

Научная статья
УДК 625.7/.8: 665.775
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-324-340>
EDN: FYBWRV



МЕТОД ABCD ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ ОРДИНАРНЫХ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВЯЖУЩИХ

И.М. Рожков¹ ✉, А.В. Харпаев¹, Д.Ю. Небратенко^{2,3}, В.А. Кретов²

¹Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса,
г. Москва, Россия

²Российский университет транспорта (МИИТ),
г. Москва, Россия

³МИРЭА – Российский технологический университет,
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
extralab@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Активное внедрение в отечественную практику системы объемно-функционального проектирования (ОФП) направлено на широкомасштабное освоение российской дорожно-строительной отраслью передовых подходов к технологии проектирования асфальтобетонных покрытий. Одним из принципиальных отличий методологии ОФП от ранее устоявшейся практики оценки технических, технологических и эксплуатационных показателей дорожно-строительных материалов является введение в действие новых методик, с высокой степенью точности характеризующих количественные показатели, основанные на фактических физико-химических и механических свойствах используемых компонентов. Так, в качестве варианта оценки низкотемпературных свойств битумных вяжущих предложено использовать метод изгибающейся балочки (BBR), который достаточно хорошо зарекомендовал себя при работе с традиционными (ординарными) битумами. Однако природно-климатические условия эксплуатации автомобильных дорог в России однозначно требуют применения вяжущих, модифицированных высоко- и низкомолекулярными соединениями, прежде всего полимерами. В данном исследовании была поставлена задача по изучению возможности использования метода ABCD (прибор ABCD 8.0) для сопоставительной оценки низкотемпературных параметров как исходных ординарных битумов и полимерно-битумных вяжущих, так и указанных типов вяжущих, подвергшихся краткосрочному RTFOT и долговременному PAV-старению.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования были использованы образцы промышленных партий битумов нефтяных дорожных вязких (ГОСТ 33133–2014) и полимерно-битумных вяжущих (ГОСТ Р 52056–2003). Для определения низкотемпературных показателей применено отечественное устройство ABCD 8.0 и климатическая камера с воздушным охлаждением. Исследование битумных вяжущих проведено по параметрам, заложенным в технические требования ГОСТ Р 58400.11–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения температуры растрескивания при помощи устройства ABCD».

Результаты. Определены значения температуры растрескивания для ординарных и модифицированных битумных вяжущих до и после старения. Показано, что низкотемпературные свойства полимерно-битумных вяжущих существенно превосходят аналогичные показатели окисленных дорожных битумов.

Обсуждение и заключение. Сопоставительный анализ низкотемпературных свойств ординарных и полимерно-битумных вяжущих, полученных в ходе их определения прямым методом, позволил подтвердить эффективность разработанной в ГОСТ Р 58400.11–2019 методики оценки работоспособности вяжущих различного компонентного состава в сложных климатических условиях России. Подтверждена эффективность отечественного прибора второго поколения ABCD 8.0 для прямой оценки температуры растрескивания битумных вяжущих переменного состава.

Выводы. В результате исследования динамики изменения низкотемпературной устойчивости модифицированных и ординарных вяжущих методом ABCD показано, что для прогнозирования низкотемпературной устойчивости вяжущих целесообразна оценка их свойств после длительного старения.

© Рожков И.М., Харпаев А.В., Небратенко Д.Ю., Кретов В.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: объемно-функциональное проектирование (ОФП), температура растрескивания битумных вяжущих, метод ABCD, трещиностойкость, полимерно-битумные вяжущие

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов ФГБУН ФИЦ ХФ имени Н.Н. Семенова РАН и ООО «Инфратест» за помощь в подготовке образцов и проведении испытаний.

Статья поступила в редакцию 26.02.2024; одобрена после рецензирования 09.04.2024; принята к публикации 22.04.2024.

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: Рожков И.М., Харпаев А.В., Небратенко Д.Ю., Кретов В.А. Метод ABCD для определения низкотемпературных свойств ординарных и модифицированных вяжущих // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2. С. 324-340. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-324-340>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-324-340>

EDN: FYBWRY

ABCD METHOD FOR DETERMINATION OF LOW-TEMPERATURE PROPERTIES OF ORDINARY AND MODIFIED BINDERS

Ivan M. Rozhkov¹ ✉, Andrei V. Kharpaev¹, Dmitrii Yu. Nebratenko^{2,3}, Valerii A. Kretov²

¹Research Institute of Transportation and Construction Complex,
Moscow, Russia

²Russian University of transport (MIIT),
Moscow, Russia

³MIREA – Russian Technological University,
Moscow, Russia

✉ corresponding author
extralab@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The active introduction into practice of the system of volumetric and functional design (OFP) is aimed at the large-scale development by the Russian road construction industry of advanced foreign approaches to the technology of designing asphalt concrete pavements (Superpave). One of the fundamental differences between the OFP methodology and the previously established practice of evaluating technical, technological and operational indicators of road construction materials is the introduction of new methods that characterize quantitative indicators with a high degree of accuracy, based on the actual physical, chemical and mechanical properties of the components used. Thus, as methods for assessing the low-temperature properties of bitumen binders, it is proposed to use the bending beam method (BBR), which has proven itself quite well when working with traditional (ordinary) bitumen. However, the natural and climatic conditions of operation of highways in Russia clearly require the use of binders modified with high- and low-molecular compounds, including polymers. In this study, the task of applying the ABCD method to evaluate the low-temperature parameters of ordinary bitumen and polymer-bitumen binders was realized.

Materials and methods. Samples of industrial batches of petroleum road viscous bitumen (GOST 33133-2014) and polymer-modified bitumen (GOST R 52056-2003) were used as objects of research. To determine the low-temperature parameters, an ABCD 8.0 device and an air-cooled climate chamber were used. The study of bitumen binders according to the parameters laid down in the technical requirements of GOST R 58400.11–2019 'Automobile roads of general use. Petroleum-based bitumen binders. Method of determining the temperature of cracking using the device ABCD' was carried out.

Results. The values of the cracking temperature for ordinary and modified bitumen binders were determined. It is shown that the low-temperature parameters of polymer-bitumen binders significantly exceed similar properties of oxidized road bitumen.

© Rozhkov I.M., Kharpaev A.V., Nebratenko D.Yu., Kretov V.A., 2024



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

Discussion and conclusions. A comparative analysis of the low-temperature properties of ordinary and modified binders obtained during their determination by the direct method enables to confirm the effectiveness of the methodology developed in GOST R 58400.11-2019 for assessing the performance of binders of various component composition in difficult climatic conditions of Russia. The effectiveness of the domestic second-generation ABCD 8.0 device for direct assessment of the cracking temperature of bitumen binders of variable composition has been confirmed.

KEYWORDS: Superpave (Superior performing asphalt pavements), volumetric-functional design, cracking temperature of bitumen binders, ABCD method, crack resistance, polymer-bitumen binders

ACKNOWLEDGMENTS: The authors would like to express their gratitude to the staff of the Laboratory of Physicochemistry of Highly Dispersed Materials of the N.N. Semionov Russian Academy of Sciences and OOO Infratest for their assistance in sample preparation and testing.

The article was submitted 26.02.2023; approved after reviewing 09.04.2024; accepted for publication 22.04.2024.

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: Rozhkov I.M., Kharpayev A.V., Nebratenko D.Yu., Kretov V.A. ABCD method for determination of low-temperature properties of ordinary and modified binders. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (2): 324-340. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-324-340>

ВВЕДЕНИЕ

Особенности географического расположения Российской Федерации и связанные с ним сложные природно-климатические условия эксплуатации сооруженных на ее территории дорожных объектов объясняют необходимость постоянного контроля качественных показателей как конечных многокомпонентных строительных материалов, так и их исходных сырьевых составляющих [1].

Активная социальная политика государства, направленная на повышение благосостояния и равномерное развитие всех регионов страны, требует обеспечения бесперебойной круглогодичной транспортной доступности. Наиболее развитую транспортную составляющую представляет собой сеть автомобильных дорог. При этом одной из основных проблем российских автодорог является трещинообразование под действием низких температур [2, 3]. Активное низкотемпературное растрескивание происходит и в регионах, подверженных многократным резким перепадам температур. Этот тип разрушения проявляется при развитии растягивающего напряжения в результате быстрого охлаждения дорожного покрытия и его компенсации за счет образования продольных или поперечных разрушений, когда агломерат дорожного покрытия достигает критического напряжения [4].

Целью данной статьи является демонстрация возможностей определения низкотемпературных свойств традиционных (ординарных) и модифицированных (полимерно-битумных) вяжущих и изучение их изменения в ходе кра-

ткосрочного старения по методу RTFOT. В качестве основного фиксируемого параметра связующих материалов определена температура растрескивания (метод ABCD).

