

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2020, №4, Том 7 / 2020, N 4, Vol. 7 <https://t-s.today/issue-4-2020.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS420.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS420 (<http://dx.doi.org/10.15862/04SATS420>)

Исследование дорожных характеристик высокомодульной асфальтобетонной смеси с различными добавками

Ни Г., Углова Е.В.

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ни Гуанцун, e-mail: ngc931123@163.com

Аннотация. Для разработки рекомендаций по применению высокомодульных добавок в асфальтобетонных смесях для дорожных покрытий в данной работе были рассмотрены две высокомодульные добавки: PR Module и PR PLASTS. Выполнен сравнительный анализ вязкоупругих свойств, характеристик при высоких и низких температурах, а также водостойкости высокомодульной асфальтобетонной смеси и обычной асфальтобетонной смеси АС-20. Проведены испытания по определению динамического модуля упругости, тест на колееобразование, испытания трехточечного изгиба и эксперимент на устойчивость при замораживании-оттаивании. Подробно проанализировано влияние различных добавок на дорожные характеристики высокомодульных

асфальтобетонных смесей. Результаты показывают, что высокомодульные добавки могут значительно улучшить высокотемпературную стабильность асфальтобетонной смеси, не ухудшая сопротивление низкотемпературному растрескиванию. Высокая вязкость асфальтобетона при введении высокомодульных добавок может в определенной степени улучшить водостойкость и усталостные характеристики смеси, при этом влияние добавки PR PLASTS более значимо.

Ключевые слова: высокомодульная асфальтобетонная смесь; вязкоупругость; PR Module добавка; PR PLASTS добавка; испытание по определению динамического модуля упругости; тест на колееобразование; испытание на изгиб

Road characteristic study of a high modulus road concrete mix with various additives

Guangcong Ni, Evgeniya V. Uglova

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Corresponding author: Guangcong Ni, e-mail: ngc931123@163.com

Abstract. To develop recommendations for the high-modulus additives use in road concrete mix for pavement, in this work were considered two high-modulus additives: PR Module and PR PLASTS. A comparative analysis of the viscoelastic properties, characteristics at high and low temperatures, and the water-resistance of a high-modulus road concrete mix and a regular road concrete mix AS-20 was performed. In the scope of the study were performed tests to determine the dynamic elasticity modulus, wheel track rutting, three-point bending, and freeze-thawing stability. The various additives' influence on the high-modulus road concrete mix road characteristics were analyzed in detail. The results show that high

modulus additives can significantly improve the road concrete mix's high-temperature stability without compromising the resistance to low-temperature cracking. The asphalt concrete's high viscosity with the high modulus additives introduction can, to a certain extent, improve the water-resistance and fatigue characteristics of the mixture, while the effect of the PR PLASTS additive is more significant.

Keywords: high modulus road concrete mix; viscoelasticity; PR Module additive; PR PLASTS additive; test to determine the dynamic modulus of elasticity; wheel track rutting test; bending test

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Согласно анализу большая часть китайских исследований высокомодульных асфальтобетонных смесей связана с их низкотемпературными, усталостными характеристиками и оценкой их применения в дорожном строительстве [1–6]. Проведено мало исследований механизма влияния высокомодульных добавок на свойства асфальтобетона. Отсутствует ясность в вопросе эффективного применения различных добавок. В этой статье сравниваются и анализируются эксплуатационные характеристики высокомодульных асфальтобетонных смесей с различными добавками на основе результатов экспериментов: улучшенные характеристики устойчивости к колееобразованию при высоких температурах, низкотемпературного растрескивания, водостойкости асфальтобетонной смеси, адгезии между вяжущим и заполнителем. Цель работы – обеспечить стабильность эффективного применения высокомодульной асфальтобетонной смеси при устройстве слоев дорожной одежды, улучшить эксплуатационные характеристики высокомодульной асфальтобетонной смеси.

1. Приборы и материалы

1. Equipment and materials

В этой работе использовались следующие приборы: электромагнитный плотномер ZXL-305, ротационный вискозиметр LNY-0621, прибор для определения количества вяжущего в асфальтобетонных смесях LLN-II, пенетромтр для определения влажности грунта, прибор для определения температуры размягчения, прибор для определения пенетрации SYD-2801F, дуктилометр SY-1.5, пресс испытательный, машина для испытания динамического модуля упругости SPT, Ротационный компактор SGC, Рут-тестер. Данные приборы соответствуют стандартам JTG E20-2011 Министерства транспорта Китая, благодаря чему результаты этого исследования имеют практическое значение.

1.1 Заполнитель

1.1 Filling matter

Для обеспечения характеристик высокомодульной асфальтобетонной смеси выбор заполнителей должен основываться на принципе увеличения модуля. Подбор крупных заполнителей следует производить из каменных материалов, среди которых следует выбирать высокопрочный известняк с

хорошей износостойкостью и угловатый известняк. Большинство мелкого заполнителя используется для заполнения пустот в каркасе, образованных крупными агрегатами, которые должны быть сухими, чистыми, иметь кубовидную форму и угловатые края. Согласно этому принципу, для крупного и мелкого заполнителей необходимо использовать известняк из Тайюане, Шаньси. Показатели заполнителей, такие как размер частиц и степень измельчения показаны в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Показатели заполнителя

Filler indicators

Показатели Indicators	Требования к показателям Performance requirements, %	Результаты эксперимента Experiment Results, %
Дробимость, % Breakability, %	≤ 27	15.6
Потеря при износе, % Wear loss, %	≤ 31	13.2
Водопоглощение, % Water absorption, %	≤ 2.0	0.8
Полируемость (BPN) Buffability (BPN)	≥ 41	47
Адгезия Adhesion	≥ 4	7
Прочность, % Durability, %	≤ 13	8
Морозоустойчивость, % Frost resistance, %	≤ 6	4
Пустотность, % Porousness, %	≤ 27	14

Из таблицы 1 видно, что выбранные для исследований заполнители соответствуют техническим требованиям.

