ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Научная статья

УДК 625.7/.8: 665.775
EDN: ZBGYQW

РАСТРЕСКИВАНИЕ ВЯЖУЩИХ МЕТОДОМ ABCD: ОБОСНОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РАСЧЕТОВ

Иван Михайлович Рожков[1]✉
Андрей Валерьевич Харпаев[2]
Евгений Николаевич Симчук[3]
Дмитрий Юрьевич Небратенко[4]

[1,2,3]АНО «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса» (НИИ «ТСК»), Москва, Россия
[4]Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия
[1]extralab@mail.ru✉; http://orcid.org/0009-0002-9811-4534; SPIN-код: 3146-6556; Author ID: 1210861
[2]bitumbinder@mail.ru; http://orcid.org/0009-0004-2793-6148; SPIN-код: 9605-7984; Author ID: 1210866
[3]niitsk@niitsk.ru; http://orcid.org/000-0001-2734-2587; SPIN-код: 4156-4360; Author ID: 1206910
[4]nebratenko@mail.ru; http://orcid.org/ 0000-0002-3607-8876; SPIN-код: 8398-9130, Author ID: 393570

Аннотация: *В статье рассматривается одна из важнейших задач для отечественной дорожной отрасли – достоверное определение низкотемпературных показателей битумных вяжущих. Решение данной проблемы позволит обосновано выбрать вяжущие материалы с заданными свойствами с привязкой к температурным условиям эксплуатации на участках автомобильных дорог и способные при правильном проектировании*

обеспечить требуемый для российских регионов уровень низкотемпературных свойств асфальтобетонных покрытий. Методология объемно-функционального проектирования (ОФП) для обозначенных целей включает использование сразу нескольких методов, каждый из которых использует отдельное испытательное оборудование. В частности, предусмотрено использование динамического реометра сдвига (DSR), реометра, изгибающего балочку (BBR) и устройства ABCD. Метод определения температуры растрескивания при помощи устройства ABCD является самым современным из методов, основанных на растрескивании образцов битумных вяжущих при низких температурах. Важным моментом является перевод напрямую фиксируемых показаний прибора в нормируемые значения показателя «температура растрескивания». В данной статье предложен вариант обоснования указанного перевода. Полученные результаты учитывались при разработке национального стандарта ГОСТ Р 58400.11. Кроме того, представлены результаты испытаний, полученные авторами для наглядной проверки сопоставимости различных методов испытаний. Проведена оценка сопоставимости результатов испытаний, полученных с применением реометра, изгибающего балочку (BBR), и устройства ABCD с применением результатов испытаний, полученных в различных лабораториях в рамках межлабораторных сравнительных испытаний дорожно-строительных материалов (МСИ) в период 2022-2023 гг.

Ключевые слова: *метод ABCD, метод BBR, температура растрескивания, битумные вяжущие.*

Для цитирования: Рожков И.М., Харпаев А.В., Симчук Е.Н., Небратенко Д.Ю. Растрескивание вяжущих методом ABCD: обоснование температурных расчетов // Дороги и мосты. 2024. № 52/2. С. 347-366.

ROAD CONSTRUCTION MATERIALS

Original article

CRACKING OF BINDERS BY THE ABCD METHOD: JUSTIFICATION OF TEMPERATURE CALCULATIONS

Ivan M. Rozhkov[1]
Andrey V. Kharpaev[2]
Evgeniy N. Simchuk[3]✉
Dmitry Yu. Nebratenko[4]

[1,2,3]ANO «Scientific Research Institute of Transport and Construction complex» (NII «TSK»), Moscow, Russia
[4]Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia
[1]extralab@mail.ru✉; http://orcid.org/0009-0002-9811-4534; SPIN-код: 3146-6556; Author ID: 1210861
[2]bitumbinder@mail.ru; http://orcid.org/0009-0004-2793-6148; SPIN-код: 9605-7984; Author ID: 1210866
[3]niitsk@niitsk.ru; http://orcid.org/000-0001-2734-2587; SPIN-код: 4156-4360; Author ID: 1206910
[4]nebratenko@mail.ru; http://orcid.org/ 0000-0002-3607-8876; SPIN-код: 8398-9130; Author ID: 393570