Тесты на основе анализа разрушения сплошности слоя вяжущего в твердом виде являются наиболее распространенными методами, много лет используемыми для характеристики поведения битума при низких температурах. Предполагается, что низкотемпературное растрескивание происходит, если понижение температуры вызывает в материале внутренние термические напряжения, превышающие его физическую прочность. Ниже приведено краткое описание трех из наиболее известных вариантов.

Определение температуры хрупкости методом Фрааса (Fraass) является одним из старейших тестов, используемых для оценки поведения нефтяного битума при пониженных температурах. Он был разработан в 1937 г. [5]. Предложенная методика состояла в следующем. Стальная пластина, покрытая слоем битума, изгибается и разгибается через каждые 1 °С, при этом температура воздуха постоянно снижается со скоростью 1 °С/мин. Итогом испытаний является фиксация температуры, при которой на поверхности битума появляются первые хорошо различимые трещины. Было установлено [6], что жесткость битума в точке разрыва по Фраасу составляет примерно 2100 МПа. Несмотря на широкое распространение указанного метода в подавляющем большинстве стран мира, объясняющееся простотой аппаратного оформления и большим объемом накопленных за несколько десятилетий

массивов данных, предел прочности по Фраасу не отражает реальные показатели битума при низких температурах. Наиболее серьезные расхождения наблюдаются в случае попытки оценить низкотемпературные свойства битумов, модифицированных полимерами [7, 8, 9].

Метод и прибор для определения температуры растрескивания битумного вяжущего ABCD (Asphalt Binder Cracking Device) были разработаны доктором Сан-Су Кимом (Kim S.-S., EZ Asphalt Technology LLC) [10, 11]. Для отечественной дорожной отрасли это принципиально новый метод испытаний, не имеющий прямых аналогов и в других технических областях. Отличительной особенностью метода, так чутко отражающего потребности региональных дорожно-строительных предприятий России, является возможность оценки соответствия свойств вяжущего низкотемпературным параметрам региона его применения без предварительных знаний о его реологических и прочностных свойствах, коэффициенте теплового расширения и сжатия и т.п. [12, 13, 14].

Особенностью метода ABCD является то, что он представляет собой прямой метод измерения. Фиксация разрушения (температуры растрескивания) в ходе низкотемпературной усадки вяжущего происходит непосредственно вокруг практически абсолютно не сжимаемого сердечника из специального сплава металлов, моделирующего растяжения в асфальтобетоне при процессах низкотемпературной термосушки [14, 15, 16]. Таким образом, моделируется реальное поведение вяжущего в составе асфальтобетона. При понижении температуры асфальтобетонное покрытие и, прежде всего, битумное вяжущее, сжимается и момент нарушения монолитности слоя вяжущего между каменными материалами фиксируется непосредственно необратимая потеря сплошности. Равномерное понижение температуры образцов вяжущего, помещенных в климатическую камеру, до минус 60°C моделирует указанный процесс достаточно достоверно. В итоге исследователь непосредственно получает искомое значение температуры растрескивания исследуемого вяжущего.

Метод определения жесткости и ползучести битума при отрицательных температурах (BBR) был разработан в рамках Стратегической программы исследований автомобильных дорог (SHRP) [17]. Принцип действия прибора BBR основан на элементарной теории изгиба. Эффектом сдвига в данной модельной системе пренебрегают. При испытании призматическая битумная балочка размещается на двух опорах и нагружается по середине. Тест BBR прово-

дится с использованием принципа температурно-временной суперпозиции. В соответствии с ним жесткость при времени нагружения 60 сек и температуре $T(^{\circ}\text{C})$ примерно равна жесткости при времени нагружения 2 ч при температуре $T-10(^{\circ}\text{C})$ [18, 19]. Однако на результаты теста BBR сильно влияет физическое закалывание образцов [20]. Кроме того, критерии жесткости и m -величины при времени нагружения 60 сек разработаны именно для чистых битумов. Таким образом, в большинстве случаев эти критерии не соответствуют исследуемым модифицированным битумам [21].

Термовязкоупругая модель для расчета термических напряжений на основе данных испытаний BBR была включена в стандарты Американской ассоциации государственных и автомобильных служащих (AASHTO) с 2002 г. [22]. Ранее и в методологии ОФП для указанных целей предполагалось использование расчетного метода изгибающейся балочки (BBR). В соответствии с национальным стандартом 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, изгибающей балочки (BBR)» в качестве оценочных параметров, характеризующих низкотемпературные свойства битумов, использовались жесткость и ползучесть изгибающейся балочки вяжущего при температурах от минус 36 до 0°C [23, 24]. Данный метод применим к битумным вяжущим, имеющим значение жесткости в диапазоне от 20 до 1000 МПа и достаточно хорошо зарекомендовал себя при работе с ординарными битумами. Однако при определении низкотемпературных показателей многокомпонентных вяжущих, особенно модифицированных первичными полимерами и вторичными полимерсодержащими материалами, значения, характеризующие хрупкость вяжущего и асфальтобетонной смеси в целом, вызвали определенные вопросы [25, 26, 27, 28].

При этом в методе ABCD во время охлаждения измеряются термические напряжения образца битума, закрепленного вокруг кольца, а температура растрескивания напрямую определяется скачком деформации при появлении трещины [10, 14]. Модификация битума полимерами приводит к более низкой температуре растрескивания, при этом абсолютное значение скачка деформации увеличивается. Исследователи сообщают о сильной корреляции между температурой трещинообразования вяжущего и содержанием в его составе полимерных модификаторов, как правило, типа

СБС-полимеров [7, 10, 14, 26, 28, 29]. Кроме того, при определении стойкости асфальто-вязующих к растрескиванию при средних и низких температурах была выявлена плохая корреляция между температурой растрескивания и результатами испытаний на Bending Beam Rheometer (BBR) и Single Edge Notched Bending [30].

Таким образом, до сих пор не вполне ясно, какой из указанных методов дает наилучший прогноз низкотемпературного растрескивания битумных вяжущих. Поэтому было признано целесообразным изучение методологии определения температуры растрескивания при помощи устройства ABCD для отечественных нефтяных битумных вяжущих материалов. Была поставлена задача определить низкотемпературные показатели как для наиболее широко применяемого в России битума нефтяного дорожного вязкого марки БНД 70/100, так и полученных на его основе полимерно-битумных вяжущих марок ПБВ 40 и ПБВ 60.

Дополнительным аргументом для целенаправленного изучения возможностей оценки низкотемпературных показателей битумных вяжущих различного состава (температура растрескивания, скачок напряжения, механическое напряжение разрушения) именно методом ABCD стало появление на отечественном рынке лабораторного дорожного оборудования российского прибора второго поколе-

ния ABCD 8.0 для определения температуры растрескивания. Использование отечественного лабораторного оборудования, безусловно, целесообразно считать приоритетным как с точки зрения технологических, так и экономических интересов нашей страны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе изучения низкотемпературных свойств битумных вяжущих в качестве исходного был выбран битум нефтяной дорожный вязкий марки БНД 70/100 (ГОСТ 33133–2014). Образцы промышленно выпускаемых нефтяных окисленных битумов дорожных БНД 70/100 были предоставлены ООО «Газпромнефть-Битумные материалы» (паспорт №3649 2484062 от 26.08.2022 АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-МОСКОВСКИЙ НПЗ»). Указанный вяжущий материал использовался также в качестве базового битума при изготовлении полимерно-битумных вяжущих марок ПБВ 40 и ПБВ 60, соответствующих ГОСТ Р 52056–2003. Модификация осуществлялась бутадиен-стирольным термозластопластом (БС ТЭП, СБС-полимер) линейной структуры (СБС Л 30-01) [31], крупнотоннажно синтезируемым на АО «Воронежсинтезкаучук». Физико-механические показатели исходного битума и полимерно-битумных вяжущих на его основе, использованных в ходе проведенного исследования, представлены в таблице 1.

Таблица 1
Физико-механические показатели исходных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table 1
Physical and mechanical parameters of the initial binders
Source: compiled by the authors.

Наименование показателя	Физико-механические показатели		
	БНД 70/100	ПБВ-40	ПБВ-60
Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 25 °С	83	41	88
Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 0 °С	---	26	32
Растяжимость, см, не менее, при 25 °С	---	63	71
Растяжимость, см, не менее, при 0 °С	3,8	18	19
Температура размягчения по кольцу и шару, 0 °С	48	86	72
Температура хрупкости, 0 °С	- 20	- 20	- 26
Температура вспышки, 0 °С	286	298	294
Эластичность, %, при 25 °С	---	93	95
Эластичность, %, при 0 °С	---	70	71
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	5,6	3	2
Однородность	---	Однородно	Однородно

В ходе оценки низкотемпературного поведения были использованы как вяжущие в исходном состоянии, так и после проведения кратковременного старения в соответствии с требованиями ГОСТ 33140–2014 (метод RTFOT) [32].