1.2 Вяжущее

1.2 Bonding substance

Смесь высокомодульного асфальтобетона должна иметь хорошую жаростойкость и устойчивость к колебаниям [7]; поэтому необходимо использовать битум большей консистенции и вязкости. В данной статье используется битум марки 70#, результаты испытаний его основных показателей приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты испытаний вяжущего

Bonding substance test results

Показатели Indicators	Измеренное значение Measured value	Требования к показателю Indicator requirements
Пенетрация, PI Penetration, PI	-0.8	-1.4~1.0

Показатели Indicators	Измеренное значение Measured value	Требования к показателю Indicator requirements	
Дуктильность (растяжимость) при 10 °С, см Ductility (extensibility) at 10 °С, cm	> 20	≥ 20	
Дуктильность (растяжимость) при 15 °С, см Ductility (extensibility) at 15 °С, cm	> 100	≥ 100	
Температура размягчения, °С The softening point, °С	47	≥ 44	
60 °С динамическая вязкость, (Pa*s) 60 °С dynamic viscosity, (Pa*s)	181	≥ 180	
Содержание парафинов, % Paraffin content, %	1.9	≤ 2.2	
Растворимость, % Solvency, %	99.6	≥ 99.5	
15 °С Плотность, (g·cm ⁻³) 15 °С Density, (g cm ⁻³)	1.00	Измеренная запись Measured record	
Изменение качества, % Quality change, %	0.5	≤ ±0.8	
После TFOT After TFOT	10 °С дуктильность, см 10 °С ductility, cm	9	≥ 6
	15 °С дуктильность, см 15 °С ductility, cm	16	≥ 15
	Коэффициент остаточной пенетрации, % Residual penetration coefficient, %	63	≥ 61

1.3 Минеральный порошок

1.3 Mineral dust

Минеральный порошок и битум образуют асфальтовое вяжущее, которое используется для заполнения пор в асфальтобетонных смесях. Асфальтовое вяжущее может играть ключевую роль в прочности и устойчивости асфальтобетона. Поскольку щелочной камень имеет прочную адгезию с битумом, минеральный порошок обычно изготавливается из щелочного камня, такого как базальт и известняк. Плотность минерального порошка составляет 2,65 г/см³.

1.4 Добавка

1.4 Additive

Введение функциональных добавок в состав обычного асфальтобетона позволяет повысить модуль упругости смеси за счет улучшения вязкоупругих характеристик битума и температурной чувствительности [8]. Высокая вязкость высокомодульного асфальта может улучшить устойчивость смеси к высоким температурам и колееобразованию. В этой статье, в процессе приготовления высокомодульного асфальтобетона для дорожных покрытий, использовали добавки PR Module и PR SPLAST, произведенные во Франции (рисунки 1, 2). Согласно текущему состоянию исследований, рекомендуемое количество добавки составляет 0,3 %~0,4 % от количества используемой

асфальтовой смеси, количество добавок, которые использовались в этом проекте, составляет 0,35 %. Кроме того, физические свойства и состав добавок представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3
Физические свойства и состав высокомодульных добавок
High modulus additives physical properties and composition

Виды добавок Types of additives	Размер, mm Size, mm	Температура плавления, °C Melting point, °C	Плотность, (g·cm ⁻³) Density, (g cm ⁻³)	Цвет и внешний вид Color and appearance
PR Module PR Module	5	174	0.93~0.97	Черные цилиндрические частицы Black cylindrical particles
PR SPLAST PR SPLAST	2~4	135~145	0.90~0.97	Черные цилиндрические частицы Black cylindrical particles



Рисунок 1. Добавка PR Module
Figure 1. Add PR Module



Рисунок 2. Добавка PRO SPLAST
Figure 2. PRO SPLAST additive

2. Методы экспериментальных исследований

2. Experimental test methods

Добавление к смеси различных видов функциональных добавок выполняется при приготовлении асфальтобетонной смеси, затем на основе испытаний сравниваются высокотемпературная стабильность и другие свойства [9]. Кроме того, в соответствии с тем же гранулометрическим составом и типом битума готовятся образцы обычной асфальтобетонной смеси и анализируются результаты эксперимента.

2.1 Метод испытания динамического модуля

2.1 Dynamic modulus test method

Ротационный уплотнитель SGC был использован для формирования образца (рис. 3). Для доведения сформованного образца до параметров стандартного образца для испытания на динамический модуль упругости используется стержневой станок и камнерезный станок. В соответствии с требованиями JTG E42-2011 «Правила испытаний дорожного асфальтобетона и асфальтобетонных смесей»¹ испытание динамического модуля упругости при одноосном сжатии проводилось на подготовленных в помещении образцах (рис. 4, 5).



Рисунок 3. Роторный компактор SGC

Figure 3. Rotary compactor SGC



Рисунок 4. Испытательная машина SPT

Figure 4. Testing machine SPT



Рисунок 5. Испытательное устройство SPT

Figure 5. Test device SPT

Для испытания на динамический модуль используется испытательная машина SPT, а процедура испытания соответствует AASHTO TP-62. В испытании используется контроль напряжения, и к образцу смеси прикладывается синусоидальная нагрузка [10]. В ходе теста можно определить три параметра: динамический модуль $|E^*|$, комплексный модуль E^* , фазовый угол Φ . Комплексный модуль упругости состоит из действительной и мнимой частей и используется для определения вязкоупругих характеристик напряженно-деформированного состояния асфальтобетонных смесей [11], как показано в следующей формуле:

$$E^* = E' + iE'' \quad (1)$$

где E'' – модуль потерь, E' – модуль упругости.

Динамический модуль – это абсолютное значение комплексного модуля, который представляет способность смеси сопротивляться деформации. Формула расчета динамического модуля выглядит следующим образом:

¹ JTG E42-2011 "Правила испытаний асфальтобетона и асфальтобетонной смеси для дорожного строительства".

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad (2)$$

Когда испытание достигает установившегося состояния, динамический модуль определяется отношением амплитуды напряжения к амплитуде деформации:

$$|E^*| = \frac{\sigma_{amp}}{\varepsilon_{amp}} \quad (3)$$

где ε_{amp} – амплитуда деформации, а σ_{amp} – амплитуда напряжения.