Abstract: *The article addresses one of the most critical tasks for the domestic road industry: accurate determination of low-temperature properties of bituminous binders. The solution to this problem will allow the justified selection of binders with specified properties, tied to the temperature conditions of operation on road sections, when properly designed, capable of ensuring the required level of low-temperature properties of asphalt concrete pavements for Russian regions when properly designed. The methodology of volumetric and functional design provides for the use of several devices at once for the designated purposes. In particular, a dynamic shear rheometer (DSR), a bending beam rheometer (BBR) and an ABCD device are provided for the use. The ABCD method is the newest of its kind proposed for estimating the cracking temperature of binders at low temperatures. An important point is the convert of the directly recordable readings of the device into the normalized values of the «cracking temperature» indicator. The paper*

proposes a variant of the justification of the specified convert. The results obtained were included in the text of the national standard GOST R 58400.11. In addition, the test results obtained by the authors are presented to clearly verify the comparability of the different test methods. The assessment of the comparability of test results from the Bending Beam Rheometer (BBR) and the ABCD device with the application of test results from different laboratories in the Interlaboratory Comparative Testing of Road Construction Materials (ICRM) between 2022 and 2023 has been carried out.

Keywords: *ABCD method, BBR method, cracking temperature, bitumen binders.*

For citation: Rozhkov I.M., Kharpaev A.V., Simchuk E.N., Nebratenko D.Yu. Cracking of binders by the ABCD method: justification of temperature calculations // Roads and Bridges. 2024; (52/2): 347-366. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее важных и сложных задач при проектировании и подборе состава и компонентов асфальтобетонных смесей является обоснованный выбор битумного вяжущего, от комплекса свойств которого напрямую зависят эксплуатационные свойства асфальтобетонного покрытия. Современное битумное вяжущее – это специально созданный сложный многокомпонентный материал с комплексом необходимых свойств, заданных в определенном диапазоне значений, требуемых для обеспечения необходимых характеристик в реальных условиях эксплуатации **[1]**.

При оценке качества битумных вяжущих материалов необходимо решение задач по прогнозированию устойчивости к образованию основных дефектов автомобильных дорог, вызванных следующими причинами: усталостными разрушениями, пластическим колееобразованием, низкотемпературным трещинообразованием и т.п. Однако изменение качественного состава битумных вяжущих и рост эксплуатационных нагрузок на дороги требуют постоянного совершенствования используемых дорожно-строительных материалов и методов оценки их технологических и эксплуатационных показателей. Так, в течение нескольких десятилетий для

оценки низкотемпературного растрескивания (необратимых нарушений сплошности слоев вяжущего в зонах контакта между частицами минерального наполнителя в условиях низких температур) использовались эмпирические методы, основанные на сравнительных зависимостях упруго-прочностных свойств битумов в отвержденном состоянии. Они не моделировали процессы, происходящие при реальной эксплуатации, и были основаны на приложении внешних изгибающих или растягивающих воздействий с деформированием образцов на относительно большие величины, существенно превышающие величины деформации при реальных эксплуатационных процессах на автомобильных дорогах **[2, 3]**.

Однако основным фактором, вызывающим низкотемпературное растрескивание, вероятно, являются внутренние термические напряжения, возникающие в материале при термоусадочных процессах в условиях понижения температур. В случае, когда указанные напряжения, возникающие при понижении температуры, превышают физическую прочность материала, происходит образование трещин **[4]**.