Учитывая, что при набухании БС ТЭП компонентный состав битума обедняется парафино-нафтеновыми компонентами, была предпринята попытка восполнить уменьшение содержания низкомолекулярных масел в битуме путем введения пластификаторов/мягчителей в объеме, достаточном для восполнения их количества в мальтеновой фазе вяжущего. Введение пластификаторов фактически гарантирует возможность высокомолекулярным компонентам полимерно-битумных вяжущих реализовать подвижность (гибкость) своих цепей и обеспечить образование трехмерной сетки в объеме вяжущего при меньшем содержании дорогостоящих полимерных компонентов. При этом повышенное содержание дополнительно введенных парафино-нафтеновых масел способно изменить не только себестоимость вяжущего, но и существенно повлиять на свойства получающегося вяжущего материала.

Поэтому признано целесообразным перед проведением процесса модификации определение компонентного состава базового битума, например, по методу S.A.R.A. [33]. Принимая во внимание компонентный состав доступных для промышленного производства ПБВ пластификаторов и мягчителей, для получения ПБВ 60 был использован пластификатор – Экстракт нефтяной (марка А) в количестве до 7% масс. При лабораторном подборе состава ПБВ 40 был использован пластификатор – индустриальное масло И-40 в количестве до 3% масс. Вязкостные показатели пластифицирующих агентов измеряли на ротационном вискозиметре по ГОСТ 33138. Испытания проводились в вытяжном шкафу при нормальных условиях (н.у.) [34]. Значения динамической вязкости при температуре испытаний 20 °С составили для Экстракта нефтяного 0,560 Па*с, а для индустриального масла И-40 0,230 Па*с.

Количество линейного бутадиен-стирольного термоэластопласта СБС Л 30-01 для ПБВ 40 и ПБВ 60 составило 3,5% масс. Процесс смешения композиций проводился при температуре порядка 150–160 °С. В качестве перемешивающего, диспергирующего и гомогенизирующего оборудования был использован лабораторный диспергатор IKA Ultra-Turrax T25 digital [35].

В первые минуты смешения, после введения в битум пластифицирующих агентов, частота вращения диспергатора была незначительной. Существенного влияния небольшое количество пластификатора на вязкость битума не оказало. Затем на поверхность битумного зеркала небольшими порциями подавали СБС-полимер. Частота вращения ротора при этом оставалась незначительной, поскольку основная задача этого этапа смешения состояла в вовлечении сухих гранул с поверхности в объем вязкой жидкости и обеспечение смачивания поверхности гранул СБС-полимера смесью пластификатора и базового битума. Далее частота вращения ротора была резко увеличена и составляла порядка 5 000 оборотов в мин. На этом этапе в течение 15–20 мин при температуре 80–100 °С происходит дробление крупных агломератов БС ТЭП. Это необходимо для увеличения удельной поверхности частиц полимера и улучшения массообменных процессов твердых полимерных частиц с жидкими компонентами вяжущего. Сам процесс дробления твердых набухающих частиц в высоковязкой среде при повышенных температурах в научных трудах практически не описан. Однако из практики известно, что проведение активной стадии смешения при повышенных оборотах ротора целесообразно именно в первые минуты смешения, пока велика вероятность механического разрушения твердых частиц полимеры в зазоре между ротором и статором диспергатора. Относительно не высокие температуры также способствуют нахождению полимера в вязкотекучем состоянии и повышают вероятность его физического разрушения [36]. Протекающая затем стадия плавления полистирольных блоков и набухания полибутадиеновых цепей препятствует механическому разрушению полимерных составляющих. Заключительная стадия смешения проводилась в течение 180 мин при частоте вращения ротора 800–1000 оборотов в минуту. Ее основная задача – обеспечить набухание как можно большего числа полимерных сегментов с целью образования трехмерной сетчатой полимерной структуры во всем объеме смесового многокомпонентного вяжущего. Для предупреждения преждевременного высокотемпературного переокисления компонентов смеси температура процесса на этой стадии снижается до 80 °С. Показатели полученных таким образом полимерно-битумных вяжущих соответствовали требованиям ГОСТ Р 52056–2003 к маркам ПБВ 40 и ПБВ 60 (см. таблицу 1).

Краткосрочное старение ординарных и полимерно-битумных вяжущих проводилось в соответствии с ГОСТ 33140–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT)» в течение 75 мин при температуре, равной 163 °С, при постоянном обновлении воздуха в печи RTFOT [37].

Определение температуры растрескивания битумных вяжущих различного состава до и после краткосрочного старения было проведено на устройстве ABCD 8.0 в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58400.11–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения температуры растрескивания при помощи устройства ABCD». Необходимо обратить внимание, что определение температуры растрескивания вяжущих в данном случае ведется в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации дорожных вяжущих. При этом человеческий фактор на этапе измерения отсутствует полностью. Воздействие субъективных факторов возможно только на этапе подготовки образцов.

Учитывая все более широкое использование устройства ABCD для определения низкотемпературных свойств вяжущих и его принципиальное отличие от хорошо известных ручных, автоматических и полуавтоматических приборов по определению температуры хрупкости по ГОСТ 11507–78 и ГОСТ 33143–2014, необходимо коротко остановиться на принципе его действия.

Метод основан на значительной разнице коэффициентов теплового расширения исследуемых вяжущих и компонентов измерительной ячейки. Для битумных вяжущих коэффициент теплового расширения составляет порядка $170\text{--}200 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, а для сплавов металлов, моделирующих каменные материалы в составе асфальтобетонной смеси – порядка $\sim 1,2\text{--}24 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Поэтому при понижении температуры образец вяжущего активно сжимается вокруг металлического кольца. Это приводит к развитию в вяжущем термического растяжения. Когда внутренние напряжения превышают прочностные свойства исследуемого образца, то образуется термическая трещина и образец разрушается [10]. В ходе предварительных исследований, проведенных S.-S. Kim, в качестве материала для измерительной части прибора ABCD был выбран сплав инвар, состоящий из никеля (Ni, 36%) и железа (Fe, 64%) [14]. Он обладает уникально низким коэффициентом теплового расширения, который для указанного сплава составляет $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ [10, 11]. Этим объясняется способность изделий из инвара сохранять постоянные геометрические размеры в очень широком диапазоне температур – от минус 90 до плюс 250 °С. Измерительное кольцо помещается в цилиндрическую форму, изготовленную из силиконовой резины, а пространство между ними заполняется горячим исследуемым вяжущим. После охлаждения до комнатной температуры устройство в сборе помещается в криокамеру. Для устройства ABCD 8.0 количество измерительных ячеек составляет 8 шт. (рисунок 1).

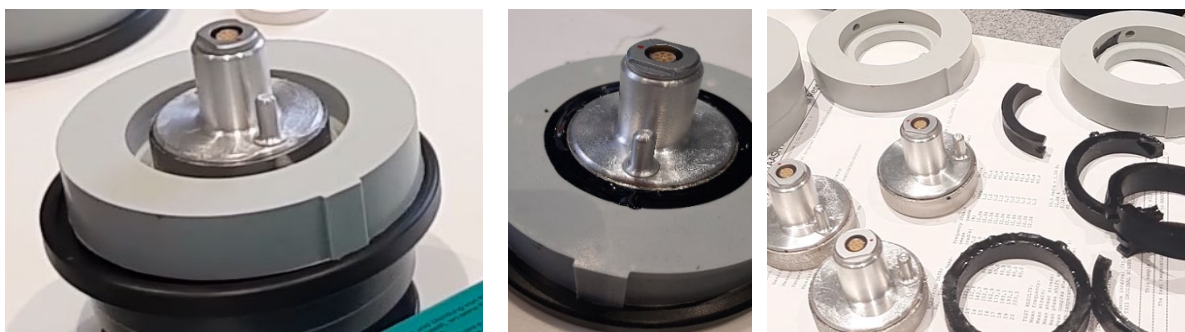


Рисунок 1 – Измерительная ячейка устройства ABCD 8.0 до заливки вяжущего (слева), после заливки вяжущего (в центре), а также после проведения испытаний (справа)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Measuring cell of the ABCD 8.0 device before pouring the binder (left), after pouring the binder (center), as well as after testing (right)
Source: compiled by the authors.