Фазовый угол Φ описывает размер вязкой части и определяется по следующей формуле:

$$\Phi = 2\pi f \Delta t \quad (4)$$

где f – приложенная частота нагрузки, Δt – время задержки деформации относительно напряжения в испытании. С увеличением фазового угла вязкостные свойства материала увеличиваются.

2.2 Метод испытания рабочих характеристик при высоких температурах

2.2 Test method for high-temperature performance

Согласно JT/T 670-2006 «Машина для испытания на колейность»² образец для испытания на колейность изготавливается методом роликовой формовки, требуемая температура составляет 60 °С, и давление в колесе составляет 0,7 МПа, чтобы выдерживать осевую нагрузку. Под действием стандартной нагрузки на ось размер испытательного образца пластины колеи составляет 300 мм × 300 мм × (50 мм ~ 100 мм). Как показано на рисунках 6–7.



Рисунок 6. Автоматический тестер колейности

Figure 6. Automatic wheel track tester



Рисунок 7. Испытательный образец на устойчивость к колее

Figure 7. Test piece for track resistance

² JT/T 670-2006 "Машина для испытания на колейность".

Кроме того, количество перемещений осевой нагрузки на 1 мм деформации является динамической стабильностью. Формула расчета:

$$DS = \frac{[(t_2 - t_1) \times N]}{(d_2 - d_1)} \cdot C_1 \cdot C_2 \quad (5)$$

где: DS – динамическая устойчивость асфальтовой смеси, (Times/mm);

d_1 – деформация, соответствующая времени t_1 , (mm);

d_2 – деформация, соответствующая времени t_2 , (mm);

C_1 – коэффициент типа испытательной машины, возвратно-поступательный режим работы нагружающего колеса с приводом от шатуна кривошипа – 1,0;

C_2 – коэффициент для образца шириной 300 мм, приготовленного в лаборатории, составляет 1,0;

N – скорость возвратно-поступательного движения испытательного колеса, 42 times/min.

Для параллельных испытаний берут 3 образца асфальтобетонной смеси с той же добавкой. Когда коэффициент вариации динамической устойчивости трех образцов для испытаний ≤ 20 , в качестве результата испытания принимается среднее значение. Когда коэффициент вариации > 20 , следует проанализировать причину и повторить тест.

2.3 Метод испытания работоспособности при низких температурах

2.3 Test method for performance at low temperatures

Высокомодульная асфальтобетонная смесь имеет лучшую стабильность при высоких температурах и устойчивость к колебаниям [12–13], поэтому необходимо обеспечить, чтобы низкотемпературные характеристики также были в центре внимания при изучении высокомодульных асфальтобетонных смесей [14–17].

Для определения механических свойств разрушения асфальтобетонной смеси при изгибе при заданной температуре и скорости нагружения. В этом испытании образец стандартного размера был вырезан после формования колесами (рис. 8). Для тестирования используется испытательная машина UTM-100, оснащенная датчиком нагрузки, измерителем перемещений и системой сбора данных (рис. 9, 10).



Рисунок 8. Стандартный образец

Figure 8. Standard sample



Рисунок 9.

*Испытательная машина
UTM-100*

*Figure 9. Testing machine
UTM-100*



Рисунок 10. Тестовое устройство

Figure 10. Test device

Согласно правилам испытаний на изгиб асфальтобетонной смеси, испытание на отказ при низкотемпературном изгибе требует разрушающей нагрузки при выходе из строя испытательного образца и прогиба в середине пролета для получения максимального значения деформации изгиба смеси. Формула расчета:

$$R_B = 3LP_B / 2bh^2 \quad (6)$$

$$\varepsilon_B = 6hd / L^2 \quad (7)$$

$$S_B = R_B / \varepsilon_B \quad (8)$$

где: R_B – прочность на изгиб и растяжение при разрыве образца, (МПа);

ε_B – максимальная деформация изгиба и растяжения при разрушении образца, ($\mu\varepsilon$);

S_B – модуль жесткости при изгибе при разрушении образца, (МПа);

P_B – максимальная нагрузка при разрушении образца, (N);

L – длина образца, (mm);

b – ширина образца, (mm);

h – высота образца, (mm);

d – прогиб в середине пролета при разрушении образца, (mm).

2.4 Метод испытания на водостойкость

2.4 Water resistance test method

Результаты испытания по определению механических свойств асфальтобетонной смеси при заданной температуре и частоте нагружения при расколе используются при выборе механических расчетных параметров асфальтобетонной смеси и оценке низкотемпературных параметров асфальтобетонной смеси при проектировании конструкции дорожной одежды. В этом методе используется автоматический тестер Marshall, оснащенный устройством для измерения и регистрации нагрузки и деформации образца (рис. 11, 12).

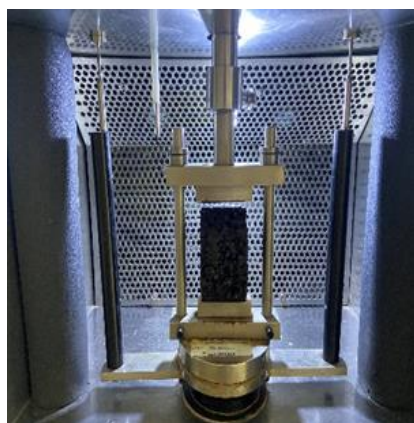


Рисунок 11. Автоматическая испытательная машина Маршалла

Figure 11. Automatic Marshall testing machine



Рисунок 12. Устройство для пробной эксплуатации

Figure 12. Device for trial operation

Если диаметр испытательного образца составляет $100 \text{ мм} \pm 2,0 \text{ мм}$, а ширина валика составляет $12,7 \text{ мм}$, Прочность при расколе R_T рассчитывается по следующей формуле:

$$R_T = 0.006287P_T/h \quad (9)$$

где: R_T – Прочность при расколе, (МПа);

P_T – Максимальное значение нагрузки образца, (N);

h – Высота образца, (mm).