До момента внедрения системы объемно-функционального проектирования, основным методом определения устойчивости битумных вяжущих к низкотемпературному воздействию был метод определения температуры хрупкости по Фраасу, который был самым доступным для широкого круга пользователей. В СССР этот метод впервые был нормирован в ГОСТ 11507-65 «Битумы нефтяные. Метод определения температуры хрупкости по Фраасу». В дальнейшем он был переработан в 1978 г. и в настоящее время нормирован в межгосударственном стандарте ГОСТ 33143-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения температуры хрупкости по Фраасу». Приборы для выполнения испытаний по данному методу имеют широкое распространение. Производятся как ручные, так и полностью автоматические аппараты. Испытание по методу определения температуры хрупкости по Фраасу очень хорошо известно и получило широкое распространение при тестировании вяжущих во всех без исключения природно-климатических зонах Российской Федерации, в том числе, и по причине безальтернативности. Необходимо отметить, что показатель «температура хрупкости», как было показано в многочисленных работах, зависит от условий испытания: толщины слоя битума, скорости де-

формирования, скорости охлаждения, и потому имеет чисто условное значение. К недостаткам данного метода можно отнести то, что условия проведения испытаний по методу Фрааса не предусматривают при подготовке проб моделирование и учет термоокислительного старения битума, особенно происходящее в ходе продолжительного периода эксплуатации дорожных покрытий. Это является причиной существенного снижения точности прогнозных значений, полученных в лабораторных условиях и расхождений с реальным поведением материалов при эксплуатации на автомобильных дорогах.

На современном этапе развития дорожного материаловедения в рамках ОФП для прогнозирования поведения битумных вяжущих при эксплуатации при низких температурах принято использование двух основных методов: определение температуры растрескивания с применением устройства ABCD **[5]** и определение жесткости и ползучести битума при отрицательных температурах с помощью реометра, изгибающего балочку (метод BBR) **[6, 7]**.

В ходе работы прибора 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, изгибающего балочку (BBR)», происходит нагружение постоянной сосредоточенной нагрузкой балочки, размещенной на опорах, которое вызывает её изгиб, увеличивающийся во времени **[8]**. Деформация изгиба включает зону упругого сжатия (в верхней части), нейтральную зону и зону растяжения (ползучести) в нижней части балочки. При условии постоянного нагружения, увеличение во времени прогиба балочки (ползучесть) обусловлено эффектом снижения (рассеивания) возникающих при данных деформациях внутренних напряжений. Вместе с тем, при малых деформациях без непосредственного растрескивания образца данный метод позволяет определять влияющие на температуру растрескивания факторы, такие как жесткость, показывающая степень возникающих внутренних деформационных напряжений, и скорость релаксации этих напряжений во времени. Установление критических пределов данных величин позволяет затем оценить значение критической температуры низкотемпературной устойчивости материала расчетным путем **[7]**.

Основными преимуществами метода BBR являются:

– Малые деформации и неразрушение материала при испытаниях, что повышает точность и сходимость результатов, а также устраняет необходимость проведения нескольких параллельных испытаний для получения корректного результата.

– Широкая распространенность и большой успешный опыт применения метода за рубежом.

– Метод является основным низкотемпературным методом в системе Суперпэйв.

Основными недостатками метода BBR являются:

– Невозможность оценки прочности материала к растрескиванию, что критично в основном для модифицированных материалов, прочностные характеристики которых могут иметь существенные различия.

– При разработке и апробации метода применялись в основном немодифицированные битумы.

– Опыт применения метода показывает, что занижаются результаты при испытаниях модифицированных битумных вяжущих, что приводит к ошибочной выбраковке качественных материалов.

Кроме того, одним из косвенных недостатков методики определения низкотемпературных параметров с помощью прибора BBR является то, что температура испытаний отличается на 10 °C от предельной эксплуатационной, и метод не подразумевает прямого измерения температуры образования трещины в объёме вяжущего, что может снижать точность прогноза по реальной температуре растрескивания вяжущего, ввиду возможных различий в теплостойкости материала.