В ходе постепенного понижения температуры битумное вяжущее сжимается, а устройство ABCD в автоматическом режиме регистрирует ряд показателей, включая температуру и уровень механического напряжения в каждой измерительной ячейке. При разрушении сплошности исследуемых образцов устройство фиксирует пиковые значения показателей. Таким образом, могут быть определены предельные значения температурного интервала эксплуатации асфальтобетонных или полимерасфальтобетонных смесей на основе исследуемого вяжущего [38, 39]. Итоговый отчет о результатах низкотемпературных испытаний вяжущих на устройстве ABCD состоит из графической и табличной форм. График представляет собой температурную зависимость деформации исследуемого образца, а в таблице представлены фактические и расчетные показатели, полученные в ходе проведения измерений:

T_{ABCD} – фактическая температура растрескивания образца при испытании;

$T_{раст.}$ – температура растрескивания, рассчитанная с учетом поправочного коэффициента;

ε – скачок напряжения при растрескивании образца (μS);

σ_{AC} – механическое напряжение разрушения образца вяжущего (Па).

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 58400.11–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения температуры растрескивания при помощи устройства ABCD» температура растрескивания ($T_{раст.}$), с учетом поправочного коэффициента, может быть определена по формуле

$$T_{раст.} = 1,07 * T_{ABCD} + 10,9.$$

Исследования по уточнению подхода к оценке точности и выбора поправочного коэффициента при пересчете непосредственно зафиксированного значения T_{ABCD} в фактическую температуру растрескивания битумного вяжущего $T_{раст.}$ в настоящий момент продолжаются [37].

Важным показателем низкотемпературных свойств вяжущих, по мнению S.S.Kim, является механическое напряжение, приводящее к разрушению сплошности образца вяжущего. Для его расчета предложена следующая формула [11]:

$$\sigma_{AC} = K * F_{ABCD} / A_{AC},$$

причем $F_{ABCD} = \varepsilon * E_{ABCD} * A_{ABCD},$

где σ_{AC} – напряжение разрушения образца (Па); F_{ABCD} – величина усилия, возникающего в поперечном сечении кольца в момент образования трещины (Н); A_{AC} – площадь поперечного сечения кольца исследуемого образца (m^2), $A_{AC} = 4,03225 * 10^{-5} m^2$; K – коэффициент концентрации напряжения, $K=2,0$; E_{ABCD} – модуль упругости кольца ABCD (Па), $E_{ABCD} = 140 * 10^9$ Па; A_{ABCD} – площадь сечения кольца из инвара, m^2 , $A_{ABCD} = 2,26451 * 10^{-5} m^2$.

Используемый в формуле параметр скачок деформации – $\varepsilon, (\mu S)$ – представляет собой величину деформации, которую образец высвобождает в момент растрескивания. На указанном типе прибора он фактически определяется как абсолютная разница между значениями деформации датчика устройства ABCD до и после растрескивания исследуемого образца.

При этом расчет напряжения разрушения испытываемого образца вяжущего σ_{AC} предложено вести путем умножения величины скачка деформации, возникающего в момент растрескивания, на коэффициент, равный 0,157.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первым этапом исследования являлось определение низкотемпературных показателей исходных вяжущих различного состава. Для проведения испытаний использовались образцы битумных вяжущих, исходные показатели которых представлены в таблице 1. Были определены низкотемпературные свойства битума нефтяного дорожного вязкого БНД 70/100, а также полимерно-битумных вяжущих ПБВ 40 и ПБВ 60, полученных на основе БНД 70/100. Графическая визуализация поведения вяжущих в ходе понижения температуры до минус 55 °С отражена на рисунке 2. Для каждого из исследованных вяжущих было проведено четыре параллельных измерения фактической температуры растрескивания образцов с дальнейшим определением температур растрескивания ABCD. За результат испытания принималось их среднее значение.

Низкотемпературные показатели исходных битумных вяжущих, полученные экспериментально и рассчитанные в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58400.11–2019, представлены в таблице 2.

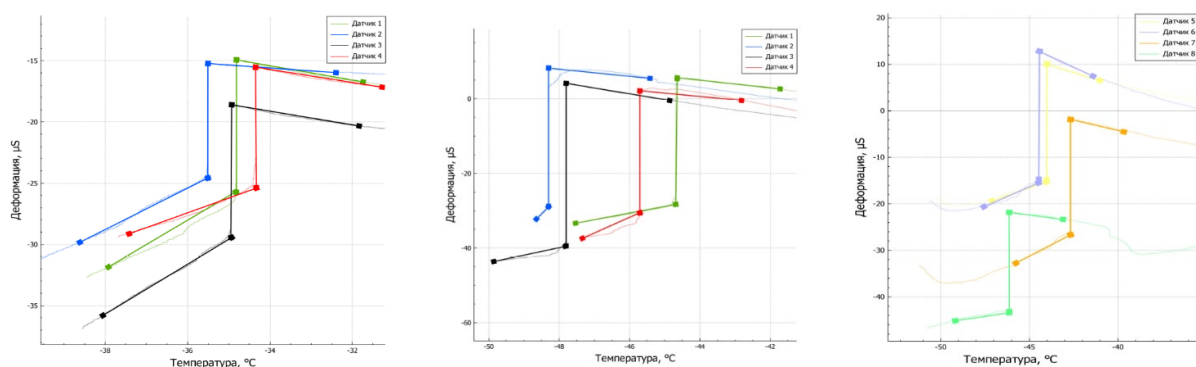


Рисунок 2 – Визуализация зависимостей деформации образцов от температуры
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Visualization of the temperature dependence of deformations of samples
Source: Source: compiled by the authors.

Графические зависимости деформации образцов от температуры позволяют зафиксировать скачки деформации, которые указывает на растрескивание (хрупкое разрушение) образцов.

Представленные на рисунке 2 графики зависимости деформации от температуры для параллельно испытываемых образцов исходного битума близки между собой и значения, разброс значений температур растрескивания не превышает 2,5 °С. Среднее значение температуры растрескивания для четырех использованных образцов составляет минус 34,8 °С (см. таблицу 2).

Среднее значение температуры растрескивания для исследованных образцов ПБВ 40 составляет минус 40,8 °С, разброс значений температур растрескивания не превышает 2,3 °С, что говорит о сходном поведении образцов данного вяжущего при понижении температуры. Это, в свою очередь, подтверждает стабильность свойств данной марки ПБВ по всему объему пробы.

Среднее значение температуры растрескивания для исследованных образцов ПБВ 60 составляет минус 42,7 °С, разброс значений температур растрескивания не превышает 2,3 °С, что говорит о сходном поведении образцов данного вяжущего при понижении температуры. Это также подтверждает стабильность свойств данной марки ПБВ по всему объему пробы (см. таблицу 2).

Представленные в таблице 2 значения напряжений при разрушении разных типов образцов (σ_{AC}) подтверждают, что прочностные показатели в случае полимерно-модифици-

рованных вяжущих превосходят аналогичные значения для базового битума в 2,5–3,5 раза. Характерное изменение температуры растрескивания и увеличение прочностных показателей ПБВ в сравнении с БНД может быть объяснено образованием в объеме вяжущего трехмерной эластомерной сетчатой структуры, способствующей диссипации напряжений, возникающих в результате температурной деформации исследуемого вяжущего в ходе его охлаждения.

Целесообразно также отметить, что скорость охлаждения разных типов образцов, представленная в таблице 2, была практически идентична и разброс абсолютных значений составлял не более 0,2% °С/ч. При этом стандартное отклонение измеряемого показателя (непосредственных показаний температурного датчика в ходе испытаний) в этом случае не превышало 0,12%.

Следующим этапом работы являлось определение низкотемпературных показателей данных вяжущих, подвергнутых краткосрочному старению в соответствии с требованиями ГОСТ 33140–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT)».

Очевидно, что в ходе проведения процесса краткосрочного старения битумных вяжущих, моделирующего стадию изготовления асфальтобетонной и полимерасфальтобетонных смесей, в объеме вяжущего происходят окислительные процессы, являющиеся причиной изменения группового состава и физических свойств битумных вяжущих.

Таблица 2
Низкотемпературные показатели исходных битумных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table 2
Low-temperature parameters of the initial bitumen binders
Source: compiled by the authors.