Когда вода скапливается на асфальтобетонном покрытии, повторяющаяся нагрузка автомобилей может привести к постоянному изменению давления внутри дорожного покрытия, а затем вода продолжает проникать в трещины, сила сцепления битума (вяжущего) с каменным материалом также уменьшается, что вызывает старение и разрушение асфальтобетона, а также снижение прочности дорожного покрытия. Требования соответствующих спецификаций для испытания на замораживание-оттаивание заключаются в том, что их стандартные испытания должны основываться на параллельных испытаниях, кроме того,

измеряют прочность на раскол образца при незамерзании-оттаивании и прочность на раскол при замораживании-оттаивании после цикла замораживания-оттаивания. Кроме того, необходимо оценить остаточную стабильность испытуемого образца.

3. Результаты исследований

3. Research results

3.1 Вязкоупругие свойства высокомодульных асфальтобетонных смесей с различными добавками

3.1 High modulus road concrete mix viscoelastic properties with various additives

Ротационный уплотнитель SGC использовался для формирования образца для испытаний. В соответствии с требованиями AASHTO TP-62, образец для испытания формирования SGC был заполнен сердцевиной (150 мм×100 мм) для испытания динамического модуля. Использовались температура 60 °С, частоты (25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,1 Hz). Для анализа данных испытаний динамического модуля авторы исследовали зависимость между динамическим модулем упругости и частотой, фазовым углом и частотой, а также фазовым углом и когезией, как показано на рисунках ниже.

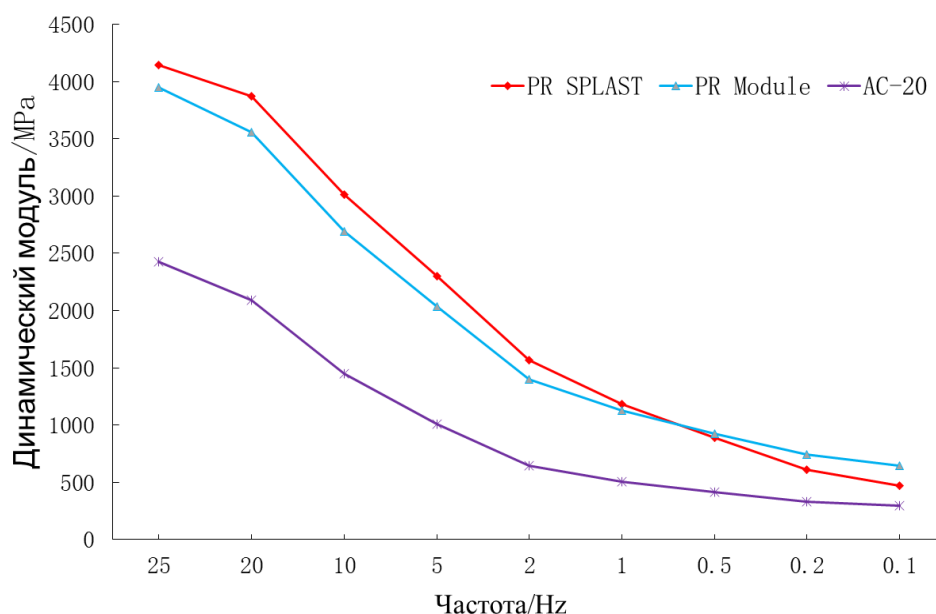


Рисунок 13. Анализ данных динамического модуля и частоты при 60 °С

Figure 13. Dynamic modulus and frequency data analysis at 60 °C

Из рисунка 13 видно, что на динамический модуль асфальтобетонной смеси, очевидно, влияет частота нагружения. По мере уменьшения частоты нагружения время нагружения увеличивается, а динамический модуль

уменьшается. Это происходит главным образом потому, что асфальтобетонная смесь представляет собой вязкоупругий материал. В высокочастотном состоянии асфальтобетонная смесь в основном проявляет упругие свойства. В низкочастотном состоянии асфальтовая смесь имеет повышенную вязкость и пониженный модуль.

По сравнению с динамическим модулем обычной асфальтобетонной смеси AC-20, добавление высокомодульных добавок позволяет значительно увеличить динамический модуль упругости, и эффект от добавки PR SPLASHT наиболее очевиден. Высокомодульные добавки увеличивают угол внутреннего трения смеси и ограничивают относительное трение между агрегатами, тем самым увеличивая ее динамический модуль.

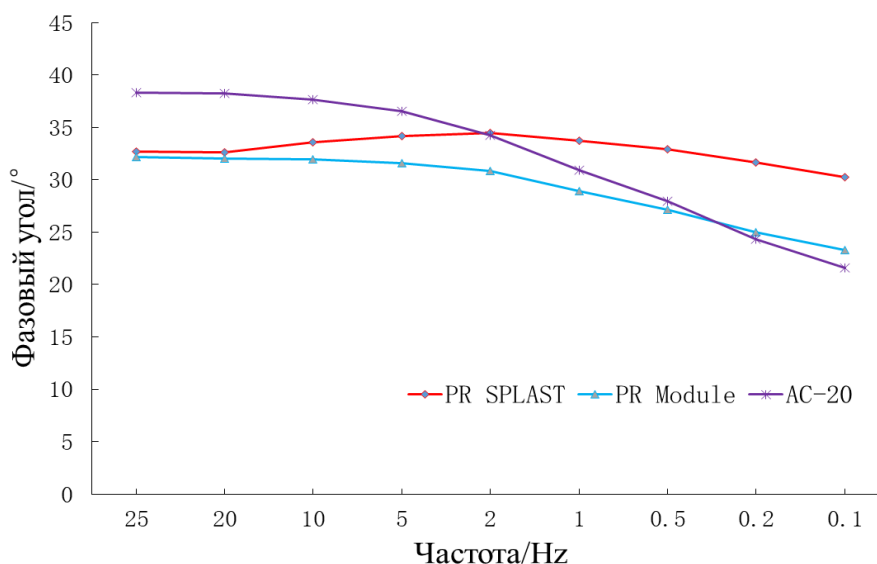


Рисунок 14. Анализ данных по фазовому углу и частоте при 60 °С

Figure 14. Phase angle and frequency data analysis at 60 °C

Как видно из рисунка 14, фазовый угол асфальтобетонной смеси с добавкой PR SPLAST сначала увеличивается, а затем уменьшается с уменьшением частоты нагружения. Это связано с тем, что уменьшение частоты нагружения может способствовать перемещению полимерных сегментов и увеличивать фазовый угол, но по мере того, как частота нагружения продолжает уменьшаться, явление гистерезиса ослабевает и фазовый угол уменьшается. Для асфальтобетона с добавкой PR Modul и обычного асфальтобетона AC-20 фазовый угол имеет тенденцию к уменьшению с уменьшением частоты нагружения. Поскольку вяжущее демонстрирует очевидную вязкость в условиях высоких температур, асфальтовый раствор становится мягким, каркасный эффект смеси играет ведущую роль, и фазовый угол становится меньше.

