

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 625.85.06

DOI: 10.34708/GSTOU.2022.40.59.007

ОЦЕНКА СВОЙСТВ ДОРОЖНЫХ ВЯЖУЩИХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ МЕТОДОМ ABCD

© ¹Е. В. Лебедев, ²Б. А. Зуров, ³М. М. Высоцкий, ^{3,4}Д. Ю. Небрatenко

¹Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Россия

²ООО «ТРАНСКОМ», п. Свен-Транспортная, Россия

³Российский университет транспорта, Москва, Россия

⁴МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

В статье рассматривается возможность применения нового прямого метода определения температуры трещиностойкости битумных вяжущих (ABCD), который позволяет в экспериментах, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации, оценить влияние природно-климатических параметров на комплекс низкотемпературных свойств вяжущих и покрытий на их основе. Метод ABCD уже принят в качестве стандартного метода испытаний низкотемпературных свойств битумных и, в первую очередь, полимерно-битумных вяжущих в России, Европе и Северной Америке. Представленные в данном исследовании результаты количественного определения показателей работоспособности битумных вяжущих различных составов при низких температурах прямым методом полностью подтверждают ранее выдвинутые предположения о необходимости физико-химического обоснования применимости точных методов в дорожной отрасли. Полученные данные показали существенную корреляцию низкотемпературных показателей, вяжущих с составом и структурой используемых бутадиен-стирольных термоэластопластов.

Ключевые слова: метод определения низкотемпературных свойств битумных вяжущих (ABCD), бутадиен-стирольные термоэластопласты (СБС-полимеры), полимерно-битумные вяжущие (ПБВ).

Материалы перерабатывающих отраслей представляют большой интерес для промышленного и гражданского строительства Российской Федерации [1]. Строительные материалы широкого спектра применения разрабатываются в том числе с учетом возможности использования для их производства остаточных продуктов переработки или отходов производственной деятельности смежных отраслей народного хозяйства [2, 3]. Долгое время такими продуктами считались дорожные битумы. Однако существенно изменившиеся за последние 20 лет условия эксплуатации автомобильных дорог и продолжающиеся природно-климати-

ческие трансформации в разных регионах Земли требуют более внимательного отношения к оценке качественных показателей битумных вяжущих.

Образование поверхностных трещин в асфальтобетоне при низких температурах является одним из основных дефектов дорожного покрытия. Понижение температуры может вызвать самопроизвольное растрескивание асфальтобетонного покрытия, что приводит к нарушению бесперебойного движения автотранспорта и необходимости дорогостоящего ремонта. В Российской Федерации в таких природно-климатических зонах находится бо-

лее 90% территорий. Поэтому крайне важно использовать модифицирующие свойства различных химических соединений для направленного регулирования качественных показателей дорожных вяжущих [4].

Это относится и к низкотемпературному растрескиванию асфальтобетонного покрытия, вызываемому термической усадкой при охлаждении до предельных температур, соответствующих природно-климатическим условиям эксплуатации дорог в различных регионах нашей страны. Указанное явление наблюдается тогда, когда термические растягивающие напряжения, возникающие в результате перепада температур внутри асфальтобетона (битумного вяжущего), превышают прочность многокомпонентного материала при данной температуре.

Традиционно под растрескиванием понимают поперечные трещины, возникающие на примерно одинаковых расстояниях под прямым углом к направлению движения [5]. Термическое растрескивание традиционно контролируется путем снижения жесткости битумных вяжущих, предполагая, что вяжущие с большей жесткостью будут растрескиваться при более высоких температурах, чем более мягкие вяжущие [6].

Между тем на современном этапе особую актуальность приобретает внедрение инновационных технологий и строительных материалов, которые увеличивают сроки эксплуатации сооружений, снижают стоимость содержания и ремонта [7].

Одним из наиболее перспективных решений следует считать модификацию традиционных окисленных битумов нефтяных дорожных вязких полимерами класса бутадиен-стирольных термоэластопластов в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52056-2003 «Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блок-сополимеров типа стирол-бутадиен-стирол. Технические условия».