Номер датчика / показатель	$T_{ABCD}, [^{\circ}C]$	$T_{раст}, [^{\circ}C]$	Скорость охлаждения, $[^{\circ}C/ч]$
исходный БНД 70/100			
1	-43,2	-35,3	20,3
2	-42,4	- 34,5	20,2
3	-41,5	- 33,5	20,1
4	-43,8	- 36,0	20,2
Среднее значение	-42,7	- 34,8	20,2
Максимальное расхождение	2,3	2,5	0,2
исходный ПБВ 40 на БНД 70/100			
1	-48,2	-40,7	20,3
2	-48,9	-41,4	20,2
3	-46,9	-39,3	20,1
4	-49,1	-41,6	20,2
Среднее значение	-48,3	-40,8	20,2
Максимальное расхождение	2,2	2,3	0,2
исходный ПБВ 60 на БНД 70/100			
1	-49,8	-42,4	20,3
2	-50,6	-43,2	20,2
3	-48,9	-41,4	20,1
4	-51,0	-43,7	20,2
Среднее значение	-50,1	-42,7	20,2
Максимальное расхождение	2,7	2,3	0,2

Особенность проведения процесса RTFOT-старения именно полимерно-битумных вяжущих заключается в том, что вследствие их повышенной вязкости, по сравнению с традиционными нефтяными дорожными битумами, увеличивается толщина пленки вяжущего на внутренней поверхности стеклянных колб, в которые помещаются образцы вяжущих в ходе проведения процесса краткосрочного старения. Это затрудняет обновление поверхности пленки вяжущего в ходе вращения барабана с образцами, что может затруднить равномерное окисление вяжущего по всему объему. Исследования, в направлении усовершенствования данных процессов и выявления устойчивых закономерностей в мировой науке продолжатся. Поэтому важно обеспечить полное извлечение и тщательное смешение остатков вяжущих из всех колб по окончании процесса краткосрочного старения и тем самым обеспечить однородность полученного материала до начала дальнейших испытаний

по определению свойств состаренных образцов. Низкотемпературные показатели битумных вяжущих после краткосрочного старения представлены в таблице 3.

Полученные результаты измерений зависимости деформации от температуры для параллельно испытываемых образцов RTFOT-состаренного битума близки между собой, разброс значений температур растрескивания не превышает 2,5 °С. Среднее значение температуры растрескивания для четырех использованных образцов составляет минус 31,0 °С (см. таблицу 3).

Среднее значение температуры растрескивания для исследованных образцов RTFOT-состаренного ПБВ 40 составляет минус 37,2 °С, разброс значений температур растрескивания не превышает 2,0 °С, что говорит о сходном поведении образцов данного вяжущего при понижении температуры. Это, в свою очередь, подтверждает стабильность свойств данной марки ПБВ по всему объему пробы после RTFOT-старения.

Таблица 3
Низкотемпературные показатели RTFOT-состаренных битумных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table 3
Low-temperature indicators of RTFOT-aged bitumen binders
Source: compiled by the authors.

Номер датчика / показатель	T_{ABCD} , [°C]	$T_{раск}$, [°C]	Скорость охлаждения, [°C/ч]
RTFOT-состаренный БНД 70/100			
1	-38,3	-30,3	20,3
2	-37,9	-29,8	20,2
3	-40,2	-32,3	20,1
4	-39,6	-31,7	20,2
Среднее значение	-39,0	-31,0	20,2
Максимальное расхождение	2,3	2,5	0,2
RTFOT-состаренное ПБВ 40 на БНД 70/100			
1	-45,8	-38,2	20,3
2	-45,0	-37,4	20,2
3	-44,6	-37,0	20,1
4	-43,8	-36,2	20,2
Среднее значение	-44,8	-37,2	20,2
Максимальное расхождение	1,9	2,0	0,2
RTFOT-состаренное ПБВ 60 на БНД 70/100			
1	-44,9	-37,3	20,3
2	-47,2	-39,8	20,2
3	-44,7	-37,1	20,1
4	-45,4	-37,9	20,2
Среднее значение	-45,5	-38,0	20,2
Максимальное расхождение	2,3	2,7	0,2

Среднее значение температуры растрескивания для исследованных образцов RTFOT-состаренного ПБВ 60 составляет минус 38,0 °C, разброс значений температур растрескивания не превышает 2,7 °C, что говорит о сходном поведении образцов данного вяжущего при понижении температуры. Это также подтверждает стабильность свойств данной марки ПБВ по всему объему пробы после RTFOT-старения (см. таблицу 3).

Заключительным этапом работы являлось определение низкотемпературных показателей данных вяжущих, подвергнутых долгосрочному старению в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58400.6 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод старения под действием давления и температуры (PAV)»

Очевидно, что в ходе проведения процесса долгосрочного старения битумных вяжущих,

моделирующего основную стадию эксплуатации асфальтобетонной и полимерасфальтобетонных смесей, в объеме вяжущего происходят окислительные процессы, являющиеся причиной изменения группового состава и физических свойств битумных вяжущих. В таблице 4 представлены результаты измерений зависимости деформации от температуры для параллельно испытанных образцов PAV-состаренных вяжущих.

В данном случае разброс значений температур растрескивания не превышает 2,7 °C, а среднее значение температуры растрескивания для четырех исследованных образцов битума составляет минус 27,1 °C (см. таблицу 4).

Среднее значение температуры растрескивания для исследованных образцов PAV-состаренного полимерно-битумного вяжущего ПБВ 40 составляет минус 32,4 °C, разброс значений температур растрескивания не превышает 2,4 °C.

Таблица 4

Низкотемпературные показатели PAV-состаренных битумных вяжущих

Источник: составлено авторами.

Table 4

Low-temperature indicators of PAV-aged bitumen binders

Source: compiled by the authors.

Номер датчика / показатель	$T_{ABCD}, [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{раст}}, [^{\circ}\text{C}]$	Скорость охлаждения, $[^{\circ}\text{C}/\text{ч}]$
PAV-состаренный БНД 70/100			
1	-37,1	-28,8	20,3
2	-34,8	-26,3	20,2
3	-35,4	-27,0	20,1
4	-34,6	-26,1	20,2
Среднее значение	-35,5	-27,1	20,2
Максимальное расхождение	2,5	2,7	0,2
PAV-состаренное ПБВ 40 на БНД 70/100			
1	-40,8	-32,8	20,3
2	-42,0	-34,0	20,2
3	-40,3	-32,2	20,1
4	-38,8	-30,6	20,2
Среднее значение	-40,5	-32,4	20,2
Максимальное расхождение	3,2	2,4	0,2
PAV-состаренное ПБВ 60 на БНД 70/100			
1	-43,3	-35,4	20,3
2	-42,5	-34,6	20,2
3	-44,2	-36,4	20,1
4	-45,0	-37,3	20,2
Среднее значение	-43,8	-35,9	20,2
Максимальное расхождение	2,5	2,7	0,2

Для исследованных образцов PAV-состаренного ПБВ 60 среднее значение температуры растрескивания составляет минус 35,9 °С, а разброс значений температур растрескивания находится в интервале $\pm 2,7$ °С. Узкий доверительный интервал подтверждает стабильность качества исследованного ПБВ 60 после PAV-старения по всему объему вяжущего (см. таблицу 4).

При сопоставлении температуры растрескивания образцов исходных вяжущих, состаренных по методике RTFOT и PAV, необходимо подчеркнуть принципиальную направленность наблюдаемых явлений (рисунок 3).

У исходных вяжущих улучшение низкотемпературных показателей вяжущего при ведении СБС-полимеров составило 22–25% (для ПБВ 60) и 17–19% (для ПБВ 40). После старения в RTFOT изменение температуры

растрескивания для модифицированного вяжущего в сравнении с исходным битумом оставило около 22–24% (для ПБВ 60) и 17–19% (для ПБВ 40).

После PAV-старения изменение температуры растрескивания для модифицированного вяжущего в сравнении с исходным битумом уже превысило 33–35% (для ПБВ 60) и 20–22% (для ПБВ 40), что в очередной раз количественно подтверждает эффективность проведения модификации битумных вяжущих СБС-полимерами и целесообразность их применения для российских климатических условий эксплуатации автомобильных дорог общего пользования. При этом контроль низкотемпературных свойств целесообразно осуществлять на приборе ABCD 8.0 с применением PAV-состаренных образцов, моделирующих эксплуатационное поведение компонентов вяжущего материала.