Всесторонний сравнительный анализ показал, что две высокомодульные добавки к асфальтобетону могут уменьшить фазовый угол асфальтобетонной смеси, поскольку фазовый угол представляет собой

относительное соотношение упругого компонента и вязкого компонента асфальтового материала, то, чем меньше фазовый угол, тем выше эластичность материала.

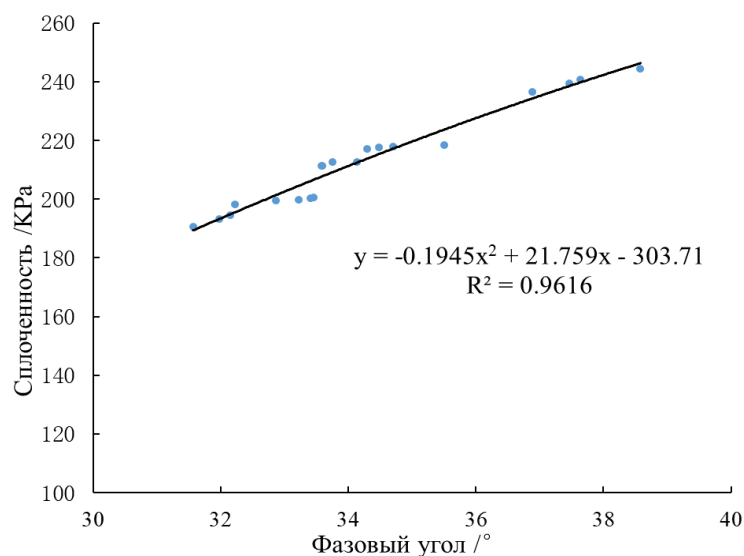


Рисунок 15. Фазовый угол и закон изменения его силы сцепления, соответствующие частоте нагружения 10Hz

Figure 15. Phase angle and the law of variation of phase angle adhesion force corresponding to a loading frequency of 10 Hz

Как видно из рисунка 15, в условиях 60 °C и 10 Hz с увеличением фазового угла когезия увеличивается, показывая положительную корреляцию. Когезия характеризует прочность связи между молекулами органического вяжущего. В условиях высоких температур асфальтовый материал из эластичного становится вязким. Высокомодульные добавки могут увеличить упругий компонент асфальтового материала, увеличить прочность связи между молекулами вяжущего и уменьшить фазовый угол. То есть, в условиях 60 °C и 10 Hz, чем выше фазовый угол высокомодульной асфальтовой смеси, тем выше компонент вязкости, тем лучше адгезионный эффект между асфальтовым вяжущим и заполнителем и тем больше сцепление.

3.2 Высокотемпературные характеристики высокомодульных асфальтобетонных смесей с различными добавками

3.2 High-temperature characteristics of high modulus road concrete mix with various additives

В соответствии с описанными выше методиками авторами проведены испытания высокотемпературных характеристик асфальтобетонов. Результаты испытаний показаны в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4
Результаты испытаний на колейность различных типов асфальтобетонных смесей
Results of rutting tests for various types of road concrete mix

Различные виды асфальтобетонных смесей Various types of road concrete mix	Дозировка битума, % Bitumen dosage, %	Динамическая устойчивость, (times·мм ⁻¹) Dynamic stability, (times-mm ⁻¹)				Среднее значение Mean	Коэффициент вариации, % The coefficient of variation, %	Технические требования к коэффициенту вариации, % Technical requirements for the variation coefficient, %	Технические требования к динамической устойчивости, (Times·мм ⁻¹) Dynamic stability specifications (Times·mm ⁻¹)
		1	2	3					
АС-20 AC-20	4.4	1495	1522	1277	1431	9.3	≤ 20	≥ 2800	
PR Module PR Module	4.4	10447	13924	14468	12946	16.7	≤ 20	≥ 2800	
PR SPLAST PR SPLAST	4.4	11734	16772	15408	14638	17.7	≤ 20	≥ 2800	

Согласно таблице 4 средняя динамическая устойчивость обычной асфальтобетонной смеси АС-20 составляет 1431 (times·мм⁻¹), средняя динамическая стабильность двух высокомодульных асфальтобетонных смесей, PR Module и PRSPLAST, составляет 12946 (times мм⁻¹) и 14638 (times мм⁻¹), среди них более заметным является среднее значение высокомодульной асфальтобетонной смеси с добавкой PR SPLAST. В то же время коэффициенты вариации трех смесей соответствуют требованиям, однако технические требования к динамической устойчивости обычных асфальтобетонных смесей АС-20 не соответствуют действующим спецификациям. Видно, что добавление добавок PR Module и PR SPLAST может обеспечить соответствие требованиям стандартов, а их устойчивость к высоким температурам также может быть значительно улучшена.

3.3 Низкотемпературные характеристики высокомодульных асфальтобетонных смесей с различными добавками

3.3 Low-temperature characteristics of high-modulus road concrete mix with various additives

Согласно методу испытания асфальтобетонных смесей при низких температурах, в данной работе проведено испытание на низкотемпературный изгиб для получения деформации разрушения асфальтобетонной смеси и анализ низкотемпературной энергии. Результаты испытаний на низкотемпературный изгиб различных типов асфальтобетонных смесей приведены в таблице 5.