При смешении гранул термоэластопласта с нефтяным битумом и повышении температуры многокомпонентной композиции до уровня, превышающего температуру плавления СБС-полимеров на 20-40 °С, происходит поверхностное поглощение полимером мальтенов (масляных фракций и низкомолекуляр-

ных смол) из состава битума. Это приводит к значительному набуханию полимерных макромолекул и частичному разворачиванию глобул во всем объеме битумного вяжущего. За счет этого в 7-9 раз происходит увеличение объема набухшего термоэластопласта относительно первоначальных размеров его сухой полимерной частицы [8, 9]. Дисперсная фаза битума при этом обедняется маслами и низкомолекулярными смолами, что приводит к снижению абсолютного значения температуры хрупкости вяжущего и, в итоге, к повышению вероятности охрупчивания асфальтобетонной системы при относительно высоких температурах [6, 8]. Применение пластификатора позволяет компенсировать потери в составе дисперсной фазы и восстановить групповой химический состав битума, ускорить процесс распределения высокомолекулярных соединений в дисперсионной среде битума, снизить энергозатраты на смешивание компонентов и, в результате, достигнуть требуемого уровня качественных показателей вяжущего, соответствующих условиям эксплуатации дорожных покрытий [10, 11].

Следует, однако, отметить, что решить проблему повышения качества и срока службы дорожных асфальтобетонных покрытий только за счет применения модифицированных битумов невозможно. Эта проблема требует комплексного решения, а именно: обеспечения капитальности и надежности дорожной одежды; обеспечения требуемого водно-теплового режима земляного полотна; применения качественных заполнителей и наполнителей в асфальтобетонных смесях; соблюдения технологических режимов при изготовлении асфальтобетонных смесей и строительстве дорожных покрытий [6].

При этом для суровых природно-климатических условий России наиболее остро встает вопрос контролирования именно эксплуатационных свойств вяжущих и покрытий на их основе, гарантирующий безремонтный срок службы автомобильных дорог в реальных условиях различных регионов страны.

На сегодняшний день не существует прямого метода, который мог бы обоснованно подтвердить, что низкотемпературные свой-

ства можно точно определить на основании испытаний, проведенных при гораздо более высоких температурах. Эксплуатация дорожных покрытий в осенне-зимний период практически на всей территории Российской Федерации ведется при отрицательных температурах, как правило, ниже -20°C . При этом известно, что практически все отраслевые показатели каменных заполнителей и вяжущих материалов определяются при комнатной температуре.

Поэтому в ходе длительных исследований, направленных на изучение битумных вяжущих, профессором кафедры гражданского строительства Университета Огайо доктором наук Ким Санг-Су и его коллегами был разработан метод оценки низкотемпературных свойств дорожных битумов – метод ABCD (Asphalt Binder Cracking Device) [12]. Для дорожной отрасли это принципиально новый метод испытаний, который определяет потенциал низкотемпературного растрескивания битумного вяжущего без предварительного знания реологических свойств, прочности на разрыв, коэффициента теплового расширения и сжатия и т. п. [13].

Если рассматривать поведение дорожного покрытия в реальных условиях эксплуатации, то при понижении температуры происходит усадка и растрескивание асфальтобетонного

покрытия и, прежде всего, битумного вяжущего. При определенных условиях в составе дорожной одежды происходит нарушение монолитности слоя клея между каменными заполнителями. На этом принципе построено испытание по методу ABCD. Образец битумного (или полимерно-битумного) вяжущего выдерживают при постепенном снижении температуры, вызывая аналогичное тепловое сжатие до момента образования поперечной трещины [14].

Далее, на примере использования СБС-полимеров различной молекулярной структуры методом ABCD показано их влияние на низкотемпературные свойства смесей на основе окисленных нефтяных дорожных битумов.