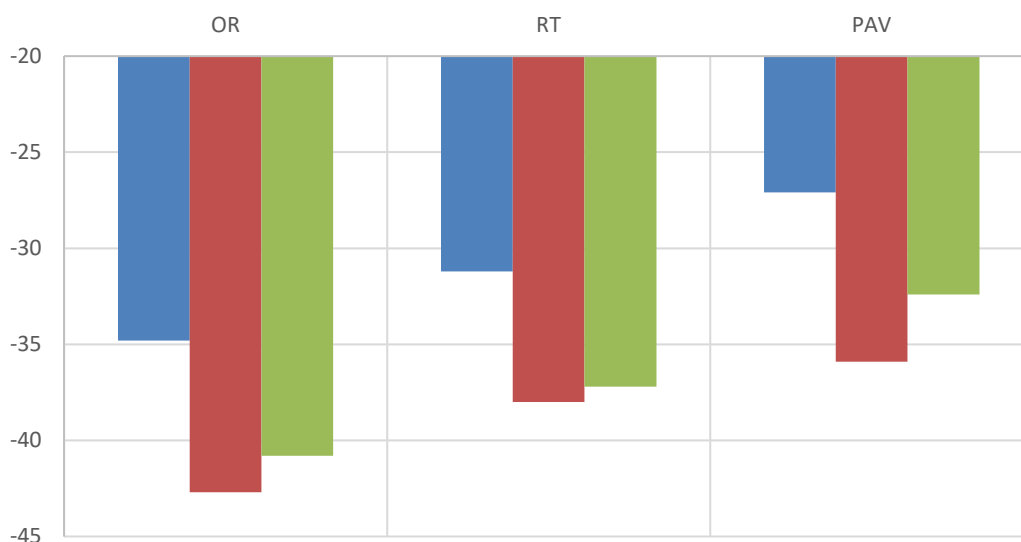
Температура растрескивания на различных этапах
жизненного цикла вяжущих

Рисунок 3 – Диаграмма зависимости температуры растрескивания на различных этапах жизненного цикла: для БНД 70/100 (слева), ПБВ 60 (в центре) и ПБВ 40 (справа)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Diagram of the dependence of the cracking temperature at various stages of the life cycle for BND 70/100 (left), PMB 60 (center) and PMB 40 (right)
Source: compiled by the authors.

Увеличение числа образцов, испытания которых проводятся в идентичных условиях, снижают коэффициент вариации при определении эксплуатационных показателей вяжущих. Использование комплекса ABCD 8.0 вместо прибора ABCD 4.0 позволяет увеличить указанное число образцов в 2 раза.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе работы результаты количественного определения прямым методом эксплуатационных показателей битумных вяжущих при пониженных температурах подтвердили влияние компонентного состава на конечные свойства как исходных, так и RTFOT и PAV-состаренных вяжущих.

При проведении низкотемпературных испытаний образцов, полученных путем введения в исходный битум СБС модификатора совместно с пластифицирующими добавками, наблюдается значительное повышение низкотемпературной устойчивости образцов по сравнению с исходным битумом. Установлены различия в динамике изменения данных свойств в течение жизненного цикла: изменение температуры растрескивания на этапе от исходного до RTFOT у ПБВ 60 на 4,7 °С, а

у ПБВ 40 на 3,4 °С, при этом изменения данного показателя на этапе от RTFOT до PAV составило у ПБВ 60 на 0,6 °С, а у ПБВ 40 на 5,0 °С. Таким образом, для прогнозирования низкотемпературной устойчивости в процессе эксплуатации битумных вяжущих наиболее эффективно использование вяжущих после моделирования длительного старения PAV, что согласуется с общемировыми подходами.

Кроме того, в данном исследовании низкотемпературных свойств вяжущих впервые была показана возможность изучения низкотемпературных показателей с применением отечественного устройства ABCD 8.0. Важно отметить, что сотрудники дорожно-строительной отрасли получают возможность точной и воспроизводимой оценки низкотемпературных свойств вяжущих без предварительного определения широкого круга качественных показателей вяжущего. Это позволит интенсифицировать работу по альтернативному выбору органических вяжущих и аргументированно обосновывать эффективность использования СБС-модифицированных вяжущих с целью увеличения межремонтных сроков службы дорожных покрытий на всей территории Российской Федерации [40].

ВЫВОДЫ

1. Установлены различия в динамике изменения низкотемпературной устойчивости образцов модифицированных вяжущих по сравнению с исходным битумом.

2. Практически обосновано, что для прогнозирования низкотемпературной устойчивости битумных вяжущих целесообразна оценка свойств образцов после длительного старения по методу PAV.

3. Показана возможность изучения низкотемпературных показателей с применением отечественного устройства ABCD 8.0, что позволяет интенсифицировать работу по альтернативному выбору органических вяжущих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пискунов И.В., Рожков И.М., Харпаев А.В., Башкирцева Н.Ю. Основные тенденции в производстве и применении битумных материалов // Нефтепереработка и нефтехимия. 2021. № 11. С. 3-16.

2. Рожков И.М., Симчук Е.Н. Современные подходы при прогнозировании температурных условий эксплуатации асфальтобетонных конструктивных слоев дорожных одежд // Дороги России. 2020. №3 (117). С. 55–71.

3. Колесник Д.А., Пахаренко Д.В. Опыт внедрения системы Superpave на дорогах России // Дорожная держава. 2019. № 88. С.70–75.

4. Olard F., H. Benedetto Di, Eckmann B., Triquigneaux J-P. Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Binders and Mixtures at Low and Intermediate Temperatures // Road Materials and Pavement Design. 2003. Vol. 4, no 1. P. 77-107. DOI: 10.1080/14680629.2003.9689941

5. Budziński, B., Mieczkowski, P., Słowik, M., Mielczarek, M., Bilski, M., Fornalczyk, S. Assessment of the low-temperature performance of asphalt mixtures for bridge pavement. Road Materials and Pavement Design. 2023. Vol. 24 (1), P. 409–423. DOI:10.1080/14680629.2023.2181002

6. Thenoux G., Lees G., Bel, C.A. Laboratory investigation of the Fraass brittle test // Asphalt Technology. 1987. Vol. 10. no 39. P. 34–46.

7. Bueno M., Hugener M., Partl M.N. Low temperature characterization of bituminous binders with a new cyclic shear cooling (CSC) failure test // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 58. P. 16–24. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.101

8. Radziszewski P., Kowalski K.J., Król J.B., Sarnowski M., Piłat J. Quality assessment of bituminous binders based on the viscoelastic properties: Polish experience // Journal of Civil Engineering and Management. 2014. Vol. 20. no 1. P. 111–120. DOI:10.3846/13923730.2013.843586

9. Pyrig Yu. Review of approaches to determining the viscosity-penetration dependence of bituminous binders // Vestnik KHNADU. 2023. Vol. 100. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.113

10. Kim S.-S. Development of an asphalt binder cracking device // Department of Civil Engineering, Ohio University. Athens. Ohio. 2007. 40 p.

11. Kim. S.-S. Direct Measurement of Asphalt Binder Thermal Cracking // ASCE Journal of Materials in Civil Engineering. 2005. vol. 17. no 6, P. 632–639. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:6(632)

12. Nikolaevsky V., Duzhiy P., D. Nebratenko Evaluation of low-temperature properties of mixtures of bitumen and SBS polymers of various topologies by the ABCD method // Military technical courier. 2023. Vol. 71. no 3. P. 711-721. DOI: 10.5937/vojtehg71-44548.

13. Nebratenko DY. Ensuring the confection strength of adhesives based on SBS copolymers of various topologies. Aeronautics and Aerospace Open Access Journal. 2023; 7(4): 110–113. DOI: 10.15406/aaoaj.2023.07.00178.

14. Kim S.S., Wysong, Z., Kovach, J. 2006. Low-temperature thermal cracking of asphalt binder by asphalt binder cracking device // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board Vol. 1962. P. 28–35. DOI: 10.3141/1962-04

15. Небратенко 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.

16. Майданова Н.В., Егоров Д.Е., Боев А.В., Красоткина И.А., Дударева Т.В. Об оценке низкотемпературных свойств битумных вяжущих // Мир дорог. 2022. № 143. С. 64–69.

17. Petersen J.C., Robertson R.E., Branthaver J.F., Harnsberger P.M., Duvall J.J., Kim S.-S., A. Anderson, D.W. Christiansen, Bahia H.U. Binder characterization and evaluation // SHRP. National Research Council. 1994, Vol.1. 161 p.