Таблица 5 / Table 5

Результаты испытаний на низкотемпературный изгиб различных типов асфальтобетонных смесей

Tests results for low-temperature bending of various types of road concrete mix

Различные виды асфальтобетонных смесей Various types of road concrete mix	Номер образца Sample number	Отказ деформации, $\mu\epsilon$ Failure strain, $\mu\epsilon$	Прочность на изгиб, МПа Flexural strength, MPa	Средний прогиб, mm Average deflection, mm	Максимальная нагрузка, KN Maximum load, KN
АС-20 AC-20	1	2178.1	10.09	0.388	1.468
	2	1893.3	9.23	0.336	1.354
	3	2030.2	7.43	0.361	1.024
	Средняя Average	2033.8	12.28	0.361	1.282
PR Module PR Module	1	2000.9	10.1	0.356	1.468
	2	2320.4	11.2	0.414	1.619
	3	2216.4	8.4	0.395	1.248
	Средняя Average	2179.2	29.7	0.388	1.445
PR SPLAST PR SPLAST	1	2424.4	12.1	0.433	1.733
	2	2473.7	12.3	0.442	1.769
	3	2232.8	12.8	0.398	1.679
	Средняя Average	2376.9	12.4	0.427	1.727

Согласно таблице 5, при соответствующих условиях испытаний среднее значение прочности на изгиб двух высокомодульных асфальтовых смесей PR Module и PR SPLAST аналогично среднему значению для обычной асфальтовой смеси АС-20. Кроме того, средняя деформация разрушения обычной асфальтовой смеси АС-20 составляет 2033,8 $\mu\epsilon$, средняя деформация разрушения высокомодульной асфальтовой смеси PR SPLAST составляет 2376,9 $\mu\epsilon$, что на 343,1 $\mu\epsilon$ выше, чем у обычной асфальтовой смеси АС-20. Можно проанализировать, что добавление в асфальтобетонную смесь добавок PR Module и PR SPLAST может эффективно улучшить высокотемпературную стабильность асфальтовой смеси, гарантируя, что это не слишком сильно повредит ее низкотемпературным характеристикам.

3.4 Водостойкость высокомодульных асфальтобетонных смесей с различными добавками

3.4 Water resistance of high modulus road concrete mix with various additives

В этой статье испытание на разрушение при замораживании-оттаивании используется для проверки водостойкости высокомодульных асфальтобетонных смесей. Результаты испытаний для различных типов асфальтобетонных смесей при замораживании-оттаивании представлены в таблице 6.

Таблица 6 / Table 6
Результаты испытаний различных типов асфальтобетонных смесей
Test results of various types of road concrete mix

Различные виды асфальтобетонных смесей Various types of road concrete mix	Прочность при замораживании-оттаивании, МПа Freeze-thaw strength, MPa	Прочность на раскалывание без замораживания-оттаивания, МПа Splitting strength without freezing-thawing, MPa	TSR/% TSR/%
AC-20 AC-20	0.5022	0.6141	81.1
PR Module PR Module	0.9755	1.1409	84.6
PR SPLAST PR SPLAST	1.1601	1.3474	91.8

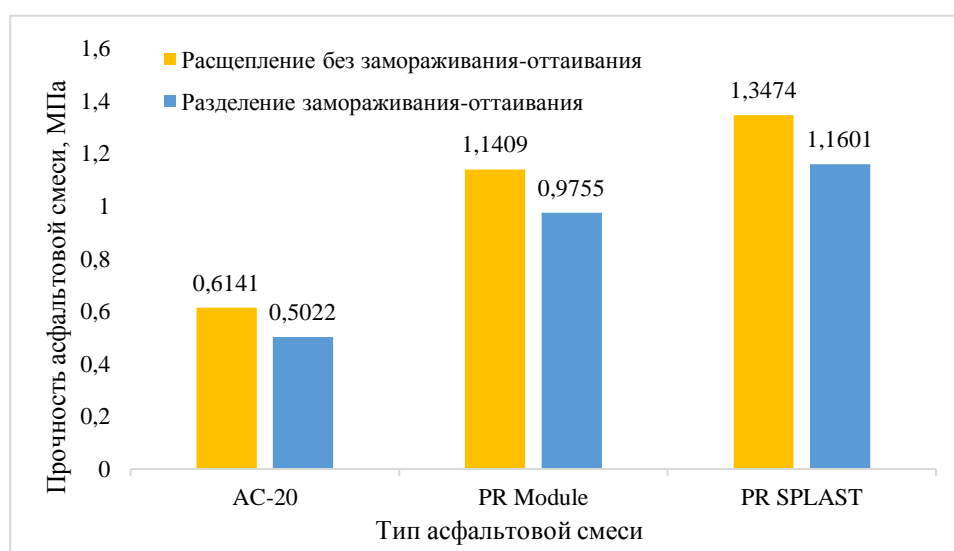


Рисунок 16. Сравнение результатов раздельного теста замораживания-оттаивания
Figure 16. Comparison of the results of the split freeze-thaw test

Как видно из рисунка 16, как обычные асфальтобетонные смеси, так и высокомодульные асфальтобетонные смеси обладают лучшей водостойкостью. Прочность высокомодульной асфальтобетонной смеси PR SPLAST при замерзании и оттаивании составляет 1,16 МПа, прочность обычной асфальтобетонной смеси AC-20 на раскол при замораживании-оттаивании составляет 0,50 МПа, на этой основе значительно улучшена прочность на раскалывание высокомодульного асфальта при замораживании-оттаивании, поскольку высокая вязкость высокомодульного асфальта увеличивает адгезию между битумом и заполнителем, в свою очередь, эффективная толщина асфальтовой мембраны увеличивается. Кроме того, показатель TSR высокомодульной асфальтобетонной смеси PR SPLAST достиг 91,8 %, что на 10 % выше, чем у обычной асфальтовой смеси, это показывает, что высокомодульные добавки повышают водостойкость обычных асфальтовых смесей.