В качестве исследуемого битумного вяжущего использовались промышленно выпускаемые нефтяные окисленные битумы дорожные БНД 60/90 (ГОСТ 22245-90) и БНД 70/100 (ГОСТ 33133-2014), произведенные на одном из нефтеперерабатывающих заводов, расположенных в Приволжском федеральном округе (табл. 1).

С учетом продолжающегося переходного периода, подразумевающего возможность производства на НПЗ битумов нефтяных дорожных вязких по ГОСТ 22245-90 и ГОСТ 33133-2014, для исследований были использо-

Таблица 1
Физико-механические свойства вязких нефтяных дорожных битумов

№ п/п	Наименование показателя	БНД 60/90	БНД 70/100	Методы испытаний
1	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 25°C	78	90	ГОСТ 11501 / ГОСТ 33136
2	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 0°C	26	34	ГОСТ 11501 / ГОСТ 33136
3	Растяжимость, см, при 25°C ,	74	90	ГОСТ 11505 / ГОСТ 33138
4	Растяжимость, см, при 0°C ,	3,9	5,5	ГОСТ 11505 / ГОСТ 33138
5	Температура размягчения по кольцу и шару, $^{\circ}\text{C}$	51	50	ГОСТ 11506 / ГОСТ 33142
6	Температура хрупкости, $^{\circ}\text{C}$	-16	-18	ГОСТ 11507 / ГОСТ 33143
7	Температура вспышки, $^{\circ}\text{C}$	264	271	ГОСТ 4333 / ГОСТ 33141

ваны репрезентативные образцы из промышленных партий с одного нефтеперерабатывающего завода, паспортизованные по двум национальным стандартам, указанным ранее.

В качестве модифицирующих агентов в ходе исследования были применены бутадиен-стирольные термоэластопласты производства ПАО «Нижекамскнефтехим»: SBS-330L – линейной структуры и SBS-330B – разветвленной структуры. Это новые для российского рынка СБС-полимеры, крупнотоннажное производство которых на мощностях данного завода начато несколько месяцев назад. Поэтому в качестве объектов исследования они представляют собой еще больший интерес в сравнении с традиционным для России дивинил-стирольным термоэластопластом ДСТ 3001, более тридцати лет синтезируемым на АО «Воронежсинтезкаучук». Для модификации вяжущего СБС-полимеры вводились в исходный битум, нагретый до 160 °С, равномерными порциями в количестве 3% масс. Перемешивание в первые 15 минут проводилось высокоскоростным лабораторным диспергатором. Затем в течение 3 часов проходила стадия вызревания при перемешивании тихоходной погружной мешалкой. Свойства конечных композиций оценивались на соответствие требованиям действующего национального стандарта ГОСТ Р 52056-2003. В указанном национальном стандарте хрупкость вяжущего определяется по ГОСТ 11506-73 «Битумы нефтяные. Метод определения температуры размягчения по кольцу и шару», являющим-

ся косвенным методом определения низкотемпературных свойств битумных вяжущих. Для получения более объективной информации в работе был использован прибор ABCD, предназначенный для проведения исследований ООО «Инфратест», г. Москва.

В современной практике прибор ABCD является одним из немногих приборов, осуществляющих определение искомых показателей, вяжущих не косвенным, а прямым методом. Этим он существенно отличается от широко известных приборов по методу «Кольцо и шар», регламентированных ГОСТ 11506-73 и ГОСТ 33142-2014.

Измерительная часть прибора ABCD состоит из металлического кольца, оснащенного датчиками температуры и деформации, которые помещены в силиконовую форму (рисунок 1). После того как нагретое битумное вяжущее заливается в зазор вокруг кольца и застывает, образцы (один контрольный и три опытных) помещаются в криокамеру. Затем 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» проводится процесс постепенного равномерного охлаждения внутреннего объема криокамеры вместе с измерительными частями прибора ABCD сначала со скоростью 20 °С/час, а затем со скоростью 40 °С/час до наступления момента трещинообразования (в данном случае не ниже –50 °С).