18. Berlin A.A., Nikolskiy V.G., Krasotkina I.A., Dudareva T.V., Gorbarova V.N., Gordeeva I.V., Sorokin A.V., Lobachev V.A., Dubina S.I., Sinkevich M.Yu. Rubber and rubber-polymer modifiers of asphalt concrete mixtures produced by method of high-temperature shear grinding. Part 3. Evaluation of modification efficiency // Polymer Science. Series D. 2022, Vol. 15, no, P.71-78 DOI: 10.1134/S199542122201004X 2022

19. Hesp S.A. M., Soleimani A., Subramani S., Phillips T., Smith D., Marks P., Tam K.K. Asphalt pavement cracking: analysis of extraordinary life cycle variability in eastern and northeastern Ontario // International Journal of Pavement Engineering. 2009. Vol. 10 no 3. P. 209–227. DOI:10.1080/10298430802343169 DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121758

20. Hoare T., Hesp S. Low-Temperature Fracture Testing of Asphalt Binders: Regular and Modified Systems // Transportation Research Record. 2000. Vol. 1728, P. 36-42

21. Teltayev B, Amirbayev E, Radovskiy B. Evaluating the Effect of Polymer Modification on the Low-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder. Polymers (Basel). 2022 Jun 22;14(13):2548. DOI: 10.3390/polym14132548. PMID: 35808594; PMCID: PMC9269331.

22. Basu A., Marasteanu M.O., Hesp S.A. M. Time-temperature superposition and physical hard-

ening effects in low-temperature asphalt binder grading. *Transportation Research Record // Journal of the Transportation Research Board*. 2003. Vol. 1829. no 1. P. 42–59.

23. Gordeeva I.V., Naumova Yu.A., Nikol'skii V.G., Krasotkina I.A., Dudareva T.V. Analysis of Flow Curves of Modified Bitumen Composites // *Polymer Science, Series D*. 2020. Vol. 13. no. 2. P. 151–156

24. S. Hesp An improved low-temperature asphalt binder specification method. Final report, NCHRP-IDEA contract 84 and Ministry of Transportation Ontario Contract 9015- A-000190, 2003.

25. Xu J., Xia T., Yin B., Yang M. Effect of MDI on the structure and properties of SBS modified bitumen // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 250. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118911

26. Gong Y., Xu J., Chang R., Yan Er. Effect of water diffusion and thermal coupling condition on SBS modified asphalts' surface micro properties // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 273. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121758

27. Guo F., Pei J., Zhang J., Li R., Liu P., Wang D. Study on Adhesion Property and Moisture Effect between SBS Modified Asphalt Binder and Aggregate Using Molecular Dynamics Simulation // *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 6912, P. 2–13. DOI:10.3390/ma15196912.

28. Bahia H.U., Hislop W.P., Zhai H., Rangel A. Classification of Asphalt Binders Into Simple and Complex Binders // *Materials*. 1998. Vol. 67. P. 1.

29. Пискунов И.В., Рожков И.М., Харпаев А.В. Вопросы оценки температурных условий и применения вяжущих в разных климатических зонах // *Дороги. Инновации в строительстве*. 2021. № 96. С. 56–62.

30. Morales R., Bahia H.U. Developing Simple Binder Indices for Cracking Resistance of Asphalt Binders at Intermediate and Low Temperatures // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2018. DOI: 10.1177/0361198118792999

31. Фирсова А.В., Карманова О.В., Ситникова В.В., Блинов Е.В. Бутадиен- α -метилстирольный термоэластопласт, синтез и свойства // *Вестник ВГУИТ*. 2016. № 2. С. 218–222. DOI:10.20914/2310-1202-2016-2-218-222.

32. 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)

33. Исаков А.М., Небрятенко Д.Ю. Об организации научно-исследовательского сектора при работе по методологии SUPERPAVE // *Вестник КРСУ*. 2020. Т. 20, № 12. С. 111–117.

34. Шамуратов Ж.У. Анализ методов и средств вискозиметрии // *Вестник научно-технического развития*. 2022. №167. С.54–69.

35. A. Müller-Rappard Ultra-Turax, ein Dispergiergerät für die homöopathische Praxis // *Allgemeine Zeitung* 2007. Vol. 222(01): 15–18. DOI: 10.1055/s-2006-935797

36. Небрятенко Д.Ю. Вяжущие от СИБУРа // *Автомобильные дороги*. 2009. № 9. С.54–55.

37. Симчук Е.Н., Харпаев А.В., Рожков И.М. Современные подходы к моделированию старения битумных вяжущих материалов в лабораторных условиях // *Дороги и мосты*. 2022. № 2 (48). С. 274–306.

38. Лушников Н.А., Савицкий В.В., Николаевский В.Е., Есипов И.А. Применение метода ABCD при оценке низкотемпературных свойств вяжущих // *Автомобильные дороги*. 2023. № 1 (1094). С. 110–113.

39. Жданов К.А., Калгин Ю.И., Симчук Е.Н. Характеристики теплых асфальтобетонных смесей для расчета дорожных конструкций // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2023. № 3(71). С. 74–83.

40. Тюкилина П.М., Поздняков В.В., Андреев А.А., Егоров А.Г., Гуреев А.А., Соловьев Р.Е., Харпаев А.В. Комплексная физико-химическая модификация нефтяных дорожных битумов // *Башкирский химический журнал*. 2021. № 4 (28). С. 44–55.

REFERENCES

1. Piskunov I.V., Rozhkov I.M., Khapaev A.V., Bashkirtseva N.Yu. Main trends in the production and application of bituminous materials. *Neftepererabotka i neftehimija*. 2021; № 11: 3–16. (In Russ.)

2. Rozhkov I.M., Simchuk E.N. Modern approaches in predicting the temperature conditions of operation of asphalt concrete structural layers of road clothes. *Dorogi Rossii*. 2020; 3 (117): 55–71. (In Russ.)

3. Kolesnik D.A., Paharenko D.V. The experience of implementing the Superpave system on the roads of Russia. *Dorozhnaja derzhava*. 2019; 88: 70–75. (In Russ.)

4. Olard F., H. Benedetto Di, Eckmann B., Triquigneaux J-P. Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Binders and Mixtures at Low and Intermediate Temperatures. *Road Materials and Pavement Design*. 2003; Vol. 4, no 1: 77–107, DOI: 10.1080/14680629.2003.9689941

5. Budziński B., Mieczkowski, P., Słowik, M., Mielczarek, M., Bilski, M., Fornalczyk, S. Assessment of the low-temperature performance of asphalt mixtures for bridge pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2023; Vol. 24 (1): 409–423. DOI: 10.1080/14680629.2023.2181002

6. Thenoux G., Lees G., Bel, C.A. Laboratory investigation of the Fraass brittle test. *Asphalt Technology*. 1987. Vol. 10. no 39. P. 34–46.

7. Bueno M., Hugener M., Partl M.N. Low temperature characterization of bituminous binders with a new cyclic shear cooling (CSC) failure test. *Construction and Building Materials*. 2014; Vol. 58: 16–24. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.101

8. Radziszewski P., Kowalski K.J., Król J.B., Sarnowski M., Piłat J. Quality assessment of bituminous binders based on the viscoelastic properties: Polish experience // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2014. Vol. 20. no 1. P 111–120/ DOI: 10.3846/13923730.2013.843586