В основе определения температуры растрескивания методом ABCD лежит существенная разница в величине коэффициента теплового расширения битума и сплава «Инвар», из которого изготовлено кольцо, моделирующего каменные материалы в составе асфальтобетона **[9, 10]**. В ГОСТ Р 58400.11-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения температуры растрескивания при помощи устройства ABCD» также присутствует расчетная часть для пересчета определенных низкотемпературных показателей битумных вяжущих. Однако основным измеряемым параметром является именно температура растрескивания битумного вяжущего. В установленной методике её необходимо определять в

момент скачка деформации в испытуемом образце по графику зависимости деформации от температуры, при этом фактическую температуру растрескивания вычисляют с учетом корректировки. Данная корректировка необходима, так как реальная температура растрескивания асфальтобетона при эксплуатации выше, чем температура растрескивания чистого битумного вяжущего ввиду различий в толщинах пленок, структурированности минеральным заполнителем и ряда других факторов. Но существует четкая зависимость температуры растрескивания асфальтобетона от значений растрескивания чистого битумного вяжущего, поэтому с учетом корректировки метод позволяет прогнозировать температуру растрескивания асфальтобетона.

Целесообразно обосновать причины введения указанного расчета в случае использования прямого метода измерения температур и подтвердить обоснованность предложенного подхода на конкретных примерах.

Постановка задачи

В качестве нормативного документа, регламентирующего использование устройства ABCD за рубежом, применяется стандарт AASHTO T387 «Standard Method of Test for Determining the Cracking Temperature of Asphalt Binder Using the Asphalt Binder Cracking Device (ABCD)[1]». Данный стандарт основывается на результатах исследований битумных вяжущих материалов, которые проводились с применением типичных для Северной Америки битумов, производимых в основном из «тяжелых» нефтей. Такие битумные вяжущие, по сравнению с отечественными аналогами (в основном окисленными и компаундированными битумами), имеют свои особенности как по качественным показателям исходного сырья и технологии их производства, так и по их итоговым техническим, технологическим и эксплуатационным свойствам.

Значения температур растрескивания ABCD таких битумных вяжущих тесно связаны с минимальными температурами эксплуатации, что, согласно AASHTO T387, можно выразить следующей зависимостью:

[1] AASHTO T387 «Стандартный метод испытания для определения температур растрескивания битумных вяжущих с использованием устройства растрескивания связующего (ABCD)» (перев. с англ.).

$$T_{(PG)} = 0{,}78 * T_{crack} - 0{,}9 \quad (1)$$

где

$T_{(PG)}$ – минимальная температура эксплуатации;

T_{crack} – температура растрескивания ABCD.

Указанное соотношение было предложено профессором Sang-Soo Kim в ходе проведенных им исследований по оценке низкотемпературных параметров битумных вяжущих, определяемых различными методами, в том числе и методом ABCD, который хорошо зарекомендовал себя в случае определения свойств полимерно-модифицированных битумных вяжущих **[9-12]**. В своих работах он показал, что значения минимальной температуры эксплуатации немодифицированного битума и слабомодифицированного битума, полученные с применением данной зависимости хорошо соотносятся со значениями минимальной температуры эксплуатации, полученными по результатам метода BBR. Но при этом для модифицированных битумных вяжущих обнаружены расхождения по данному показателю, причем значения с применением метода ABCD всегда ниже, чем значения по методу BBR, и данные расхождения возрастают с увеличением степени модификации **[10, 11]**.

При этом для немодифицированных битумов, а также битумов с незначительной степенью модификации, наиболее распространенным в мире на данный момент все еще является метод BBR **[12, 13]**. В отечественной практике данные по методу ABCD применяются все более широко в силу освоения отечественного производства соответствующего приборного оснащения для его осуществления **[14, 15]**.

Система оценки битумных вяжущих в рамках методологии ОФП допускает как метод ABCD, так и метод BBR. Данные методы являются альтернативными при определении свойств немодифицированных битумных вяжущих, но необходима корректировка зависимости **(1)** для исключения расхождений результатов, получаемых при помощи данных методов. В качестве ориентира были выбраны результаты по методу BBR, так как данный метод успешно и широко применяется за рубежом и в РФ в части самых распространенных по объему использования немодифицированных битумных вяжущих. При этом наиболее технически обоснованным является метод ABCD, однако небольшой на тот момент опыт применения метода и необеспеченность лабораторий необходимым

оборудованием не позволили его массовое применение и выбор в качестве основного, хотя потенциальные преимущества метода ABCD были очевидны. Следует отметить, что на момент разработки стандартов устройство ABCD не производилось в РФ, и данным оборудованием были оснащены лишь несколько лабораторий в России.