Рис. 1. Измерительная часть прибора ABCD до и после проведения испытаний

Таблица 2

Низкотемпературные параметры исследуемых вяжущих

Вяжущее	Температура растрескивания ABCD, °C	Температура хрупкости по Фраасу, °C	Скачок деформации, мс	Разрушающее напряжение, МПа
БНД 60/90	–34,31	–16	16,14	2,54
БНД 70/100	–36,41	–18	16,58	2,61
ПБВ 60 на SBS-330L	–44,96	–24	31,27	5,05
ПБВ 60 на SBS-330B	–41,14	–22	20,05	3,48

При понижении температуры битумное вяжущее сжимается сильнее, чем металлическое кольцо из инвара. Инвар – это специальный сплав, состоящий из никеля (Ni, 36%) и железа (Fe, 64%). Он выбран в качестве основного материала для изготовления металлического кольца, так как обладает уникально низким коэффициентом теплового расширения. Коэффициент теплового расширения инвара составляет всего $1,2 \cdot 10^{-6}$ °C. Это позволяет изделиям из него сохранять неизменными свои геометрические размеры в самом широком диапазоне температур – от минус 90 до плюс 250°C.

Тепловые деформации при охлаждении приводят к изменению жесткости, прочности и коэффициента теплового сжатия битумного или полимерно-битумного вяжущего. При этом автоматически регистрируются температура и уровень напряжения, при котором нарушается сплошность исследуемых образцов. Эта информация позволяет достоверно определить степень пригодности вяжущего данного типа для использования его в ходе строительства или ремонта дорожных покрытий, обеспечивая долговечность, необходимую для температурных условий последующей эксплуатации, ожидаемых в конкретном регионе Российской Федерации.

Все полученные в ходе проведения результаты автоматически фиксируются, регистрируются и выводятся на экран монитора для визуализации процесса низкотемпературного растрескивания, что позволяет персоналу лаборатории оперативно реагировать на происходящие изменения.

Результаты измерения исследуемых параметров, отражающие низкотемпературные

свойства дорожных битумных вяжущих различных типов, в том числе содержащих линейные и разветвленные СБС-полимеры, представлены в таблице 2.

Образование эластичной пространственной полимерной сетки бутадиен-стирольными термоэластопластами за счет набухания блоков СБС-полимера в мальтеновой фазе битума способствует релаксации растягивающих термических напряжений и приводит к снижению как температуры растрескивания ABCD, так и температуры хрупкости по Фраасу (таблица 2).

Рассеиванием деформаций, возникающих в результате температурных напряжений в объеме вяжущего, благодаря наличию взаимопроникающей эластомерной сетки ПБВ, можно объяснить снижение температуры растрескивания для ПБВ по методу ABCD на 15-30% по сравнению с данными для БНД.

Из графика, представленного на рис. 2, видно, что при понижении температуры ниже –30 °C в объеме полимерно-битумного вяжущего происходит накопление уже значительного объема остаточных деформаций, рассеиванию которых в эластичных блоках бутадиен-стирольных термоэластопластов препятствует низкая скорость релаксационных процессов. Поэтому при критической температуре (–41,14 °C) наблюдается скачок деформации (20,05 мс) и нарушение непрерывности массива вяжущего (рис. 1).

Таким образом, конструкция устройства ABCD позволяет изучать как кинетику изменения температуры пленки битумного вяжущего, так и определять функцию отклика изменения прочностных свойств вяжущей массы при понижении температуры окружающей среды.

