researcher ID:** AAD-3647-2022, **SPIN-код:** 9233-5349, e-mail: roruri@rambler.ru

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф. кафедры строительного материала, изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>, **Scopus Author ID:** 55887733300, **Researcher ID:** A-4757-2016, **SPIN-код:** 2873-6860, e-mail: naukavs@mail.ru

Катрич Ярослав Михайлович – аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина Белгородского государ-

ственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-0314-9877>, **Researcher ID:** JWO-1778-2024, **SPIN-код:** 6338-2633, e-mail: yaroslavkatrich@mail.ru

Егоров Дмитрий Юрьевич – руководитель направления ООО «ИНФРАТЕСТ» (117545, г. Москва, ул. Дорожная, д. 8, корп. 1), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-6127-1305>, **Researcher ID:** KFQ-0086-2024, **SPIN-код:** 0086-2024, e-mail: dmitry.egorov@agni.pro

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vysotskaya Marina A.I. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Automobile and Railway Road Department named after A.M. Gridchin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4572-7839>, **Scopus Author ID:** 55780438500, **Researcher ID:** AAD-3647-2022, **SPIN-код:** 9233-5349, e-mail: roruri@rambler.ru

Lesovik Valeriy S. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Building Materials' Science, Products and Structures of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>, **Scopus Author ID:** 55887733300, **Researcher ID:** A-4757-2016, **SPIN-код:** 2873-6860, e-mail: naukavs@mail.ru

Katrich Yaroslav M. – Postgraduate student of the Automobile and Railway Road Department named after A.M. Gridchin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-0314-9877>, **Researcher ID:** JWO-1778-2024, **SPIN-код:** 6338-2633, e-mail: yaroslavkatrich@mail.ru

Egorov Dmitriy Y. – Head of research, LLC "INFRAEST" (8 Dorozhnaya str., 1, Moscow, 117545), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-6127-1305>, **Researcher ID:** KFQ-0086-2024, **SPIN-код:** 0086-2024, e-mail: dmitry.egorov@agni.pro