Решение задачи и обсуждение результатов

С целью апробации данного подхода к расчету температуры растрескивания для отечественных битумных вяжущих был проведен ряд исследований. Для битумных вяжущих разных марок и производителей был проведен комплекс параллельных испытаний с использованием двух типов приборов, указанных выше. Результаты работ показали наличие расхождений между фактическими минимальными температурами эксплуатации битумных вяжущих по методу BBR и результатами, полученными по формуле **(1)**. Причем, в основном значения минимальной температуры эксплуатации, получаемые по формуле, были ниже фактических значений минимальных температур эксплуатации битумных вяжущих. В среднем расхождение стабильно составляло около 2 °С.

Таким образом, формула **(1)** недостаточно хорошо работает применительно и к отечественным окисленным битумным вяжущим. При этом, учитывая реальный характер разрушения асфальтобетонов (минимальная температура эксплуатации всегда несколько ниже, чем критическая температура растрескивания), необходима корректировка коэффициентов формулы с учетом особенностей состава, структуры и свойств отечественных окисленных битумов.

В рамках разработки ПНСТ 83 и ГОСТ Р 58400.11-2019 были проведены исследования низкотемпературных свойств битумных вяжущих материалов с целью уточнения значений коэффициентов формулы **(1)** и повышения достоверности определения значений минимальных температур эксплуатации на основе результатов испытаний температур растрескивания методом ABCD. Для этого были использованы модифицированные битумные вяжущие и вязкие дорожные битумы различных производителей и марок, наиболее широко применяемые в отечественном дорожном строительстве.

Была исследована взаимосвязь между температурами растрескивания (метод ABCD) и критическими температурами низкотемпературной устойчивости различных образцов данных материалов. Для определения температуры растрескивания ABCD использовалась методика, изложенная в ПНСТ 83; минимальные температуры эксплуатации битумных вяжущих определялись с использованием реометра BBR по ПНСТ 79.

На **рис. 1** приведены данные, полученные в ходе обобщенного исследования показателей вяжущих. По оси X отложены значения температур растрескивания по методу ABCD, а на оси Y – значения критических температур низкотемпературной устойчивости, рассчитанные по показателям, определенным в соответствии с методикой BBR, изложенной в ГОСТ Р 58400.8.

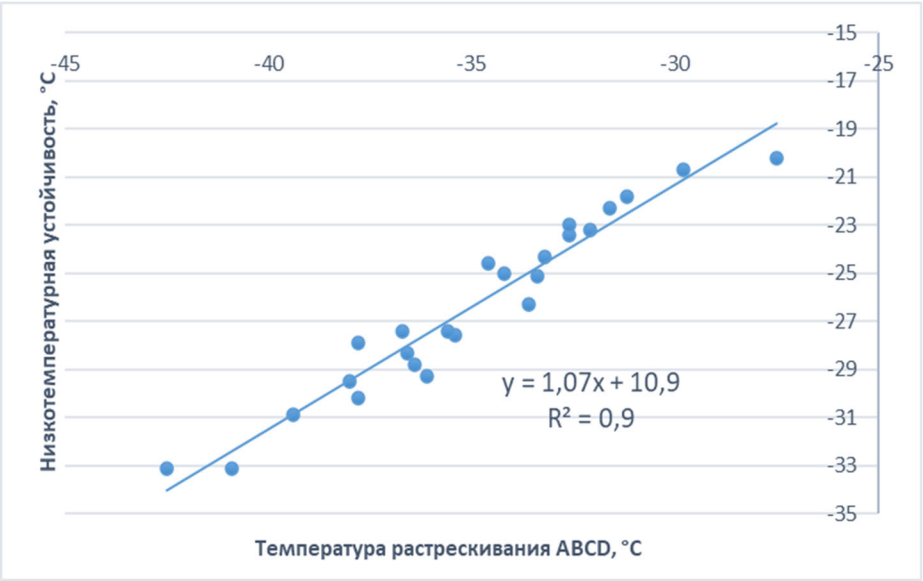

Рис. 1. Корреляционная зависимость низкотемпературной устойчивости от температуры растрескивания битумного вяжущего
(составлено авторами)