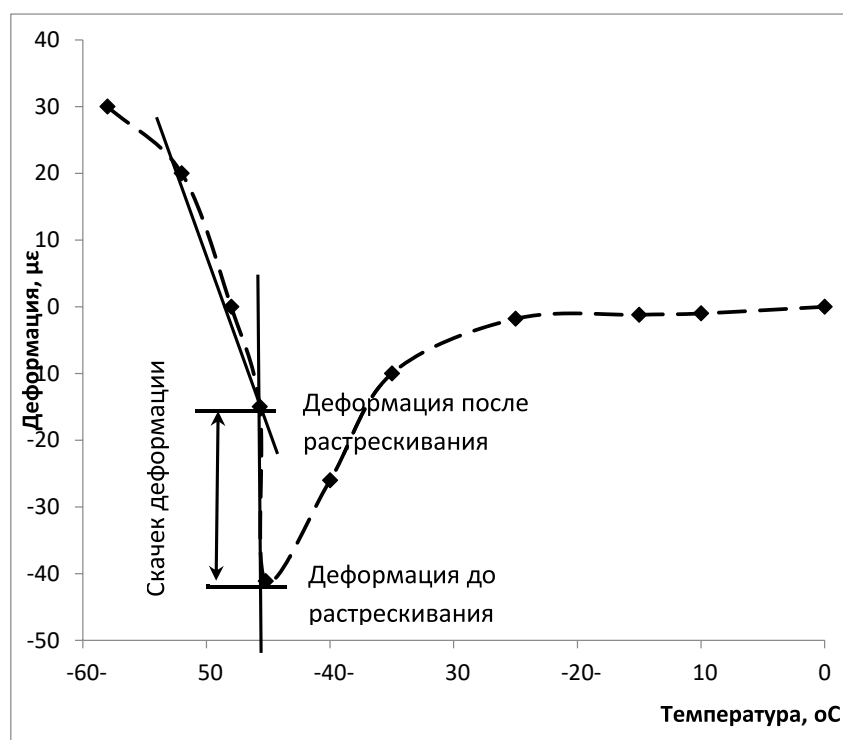


Рис. 2. Температурная зависимость деформации для полимерно-битумного вяжущего ПБВ 60 в случае применения в качестве модификатора SBS-330B

Кроме того, метод ABCD позволяет ранжировать полимерные модификаторы по эффективности их действия на исходный нефтяной битум. Например, в случае испытаний ПБВ на основе линейной марки SBS-330L резкий скачок деформации происходит лишь при температуре $-44,96\text{ }^{\circ}\text{C}$. Он объясняется разрушением сплошности пленки вяжущего, причем напряжение ее разрушения составляет $5,05\text{ МПа}$, что более чем на 30% выше, чем для радиальной марки SBS-330B ($3,48\text{ МПа}$). Последующее снижение температуры не оказывает существенного влияния на деформационные свойства разрушенного образца связующего, и ПБВ ведут себя как условно твердые тела [12].

Это хорошо коррелирует с ранее представленными теоретическими обоснованиями и практическими данными об эффективности линейных бутадиен-стирольных термоэластопластов в качестве полимерных модификаторов свойств битумных вяжущих [15, 16, 18].

Пленки битумного или полимерно-битумного вяжущего после проведения испытания не состаренных образцов могут быть переплавлены для проведения старения по методу RTFOT

(ГОСТ 33140-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT)»), моделирующему состояние вяжущего после проведения процесса изготовления смесей с каменными материалами на АБЗ. Далее тем же способом возможна оценка низкотемпературных свойств такого коротко-состаренного вяжущего. Более того, в случае осуществления старения материала пленок по методу PAV (ГОСТ Р 58400.5-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод старения под действием давления и температуры (PAV)») возможно оценить и продолжительность безремонтного жизненного цикла исследуемого типа вяжущего, моделируя сопротивляемость вяжущего низкотемпературным разрушениям в ходе долговременной эксплуатации дорожных покрытий. Указанные направления исследований определены являются перспективными на данный момент.

В результате анализа данных, полученных в рамках проведенных исследований, можно

сделать вывод о том, что для оценки низкотемпературных характеристик битумных вяжущих различного состава целесообразно пользоваться методом ABCD как в случае использования модифицированных вяжущих, так и при работе по традиционным технологиям. Наиболее эффективными ожидаемо оказались вяжущие, модифицированные СБС-полимерами производства ПАО «Нижнекамскнефтехим».