Вывод

Conclusion

Таким образом, мы используем 0,35 % высокомодульных добавок в асфальтобетонной смеси для эффективного повышения эксплуатационных характеристик дорожных покрытий. Кроме того, результаты испытаний высокомодульного асфальта сравниваются с результатами испытаний обычного асфальта АС-20, и делаются следующие выводы:

1. Высокомодульные добавки могут уменьшить фазовый угол асфальтобетонной смеси и увеличить упругий компонент. В условиях 60 °С сила сцепления высокомодульной асфальтобетонной смеси увеличивается с увеличением фазового угла, показывая положительную корреляцию; Его можно использовать для оценки прочности сцепления между органическим вяжущим и заполнителем путем изменения фазового угла, соответствующего силе сцепления при 60 °С и частоте нагружения 10 Нз.
2. Количество этих двух добавок должно составлять 0,35 % от массы материала асфальтобетонной смеси, Таким образом, его динамическая устойчивость может быть примерно в 10 раз выше, чем у обычной асфальтовой смеси АС-20, Среднее значение динамической устойчивости асфальтовой смеси PR SPLAST составляет 14638 (times мм⁻¹). Он имеет наибольшее значение среди различных типов асфальтобетонных смесей, кроме того, можно эффективно улучшить высокотемпературные характеристики высокомодульной битумной смеси с добавками.
3. Средняя деформация разрушения обычного АС-20 составляет 2033,8 мк, средняя деформация разрушения высокомодульной асфальтобетонной смеси PR SPLAST составляет 2376,9 мк, это на 343,1 мк больше, чем у обычной асфальтовой смеси АС-20. Можно сделать вывод, что добавление двух добавок к асфальтобетонной смеси эффективно улучшает высокотемпературную стабильность асфальтобетонной смеси, гарантированно не ухудшая ее низкотемпературные характеристики.
4. Прочность на раскол при замораживании-оттаивании двух высокомодульных асфальтобетонных смесей, PR Module и PR SPLAST, составляет 0,9755 МПа и 1,1601 МПа соответственно. По сравнению с 0,5022 МПа для обычной асфальтобетонной смеси АС-20. Значение TSR для высокомодульных асфальтобетонов также выше, чем у обычной асфальтобетонной смеси АС-20, что указывает на их повышенную водостойкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Углова Е.В.** Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля / Е.В. Углова, А.Н. Тиратурян, А.А. Ляпин. – DOI <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08> // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 2. – С. 111–130. – URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/article/view/204> (дата обращения: 02.09.2020).
2. **Йижонг Ванг** 高模量沥青混合料适用性研究 [Исследование применимости высокомодульной асфальтобетонной смеси] / Йижонг Ванг // 公路工程 [Дорожное строительство]. – 2015. – Т 40, № 06. – С. 252–255+275. (На кит. яз.).
3. **Uglova E.** Reliability-Oriented Method of Flexible Pavement Management / E. Uglova, A. Tiraturyan, G. Aslanyan. – DOI <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819603005> // XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP) (TFoCE 2018) / Ростов-наДону: 2018. – С. 3005. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_03005/mateconf_rs_p2018_03005.html (дата обращения: 12.09.2020).
4. **Жингхуа Ксиа** Исследование характеристик высокомодульной асфальтовой смеси с различными добавками / Жингхуа Ксиа, Лижунан Ма // Heilongjiang Transportation Technology. – 2012. – Т 8. – С. 19–21. (На кит. яз.).
5. **Ксинян Хуанг** 高模量沥青混合料的性能及适用场合 [Характеристики и случаи применения высокомодульной асфальтовой смеси] / Ксинян Хуанг, Аимин Сха, Ксиаолонг Зоу, Вей Жианг // 公路交通科技 [Наука и технологии в области автомобильного транспорта]. – 2016. – Т 33, № 12. – С. 35–41. (На кит. яз.).
6. **Лижие Ма** 掺加纤维对高模量沥青混合料柔韧性及路用性能影响研究 [Исследование влияния добавления волокна на гибкость и дорожные характеристики высокомодульной асфальтовой смеси] / Лижие Ма, Схунфенг Йанг // 功能材料 [Функциональные материалы]. – 2019. – Т 50, № 01. – С. 1164–1173+1177. (На кит. яз.).
7. **Вей Ли** 沥青道面高温抗车辙性能评价指标 [Индекс оценки высокотемпературных свойств противокочнежности асфальтобетонного покрытия] / Вей Ли, Меиян Хуанг, Жиангуо Вей // 长沙理工大学学报:自然科学版 [Журнал Чаншанского университета науки и технологий: издание Естественные науки]. – 2013. – Т 10, № 4. – С. 9–16. (На кит. яз.).
8. **Ксуеюан Лу** Исследование уровня деформации сдвига в высокомодульном асфальтобетонном покрытии / Ксуеюан Лу, Йанна Сун, Лихан Ли // Materials and Tests. – 2018. – Т 3. – С. 81–84. (На кит. яз.).

9. **Тиратурян А.Н.** Исследование распределения энергии динамического воздействия транспортных средств в слоях нежесткой дорожной конструкции / А.Н. Тиратурян, Е.В. Углова, А.А. Ляпин. – DOI <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.2.10> // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 2. – С. 178–194. – URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/article/view/151> (дата обращения: 024.09.2020).
10. **Зхенхуа Ванг** Применение SPT-теста для изучения высокотемпературных характеристик модифицированной асфальтобетонной смеси / Зхенхуа Ванг, Веикун Тиан, Схиксианг Йан // Highway traffic technology. – 2010. – № 6. – С. 24–28. (На кит. яз.).
11. **Bari J.** Development of a New Revised Version of the Witzczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures / J. Bari, M. Witzczak // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2006. – Т 75. – С. 381–423.
12. **Liu Qiang** Experimental Study on the Performance of High Modulus of Asphalt Mixture / Liu Qiang, Qin Jian-jun, Weng Xiao-lin, Dai Jing-liang, Jiang Yang-jun // Journal of Zhengzhou University (Engineering Science). – 2009. – № 4. – С. 98–102. – URL: http://caod.oriprobe.com/articles/29459589/Experimental_Study_on_the_Performance_of_High_Modulus_of_Aspalt_Mixtu.htm (дата обращения: 17.09.2020). – (На кит. яз.).
13. **Ксинжиан Рен** Экспериментальное исследование и оценка дорожных характеристик высокомодульной асфальтобетонной смеси / Ксинжиан Рен // Petroleum Asphalt. – 2009. – Т 23, № 4. – С. 30–37. (На кит. яз.).
14. **Йангкун Оу** 添加剂对高温高湿环境温拌橡胶混合料高温和水稳定性的影响 [Влияние добавок на высокую температуру и водостойкость теплой резиновой смеси в условиях высокой температуры и высокой влажности] / Йангкун Оу // 公路工程 [Дорожное строительство]. – 2016. – Т 41, № 06. – С. 237–244. (На кит. яз.).
15. **Uglova E.V.** Interlayer Bond Evaluation in the Flexible Pavement Structures Using a Nondestructive Testing Method / E.V. Uglova, A.N. Tiraturyan. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.172> // Procedia Engineering. – 2016. – Т 150. – С. 1791–1796. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816314898> (дата обращения: 26.09.2020).
16. **Sun Y.** Characterization of asphalt concrete linear viscoelastic behavior utilizing Havriliak–Negami complex modulus model / Y. Sun, J. Chen, B. Huang. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.016> // Construction and Building Materials. – 2015. – Т 99. – С. 226–234. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815303779> (дата обращения: 26.09.2020).
17. **Линлинг Ки** 基于抗车辙性能提升的复合高模量沥青混合料研究 [Исследование композитной высокомодульной асфальтобетонной смеси, основанное на улучшении свойств образованию колеи] / Линлинг Ки, Жианжун Гонг, Ксиаофеи Ванг, Схао Ву // 工程技术研究 [Исследования в области инженерных технологий]. – 2019. – Т 4, № 2. – С. 9–11. (На кит. яз.).