Апроксимационная прямая, отражающая взаимосвязь рассматриваемых параметров, может быть представлена графически (**рис. 1**). Как видно из графика, существует близкая к прямой зависимость между значениями температур растрескивания ABCD и

критических температур низкотемпературной устойчивости битумных вяжущих (по методу BBR), выраженная следующим уравнением:

$$Y = 1{,}07 * X + 10{,}9 \quad , \qquad \textbf{(2)}$$

где

Y – предельное значение низкотемпературной устойчивости;

X – значение температуры растрескивания ABCD.

Качество данных и степень корреляции в данном случае можно оценить как очень высокие, на это указывает полученное значение коэффициента детерминации, в данном случае близкое к 0,9.

На практике для одного и того же нефтяного дорожного битума значения низкотемпературных показателей, полученных различными методами, хорошо согласуются с формулой **(2)**.

Было проведено тестовое испытание выборочной пробы типичного битума нефтяного дорожного вязкого БНД 70/100. Данный битум был состарен по ГОСТ Р 58400.5 (метод PAV), полученный материал был испытан в соответствии с ГОСТ Р 58400.11 (метод ABCD) и ГОСТ Р 58400.8 (метод BBR). Результаты испытаний по методу ABCD представлены в **табл. 1**.

Таблица 1

Низкотемпературные показатели битумных вяжущих по методу ABCD

Номер датчика	*Низкотемпературные показатели битумных вяжущих по методу ABCD*			
	T_{ABCD}, °C	$T_{раст}$, °C	ε, μS	$б_{AC}$, МПа
1	-37,83	-29,58	11,73	1,85
2	-38,80	-30,62	17,46	2,74
3	-36,04	-27,66	13,44	2,11
4	-36,68	-28,35	12,61	1,98
Среднее значение	-37,34	-29,05	13,81	2,17
Максимальное расхождение	2,76	2,96	2,17	1,60

Примечание: таблица составлена авторами статьи.

Как видно из **табл. 1**, среднее значение полученных температур растрескивания ABCD составляет минус 37,3 °С (фактическая средняя температура, при которой происходили хрупкие разрушения испытуемых образцов), а температура растрескивания: минус 29,1 °С (прогнозируемая предельная температура трещиностойкости материала при эксплуатации, полученная с применением формулы **(2)**.

Результаты испытаний по методу BBR представлены в **табл. 2**.

Таблица 2

Низкотемпературные показатели битумных вяжущих по методу BBR

Наименование показателя	*Температура испытаний, °С*		*Критическая температура, °С*
	-18	*-24*	
Жесткость S(60), МПа	135,5	298,5	-34,0
Параметр m	0,308	0,271	-29,3

Примечание: таблица составлена авторами статьи.

Как видно из **табл. 2**, максимальная критическая температура трещиностойкости материала составляет минус 29,3 °С (прогнозируемая предельная температура трещиностойкости материала при эксплуатации). Таким образом, расхождение предельных температур трещиностойкости материала, полученных различными методами, минимально (составило всего 0,2 °С), что подтверждает хорошую взаимосвязь между результатами, получаемыми с применением формулы **(2)** и результатами по методу BBR применительно к немодифицированным битумам.

Кроме того, в качестве независимой оценки были проанализированы результаты испытаний участников межлабораторных сравнительных испытаний (МСИ) 2022-2023, полученные на немодифицированном битумном вяжущем. Результаты, полученные на основании данных, предоставленных участниками МСИ, представлены в **табл. 3**.