9. Pyrig Yu. Review of approaches to determining the viscosity-penetration dependence of bituminous binders. *Vestnik KHNADU*. 2023; Vol. 100, DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.113
10. Kim S.-S. Development of an asphalt binder cracking. *Department of Civil Engineering*, Ohio University. Athens, Ohio. 2007; 40.
11. Kim. S.-S. Direct Measurement of Asphalt Binder Thermal Cracking. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. 2005; vol. 17. no 6: 632–639. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:6(632)
12. Nikolaevsky V., Duzhiy P., D. Nebratenko Evaluation of low-temperature properties of mixtures of bitumen and SBS polymers of various topologies by the ABCD method. *Military technical courier*. 2023; Vol. 71. no 3: 711–721. DOI: 10.5937/vojtehg71-44548.
13. Nebratenko DY. Ensuring the confection strength of adhesives based on SBS copolymers of various topologies. *Aeronautics and Aerospace Open Access Journal*. 2023; 7(4): 110–113. DOI: 10.15406/aaoaj.2023.07.00178.
14. Kim S.S.; Wysong, Z.; Kovach, J. 2006. Low-temperature thermal cracking of asphalt binder by asphalt binder cracking device. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1962: 28–35. DOI: 10.3141/1962-04
15. Nebratenko D.Yu. ABCD – a method for evaluating the low-temperature behavior of road binders. *Engineering and Construction of the Caspian Region*. 2022; № 1: 37–41. DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-37-41 (In Russ.).
16. Maidanova N.V., Egorov D.E., Boev A.V., Krasotkina I.A., Dudareva T.V. On the assessment of low-temperature properties of bitumen binders. *Mir dorog*. 2022; № 143: 64–69. (In Russ.).
17. Petersen J.C., Robertson R.E., Branthaver J.F., Harnsberger P.M., Duvall J.J., Kim S.-S., A. Anderson, D.W. Christiansen, Bahia H.U. Binder characterization and evaluation. *SHRP. National Research Council*. 1994; Vol.1: 161.
18. Hesp S.A. M., Genin S.N., Scafe D., Shurvell H.F., Subramani S. Five-year performance review of a northern Ontario pavement trial: validation of Ontario's double-edge-notched tension (DENT) and extended bending beam rheometer (BBR) test methods. *54-th Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*. 2009; T.1: 12–13
19. Hesp S.A.M., Soleimani A., Subramani S., Phillips T., Smith D., Marks P., Tam K.K. Asphalt pavement cracking: analysis of extraordinary life cycle variability in eastern and northeastern Ontario. *International Journal of Pavement Engineering*. 2009; Vol. 10 no 3: 209–227. DOI:10.1080/10298430802343169 DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121758
20. Hoare T., Hesp S. Low-Temperature Fracture Testing of Asphalt Binders: Regular and Modified Systems. *Transportation Research Record*. 2000; Vol. 1728: 36–42.
21. Teltayev B., Amirbayev E., Radovskiy B. Evaluating the Effect of Polymer Modification on the Low-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder. *Polymers (Basel)*. 2022 Jun 22; 14(13): 2548. DOI: 10.3390/polym14132548. PMID: 35808594; PMCID: PMC9269331.
22. Basu A., Marasteanu M.O., Hesp S.A. M. Time-temperature superposition and physical hardening effects in low-temperature asphalt binder grading. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*. 2003; Vol. 1829. no 1: 42–59.
23. Gordeeva I.V., Naumova Yu.A., Nikol'skii V.G., Krasotkina I.A., Dudareva T.V. Analysis of Flow Curves of Modified Bitumen Composites. *Polymer Science, Series D*. 2020; Vol. 13. no 2: 151–156.
24. S. Hesp An improved low-temperature asphalt binder specification method. Final report, NCHRP-IDEA contract 84 and Ministry of Transportation Ontario Contract 9015-A-000190, 2003.
25. Xu J., Xia T., Yin B., Yang M. Effect of MDI on the structure and properties of SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*. 2020; Vol. 250: 1–8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118911
26. Gong Y., Xu J., Chang R., Yan Er. Effect of water diffusion and thermal coupling condition on SBS modified asphalts' surface micro properties. *Construction and Building Materials*. 2020; Vol. 273. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121758
27. Guo F., Pei J., Zhang J., Li R., Liu P., Wang D. Study on Adhesion Property and Moisture Effect between SBS Modified Asphalt Binder and Aggregate Using Molecular Dynamics Simulation. *Materials*. 2022; Vol. 15: 6912, P. 2–13. DOI:10.3390/ma15196912.
28. Bahia H.U., Hislop W.P., Zhai H., Rangel A. Classification of Asphalt Binders Into Simple and Complex Binders. *Materials*. 1998; Vol. 67: P. 1.
29. Piskunov I.V., Rozhkov I.M., Harpaev A.V. Issues of assessment of temperature conditions and application of binders in different climatic zones. *Dorogi. Innovacii v stroitel'stve*. 2021; 96: 56–62. (In Russ.).
30. Morales R., Bahia H.U. Developing Simple Binder Indices for Cracking Resistance of Asphalt Binders at Intermediate and Low Temperatures. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2018. DOI: 10.1177/0361198118792999
31. Firsova A.V., Karmanova O.V., Sitnikova V.V., Blinov E.V. Synthesis and properties of butadiene-alpha-methylstyrene thermoplastic elastomer. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2016; № 2: 218–222 (in Russ.). DOI:10.20914/2310-1202-2016-2-218-222
32. 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)
33. Isakov A.M., Nebratenko D.Ju. About the organization of the research sector when working on the SUPERPAVE methodology. *Vestnik KRSU*. 2020; T. 20. no 12: 111–117. (In Russ.).
34. Shamuratov J.U. Analysis of methods and means of viscometry. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya*. 2022; no 167; 54–69. (In Russ.)

35. A. Müller-Rappard Ultra-Turrax, ein Dispergiergerät für die homöopathische Praxis. *Allgemeine Zeitung* 2007. Vol. 222(01): 15–18. DOI: 10.1055/s-2006-935797

36. Nebratenko D.Ju. Binders from SIBUR. *Avtomobil'nye dorogi*. 2009; 9: 54–55. (In Russ.).

37. Simchuk E.N., Harpaev A.V., Rozhkov I.M. Modern approaches to modeling the aging of bitumen binders in laboratory conditions. *Dorogi i mosty*. 2022; no 2: 274–306. (In Russ.).

38. Lushnikov N.A., Savitsky V.V., Nikolaevsky V.E., Esipov I.A. Application of the ABCD method in the assessment of low-temperature properties of binders. *Avtomobil'nye dorogi*. 2023; 1 (1094): 110–113. (In Russ.).

39. Zhdanov K.A., Kalgin Ju. I., Simchuk E.N. Characteristics of warm asphalt concrete mixtures for the calculation of road structures. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 3(71): 74–83. (In Russ.).

40. Tjukilina P.M., Pozdnjakov V.V., Andreev A.A., Egorov A.G., Gureev A.A., Solov'ev R.E., Harpaev A.V. Complex physico-chemical modification of petroleum road bitumen. *Bashkir chemistry journal (Bashkirskii khimicheskii zhurnal)*. 2021; 4: 44–55. (In Russ.).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Рожков И.М. Постановка проблемы, критический анализ литературы, сбор статистических данных, табличное и графическое представление результатов и формирование выводов исследования.

Харпаев А.В. Выбор методологии и методов исследования. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов.

Небрatenко Д.Ю. Разработка концепции статьи, формулировка научных гипотез и выводов исследования.

Кретов В.А. Научное руководство исследованием, формулировка научных гипотез.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Ivan M. Rozhkov. Problem statement, critical analysis of the literature, collection of statistical data, tabular and graphical representation of the results and formation of conclusions of the study.

Andrei V. Harpaev. The choice of methodology and research methods. Performing experimental studies, processing the results.

Dmitrii Yu. Nebratenko. Development of the concept of the article, formulation of scientific hypotheses and conclusions of the study.

Valery A. Kretov. Scientific management of research, formulation of scientific research.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рожков Иван Михайлович – руководитель лаборатории битумных вяжущих материалов, герметиков и мастик, Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса (111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, стр.

16.), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-9811-4534>, **SPIN-код:** 3146-6556, e-mail: extralab@mail.ru

Харпаев Андрей Вальерьевич – заместитель руководителя лаборатории битумных вяжущих материалов, герметиков и мастик, Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса (111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, стр. 16.), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-2793-6148>, e-mail: bitumbinder@mail.ru

Небрatenко Дмитрий Юрьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты», Российский университет транспорта (127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9); доц. кафедры «Химия и технология переработки эластомеров» МИРЭА-Российский технологический университет (119454, г. Москва, пр. Вернадского, дом 78), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3607-8876>, **SPIN-код:** 8398-9130, **Scopus Author ID:** 57655960600, **Researcher ID:** ACW-3832-2022, e-mail: nebratenko@mail.ru

Кретов Валерий Андреевич – д-р. техн. наук, проф., проф. кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты», Российский университет транспорта (127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-1784-4087>, e-mail: cadimost@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan M. Rozhkov. Head of the Laboratory of Bituminous Binders, Sealants and Mastics, Research Institute of Transport and Construction Complex (73A Aviamotornaya St., page 16, Moscow, 111024), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-9811-4534>, **SPIN-код:** 3146-6556, e-mail: extralab@mail.ru

Andrei V. Harpaev. Deputy Head of Laboratory of Bituminous Binders, Sealants and Mastics, Research Institute of Transport and Construction Complex (111024, Moscow, 73A Aviamotornaya St., page 16.), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-2793-6148>, e-mail: bitumbinder@mail.ru

Dmitrii Yu. Nebratenko. Cand. of Sci., Associate Professor of the Automobile roads, aerodromes, bases and foundations Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, Obraztsova str. 9, p. 9, p. 9); Associate Professor of the "Chemistry and technology of elastomer processing Department, MIREA-Russian Technological University (119454, Moscow, Vernadskogo avenue, 78, p. 9). 9); Associate Professor, Chemistry and Technology of Elastomer Processing Department, MIREA-Russian Technological University (119454, Moscow, Vernadskogo Avenue, 78), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3607-8876>, **SPIN-code:** 8398-9130, **Scopus Author ID:** 57655960600, **Researcher ID:** ACW-3832-2022, e-mail: nebratenko@mail.ru

Valerii A. Kretov. Dr. of Sci., Professor, Professor of the Automobile Roads, Aerodromes, Bases and Foundations Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, Obraztsova str. 9, p. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-1784-4087>, e-mail: cadimost@mail.ru