Таким образом было показано, что метод ABCD дает достоверные данные о морозостойкости и работоспособности вяжущих в тяжелых природно-климатических условиях Российской Федерации. Это позволит проводить технико-экономическое обоснование применения передовых полимерно-битумных вяжущих при обустройстве автомобильных дорог разного уровня подчиненности [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Батаев Д. К. С. Научные и научно-технические разработки КНИИ РАН / Д. К. С. Батаев, Х. Н. Мажиев, А. Д. Осмаев, М. Р. Махаев // Справочное издание к 20-летию Комплексного научно-исследовательского института им. Х. И. Ибрагимова РАН. Грозный, 2019.
2. Bazhenov Yu. M. Formation of the properties of high strength building quasi-structure polymer composites / Yu. M. Bazhenov, D. K. S. Bataev, S. A. Yu. Murtazaev, Kh. N. Mazhiey, M. A. Gaziev, R. U. Goiternirov, P. D. Bataeva // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H. I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. С. 403-407.
3. Саламанова М. Ш. Теоретические основы совместимости многокомпонентных наполненных вяжущих систем / М. Ш. Саламанова, С. А. Ю. Муртазаев, Д. К. С. Батаев, А. Х. Аласханов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020. Т. 47. № 1. С. 165-173.
4. Ахмадова Х. Х. Основные способы модификации битумов различными добавками / Х. Х. Ахмадова, Ж. Т. Хадисова, Л. Ш. Махмудова, З. А. Абдулмежидова, М. А. Мусаева // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XV. № 3 (17). 2019. С. 42-56.
5. Торская Е. В. Моделирование деформации дорожных покрытий движущейся нагрузкой / Е. В. Торская, Ф. И. Степанов, Н. А. Лушников // Трение и износ. V. 42. № 2. 2021. С. 96-100. DOI: 0.3103/s1068366621020112.
6. Гохман Л. М. Дорожный полимерасфальтобетон. М.: Экон-Информ, 2017. 477 с.
7. Баснукаев И. Ш. Устойчивые материалы и инновации в строительстве / И. Ш. Баснукаев, А. З. Абуханов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XVII. № 3 (25). 2021. С. 39-44.
8. Гохман Л. М. Применение качественного полимерно-битумного вяжущего для условий России / Л. М. Гохман // Дороги России. № 1. 2018. С. 39-55.
9. Гуреев А. А. Дорожные битумы – вчера, сегодня, завтра / А. А. Гуреев, Н. В. Быстров // Нефтепереработка и нефтехимия. № 5. 2013. С. 3-6.
10. Гордеева И. В. Исследование влияния процесса модификации на групповой состав битума и модификаторов методом Фурье-ИК-спектроскопии / И. В. Гордеева, Д. А. Мельников, В. Н. Горбатова, Д. С. Резниченко, Ю. А. Наумова // Тонкие химические технологии. Том 15. № 2. 2020. С. 56-66.
11. Behnood A. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders / A. Behnood, M. M. Gharehveran // European Polymer Journal. 2019. – [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>
12. Kim S.-S. «Development of an asphalt binder cracking device», Final Report on 99 IDEA Highway Project. 2007. 40 p.
13. Устройство для растрескивания асфальтового вяжущего ABCD. Руководство по эксплуатации. СПб., 2021. 16 с.
14. Небратенко Д. Ю. Метод определения температуры растрескивания битумных вяжущих (ABCD). Методические рекомендации к лабораторным работам / Д. Ю. Небратенко, Н. А. Лушников, В. Е. Николаевский, В. В. Савицкий. М.: РУТ (МИИТ), 2022. 28 с.