Таблица 3

Усредненные значения результатов определения низкотемпературных показателей битумных вяжущих с исключением статистических выбросов

Наименование показателя	*Температура испытаний, °С*		*Критическая температура, °С*
	-18	*-24*	
Жесткость S(60), МПа	145,0	283,0	-34,5
Параметр m	0,308	0,275	-29,5
Температура растрескивания, °С			-27,2

Примечание: таблица составлена авторами статьи.

Как видно из **табл. 3**, максимальная критическая температура трещиностойкости материала, полученная по методу BBR, составила минус 29,5 °С, а температура растрескивания, полученная по методу ABCD, составила минус 27,2 °С. Таким образом, расхождение предельных температур трещиностойкости материала, полученных разными методами, различными операторами, на разном оборудовании, составило всего 2,3 °С, что, например, ниже предельной сходимости и воспроизводимости для метода ABCD (сходимость – 2,7°С, воспроизводимость – 3,9°С). Это также подтверждает хорошую взаимосвязь между результатами, получаемыми с применением формулы **(2)**, и результатами по методу BBR, применительно к немодифицированным битумам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования получено подтверждение, что при применении зависимости **(2)**, значения температур растрескивания ABCD хорошо согласуются с результатами, получаемыми по методу BBR. Таким образом, метод ABCD (ГОСТ Р 58400.11-2019) может быть с успехом применен при классификации битумных вяжущих материалов, промышленно производимых и применяемых в России. Проводимые в настоящее время исследования показывают более высокую точность в определении низкотемпературных показателей асфальтобетонов на модифицированных вяжущих при использовании результатов по методу ABCD (по сравнению с методом BBR). При этом марки модифицированных вяжущих, назначенные на основе результатов по методу BBR, могут также применяться, причем они будут иметь некоторый запас по указанным характеристикам. В настоящий момент накоплен достаточно большой успешный опыт применения метода ABCD. Устройства ABCD, в отличие от приборов BBR, производятся в РФ, пользуются высоким спросом у потребителей: на сегодняшний день уже десятки лабораторий оснащены такими устройствами. С каждым годом все больше лабораторий принимают участие в МСИ по применению метода ABCD. Исследования, направленные на совершенствование классификации и методов испытаний с учетом накопления результатов и опыта применения данной системы в данный момент продолжаются.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *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.*
2. *Gražulytė J., Vaitkus A. Analysis of Methods and Criteria for Evaluation of Bitumen Performance at Low Temperatures // Environmental Engineering: 10-th International Conference Vilnius Gediminas Technical University Lithuania, 27-28 April 2017, 8 p. DOI: 10.3846/enviro.2017.137.*
3. *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.

4. *Колесник Д.А., Пахаренко Д.В. Опыт внедрения системы Superpave на дорогах России. // Дорожная держава. 2019. № 88. С.70-75.*
5. *Nikolaevsky V., Duzhiy P., Nebratenko D. 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.*
6. *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.*
7. *Томас В. Кеннеди, Джеральд А. Хубер Эдвард Т. Харриган, Рональд Дж. Комински, Чарльз С. Хьюз, Гарольд фон Квинтус, Джеймс С. Моултроп. Отчет SHRP-A-410. Асфальтовое покрытие с наилучшими эксплуатационными характеристиками (система Superpave): Продукт Стратегической исследовательской программы по шоссейным дорогам / Национальный научно-исследовательский Совет, Вашингтон, Округ Колумбия, 1994.*
8. *Hoare T., Hesp S. Low-Temperature Fracture Testing of Asphalt Binders: Regular and Modified Systems // Transportation Research Record. 2000. Vol. 1728, P. 36-42.*
9. *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).*
10. *Kim. S.-S. Development of an Asphalt Binder Cracking Device // Final Report for Highway IDEA. December 20, 2007, C. 23-24.*
11. *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.*
12. *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. P. 12-13.