Сведения об авторах:

Ни Гуанцун – аспирант, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: ngc931123@163.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5659-7596>

Углова Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: uglova.ev@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4768-2427>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=456806
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57190176042>

Статья получена: 19.11.2020. Принята к публикации: 23.01.2021. Опубликовано онлайн: 06.02.2021.

REFERENCES

1. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Liapin A.A. Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing. *Bulletin of Perm State Technical University. Construction and Architecture*. 2016; (2): 111–130. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08>.
2. Yizhong Wang 高模量沥青混合料适用性研究 [Research on the applicability of high modulus asphalt mixture]. *公路工程 [Road Construction]*. 2015; 40(6): 252–255+275. (In Chin.).
3. Uglova E., Tiraturyan A., Aslanyan G. Reliability-Oriented Method of Flexible Pavement Management. In: V. Andreev, T. Matseevich, A. Ter-Martirosyan and A. Adamtsevich (Eds.). XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP) (TFoCE 2018). Rostov-on-Don: MATEC Web Conf.; 2018. p. 3005. Available at: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_03005/mateconf_rsp2018_03005.html (accessed 12th September 2020). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819603005>.
4. Jinghua Xia, Lijuan Ma Research on performance of high modulus asphalt mixture with different additives. *Heilongjiang Transportation Technology*. 2012; 8: 19–21. (In Chin.).
5. Xinyan Huang, Aimin Sha, Xiaolong Zou, Wei Jiang 高模量沥青混合料的性能及适用场合 [Performance and applicable occasions of high modulus asphalt mixture]. *公路交通科技 [Highway Traffic Technology]*. 2016; 33(12): 35–41. (In Chin.).
6. Lijie Ma, Chunfeng Yang 掺加纤维对高模量沥青混合料柔韧性及路用性能影响研究 [Performance and applicable occasions of high modulus asphalt mixture]. *功能材料 [Functional Materials]*. 2019; 50(1): 1164–1173+1177. (In Chin.).

7. Wei Li, Meiyang Huang, Jianguo Wei 沥青道面高温抗车辙性能评价指标 [Evaluation index of high temperature anti-rutting performance of asphalt pavement]. *长沙理工大学学报: 自然科学版 [Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science Edition]*. 2013; 10(4): 9–16. (In Chin.).
8. Xueyuan Lu, Yanna Sun, Lihan Li Research on shear strain level in high modulus asphalt pavement. *Materials and Tests*. 2018; 3: 81–84. (In Chin.).
9. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A. Studying the energy distribution of the dynamic influences of road transport on the layers of nonrigid pavements. *Bulletin of Perm State Technical University. Construction and Architecture*. 2017; (2): 178–194. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.2.10>.
10. Zhenhua Wang, Weikun Tian, Shixiang Yan Application of the SPT-test to study the high-temperature characteristics of modified asphalt concrete mixture. *Highway traffic technology*. 2010; (6): 24–28. (In Chin.).
11. Bari J., Witczak M. Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2006; 75: 381–423. (In Eng.).
12. Qiang Liu, Jianjun Qin, Xiaolin Weng, et al. Experimental Study on the Performance of High Modulus of Asphalt Mixture. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*. 2009; (4): 98–102. Available at: http://caod.oriprobe.com/articles/29459589/Experimental_Study_on_the_Performance_of_High_Modulus_of_Aspalt_Mixtu.htm (accessed 17th September 2020). (In Chin.).
13. Xinjian Ren Experimental study and evaluation of road performance of high modulus asphalt mixture. *Petroleum Asphalt*. 2009; 23(4): 30–37. (In Chin.).
14. Yangkun Ou 添加剂对高温高湿环境温拌橡胶混合料高温和水稳定性的影响 [The effect of additives on the high temperature and water stability of warm mixed rubber mixture in high temperature and high humidity environment]. *公路工程 [Road Construction]*. 2016; 41(6): 2016. (In Chin.).
15. Uglova E.V., Tiraturyan A.N. Interlayer Bond Evaluation in the Flexible Pavement Structures Using a Nondestructive Testing Method. *Procedia Engineering*. 2016; 150: 1791–1796. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.172>.
16. Sun Y., Chen J., Huang B. Characterization of asphalt concrete linear viscoelastic behavior utilizing Havriliak-Negami complex modulus model. *Construction and Building Materials*. 2015; 99: 226–234. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.016>.
17. Linling Qi, Jianjun Gong, Xiaofei Wang, Chao Wu 基于抗车辙性能提升的复合高模量沥青混合料研究 [Research on composite high modulus asphalt mixture based on anti-rutting performance improvement]. *工程技术研究 [Engineering Technology Research]*. 2019; 4(2): 9–11. (In Chin.).

Information about the authors:

Guangcong Ni – Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: ngc931123@163.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5659-7596>

Evgeniya V. Uglova – Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: uglova.ev@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4768-2427>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=456806
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57190176042>

Submitted: 19th November 2020. Revised: 23rd January 2021. Published online: 6th February 2021.