15. Kashevskaya E. V. Závislosti vlivu struktury polymerů SBS na vlastnosti polofoukaných a oxidovaných asfaltových pojiv / E. V. Kashevskaya, M. Yu. Boksha, A. M. Isakov, D. Yu. Nebratenko // Zkoušení materiálů a konstrukcí vozovek. ASFALTOVÉ VOZOVKY. 2021. Pp. 2-3.
16. Nebratenko D. Yu. Influence of SBS polymers of various structure on the properties of semi-blown bitumen binders / D. Yu. Nebratenko, M. Yu. Boksha, A. M. Isakov. Roads and Bridges – Dorogi i Mosty 21 (2022). Pp. 5-17.
17. Гужов С.А. Метод оценки экономической эффективности применения полимерно-битумных вяжущих / С.А. Гужов, А.Б. Санакулов, В.В. Лебедев, Д.Ю. Небрatenko // Вестник Брянского технического университета. № 12 (109). 2021. С. 60-68 <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2021-12-60-68>
18. Саламанова М.Ш., Исмаилова З.Х., Окуева П.Х., Эскиев М.С. (2017) Анализ методов составления рецептур модифицированных сухих строительных смесей / М.Ш. Саламанова, З.Х. Исмаилова, П.Х. Окуева, М.С. Эскиев // Грозненский естественнонаучный бюллетень. № 4 (8). С. 67-72.

ASSESSMENT OF THE ROAD BINDERS PROPERTIES AT LOW TEMPERATURES BY THE ABCD METHOD

© ¹E. V. Lebedev, ²B. A. Zurov, ³M. M. Vysotsky, ^{3,4}D. Yu. Nebratenko

¹Financial University under the Government of Russian Federation, Moscow, Russia

²Transcom, Sven-Transportnaya settlement, Russia

³Russian University of Transport, Moscow, Russia

⁴MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

The paper considers the possibility of applying a new method for determining the crack resistance temperature of bituminous binders (ABCD), which allows in experiments, as close as possible to real operating conditions, to assess the influence of natural and climatic parameters on the complex of low-temperature properties of binders and coatings based on them. The ABCD method has already been adopted as a standard method for testing the low-temperature properties of bitumen and polymer-bitumen binders in Europe, North America and Russia. The results presented in this study of quantitative determination of performance indicators (cracking temperature) of bituminous binders of various compositions at low temperatures by the direct method fully confirm the previously proposed assumptions about the need for a physical and chemical justification of the applicability of exact methods in the road industry. This will allow to carry out a feasibility study of the application of advanced binders in the construction of roads of different levels of subordination. The obtained data showed a significant correlation of low-temperature indicators of binders with the composition and structure of butadiene styrene thermoplastic elastomers used.

Keywords: method for determining the low-temperature properties of bituminous binders (ABCD), butadiene styrene thermoplastic elastomers (SBS polymers), polymer-bituminous binders (PmB).

REFERENCES

1. Bataev, D. K. S., Mazhiev, Kh. N., Osmaev, A. D. and Makaev, M. R. (2019) 'Nauchnie i nauchno-teshnicheskie razrabotki KNII RAN' [Scientific and Scientific-Technical Developments of KNII RAS] Reference Edition for the 20th Anniversary of the Integrated Research Institute named after Kh. Ibrahimov RAS. Grozny.