13. *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.*
14. *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.*
15. *Небратенко Д.Ю., Николаевский В.Е. Определение температуры растрескивания битумных вяжущих при помощи устройства АВСД: учебно-методическое пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2023. – 24 с.*

REFERENCES

1. *Rozhkov I.M., Simchuk E.N. Modern approaches to forecasting the temperature conditions of operation of asphalt concrete structural layers of road clothes // Roads of Russia. 2020. No.3 (117). PP. 55-71.*
2. *Gražulytė J., Vaitkus A. Analysis of Methods and Criteria for Evaluation of Bitumen Performance at Low Temperatures // Environmental Engineering: 10-th International Conference Vilnius Gediminas Technical University Lithuania, 27-28 April 2017, 8 p. DOI: 10.3846/enviro.2017.137.*
3. *Pyrig Y. Review of approaches to determining the viscosity-penetration dependence of bituminous binders // Bulletin of HNADU. 2023. Vol. 100, DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.113.*
4. *Kolesnik D.A., Pakharenko D.V. The experience of implementing the Superpave system on the roads of Russia. // Road power. 2019. No. 88. PP.70-75.*
5. *Nikolaevsky V., Duzhiy P., Nebratenko D. 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.*

6. *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.*
7. *Thomas W. Kennedy, Gerald A. Huber Edward T. Harrigan, Ronald J. Cominsky, Charles S. Hughes, Harold Von Quintus, James S. Moulthrop. Report SHRP-A-410. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave). The Product of the SHRP Asphalt Research Program. Strategic Highway Research Program / National Research Washington, Council DC 1994.*
8. *Hoare T., Hesp S. Low-Temperature Fracture Testing of Asphalt Binders: Regular and Modified Systems // Transportation Research Record. 2000. Vol. 1728. P. 36-42.*
9. *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).*
10. *Kim. S.-S. Development of an Asphalt Binder Cracking Device // Final Report for Highway IDEA. December 20, 2007, C. 23-24.*
11. *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.*
12. *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. P. 12-13.*
13. *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.*
14. *Tyukina P.M., Pozdnyakov V.V., Andreev A.A., Egorov A.G., Gureev A.A., Solovyov R.E., Karpeev A.V. Complex physico-*

chemical modification of petroleum road bitumen // Bashkir Chemical Journal. 2021. No. 4 (28). PP. 44-55.

15. *Nebratenko D.Yu., Nikolaevsky V.E. Determination of the cracking temperature of bitumen binders using the ABCD device: Educational and methodical manual. – M.: RUT (MIIT), 2023. – 24 p.*

Информация об авторах

И.М. Рожков – руководитель лаборатории АНО «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса» (АНО «НИИ ТСК»), Москва, Россия

А.В. Харпаев – заместитель руководителя лаборатории АНО «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса» (АНО «НИИ ТСК»), Москва, Россия

Е.Н. Симчук – кандидат экономических наук, генеральный директор АНО «НИИ ТСК», заместитель председателя технического комитета по стандартизации №418 «Дорожное хозяйство», Москва, Россия

Д.Ю. Небратенко – кандидат химических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия

Information about the authors

I.M. Rozhkov – Head of the Laboratory of «Scientific Research Institute of Transport and Construction complex» («NII TSK»), Moscow, Russia

A.V. Kharpaev – Deputy Head of the Laboratory of «Scientific Research Institute of Transport and Construction complex» («NII TSK»), Moscow, Russia

E.N. Simchuk – Ph. D. (Economics), General Director of «Scientific Research Institute of Transport and Construction complex» («NII TSK»), Deputy Chairman of the Technical Committee for Standardization No. 418 «Road Management», Moscow, Russia

D.Yu. Nebratenko – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor at the Department of Highways, Aerodromes, Foundations and Substructures, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.Н. Ефименко (Томский государственный архитектурно-строительный университет).

Статья поступила в редакцию 06.09.2024. Одобрена после рецензирования 25.09.2024. Принята к публикации 23.10.2024.

The article was submitted 06.09.2024. Approved after reviewing 25.09.2024. Accepted for publication 23.10.2024.