2. Bazhenov, Yu. M., Bataev, D.K. S., Murtazaev, S.A. Yu., Mazhiev, Kh. N., Gaziev, M. A., Goitemirov, R. U. and Bataeva, P. D. (2019) 'Formation of the properties of high strength building quasi-structure polymer composites'. In *proceedings: Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Pp. 403-407.
3. Salamanova, M. S., Murtazaev, S.A. Yu., Bataev, D.K. S. and Alaskhanov, A. Kh. (2020) 'Theoreticheskie osnovy sovmestimosti mnogokomponentnykh napolnennykh vyagushih system' [Theoretical bases of compatibility of multicomponent filled binder systems]. *Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2V. 47. №1. Pp. 165-173.
4. Akhmadova, H. H., Khadisova, J. T., Makhmudova, L. Sh., Abdulmezhidova, Z. A. and Musayeva, M. A (2019) 'Osnovniy sposoby modifikatsii bitumov' [The main ways of modifying bitumens with various additives] *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, №3 (17), pp. 42-56.
5. Torskaya, E. V., Stepanov, F. I. and Lushnikov, N. A. (2021) 'Modelirovaniy deformatsii dorognish pokriniy dvishuheisy nagruzkoy' [Simulation of pavement deformation by moving load] *Friction and wear*, №2 (42): pp. 96-100. DOI: 0.3103/s1068366621020112
6. Gokhman, L. M. (2017) *Dorogniy polymerasfaltobetony* [Road polymer asphalt concrete]. Econ-Inform. Moscow, 477 p.
7. Basnukaev, I. Sh., Abukhanov, A. Z. and Aliev, S. A. (2021) 'Ustoishivye materialy i innivatsii v promyshlennosti' [Sustainable materials and innovation in construction] *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, №3 (25), pp. 39-44.
8. Gokhman, L. M. (2018) 'Primenenie catchestvennogo polymerno-bitumnogo viashushego dla usloviy Rossii' [Application of high-quality polymer-bitumen binder for Russian conditions] *Roads of Russia*. №1. Pp. 39-55.
9. Gureev, A. A. and Bystrov, N. V. (2013) 'Doroshnii bitumy – vshera, segonhia, zantra' [Road bitumens – yesterday, today, tomorrow] *Refining and Petrochemicals*. №5. Pp. 3-6.
10. Gordeeva, I. V., Melnikov, D. A., Gorbatoeva, V. N., D.S. Reznichenko and Naumova, Yu. A. (2020) 'Issledovanie vlianiya modifikatsii na grunnoy sostav bituma i modifikatorov metodom Furie-IK-spectroscopii' [Study of the impact of the modification process on the group composition of bitumen and modifiers by Fourier-IR-spectroscopy] *Fine Chemical Technologies*, vol. 15. №2, pp. 56-66.
11. Behnood, A. and Gharehveran, M. M. (2019) Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, available at: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>
12. Kim, S.-S. (2007) «Development of an asphalt binder cracking device», Final Report on 99 IDEA Highway Project. 40 p.
13. (2021) ABCD asphalt binder cracking device. Operating Manual. Brackenheim. 16 p.
14. Nebratenko, D. Yu., Lushnikov, N. A., Nikolaevsky, V. E. and Savitsky, V. V. (2022) Metod opredeleniy temperatury rastreskivaniy bitumnush viagushih (ACBD) [Method for Determining the Cracking Temperature of Bituminous Binders (ACBD)]. Methodological recommendations for laboratory work. RUT (MIIT), Moscow, 28 p.
15. Kashevskaya, E. V., Boksha, M. Yu., Isakov, A. M. and Nebratenko, D. Yu. (2021) Závislosti vlivu struktury polymerů SBS na vlastnosti polofoukaných an oxidovaných asfaltových pojiv. Zkoušení materiálů a konstrukcí vozovek. *ASFALTOVÉ VOZOVKY*, pp. 2-3.
16. Nebratenko, D. Yu., Boksha, M. Yu. and Isakov, A. M. (2022) Influence of SBS polymers of various structure on the properties of semi-blown bitumen binders *Roads and Bridges – Dorogi i Mosty* 21, pp. 5-17.
17. Guzhov, S. A., Sanakulov, A. B., Lebedev, V. V. and Nebratenko, D. Yu. (2021) 'Metod otsenki ekonomicheskoi effektivnosti polumerno-bitumnykh viagushich' [Method to estimate economic efficiency of applying polymer-bitumen binders] *Bulletin of Bryansk state technical university*. №12 (109), pp. 60-68.
18. Salamanova, M. Sh., Ismailova, Z. Kh., Okueva, P. Kh. and Eskiev, M. S. (2017) 'Analiz metodov sostavleniya receptur modifitsirovannykh suhih stroitel'nykh smesey'. *Groznyy estestvennonauchnyy byulleten'*. [Analysis of methods for formulating modified dry building mixes. Grozny Natural Science Bulletin]. №4 (8). Pp. 67-72.