ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Научная статья

УДК 691.168:625.855.3
EDN: AXBJSW

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ, АРМИРОВАННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИМ ВОЛОКНОМ

Ирина Геннадьевна Насонова[1]✉
Светлана Владимировна Лира[2]

[1]Кубанский государственный технологический университет, институт строительства и транспортной инфраструктуры, Краснодар, Россия
[2]Государственное казенное учреждение Краснодарского края «Краснодаравтодор», Краснодар, Россия
[1]i_am_irina_dmitrieva@bk.ru✉

Аннотация. *Статья отражает часть диссертационного исследования одного из авторов данной публикации. Представлены результаты исследований технологической стабильности щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (ЩМАС), армированных синтетическим волокном. В качестве основного критерия технологической устойчивости рассматривался показатель стекания вяжущего. На основании оптимизации данного критерия были предложены эффективные составы добавок для асфальтобетонных смесей на основе синтетического волокна различной длины и короткого целлюлозного волокна в зависимости от максимальной крупности минерального заполнителя ЩМАС, а также с учетом полученных зависимостей к оценке вязкости асфальтовяжущих различного состава (для ЩМАС подобранного состава) при высокой рабочей температуре 160 °С. Разработанные методологические принципы регулирования технологических свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона могут быть использованы как элемент системы проектирования составов ЩМАС.*

Ключевые слова: *щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь (ЩМАС), технологическая устойчивость, синтетическое волокно, дисперсное армирование.*

Благодарности: авторы выражают признательность ГКУ КК «Краснодаравтодор» и ООО «Инжтех» за организационную и лабораторную поддержку при проведении настоящего исследования.

Для цитирования: Насонова И.Г., Лира С.В. Технологическая стабильность щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, армированных синтетическим волокном // Дороги и мосты. 2024. № 52/2. С. 321-346.

ROAD CONSTRUCTION MATERIALS

Original article

TECHNOLOGICAL STABILITY OF CRUSHED STONE-MASTIC ASPHALT CONCRETE MIXTURES REINFORCED WITH SYNTHETIC FIBRE

Irina G. Nasonova[1]✉
Svetlana V. Lira[2]

[1]Kuban State Technological University, Institute of Construction and Transport Infrastructure, Krasnodar, Russia
[2] Krasnodar Krai State Public Institution «Krasnodaravtodor», Krasnodar, Russia
[1]i_am_irina_dmitrieva@bk.ru✉

Abstract*: The article reflects a part of dissertation research by one of the authors of this publication. The results of researches on technological stability of crushed stone-mastic asphalt concrete mixtures reinforced with synthetic fibre are presented. As the main criterion of technological stability the indicator of binder run-off is considered. According to optimization of this criterion, the effective compositions of additives for asphalt concrete mixtures on the basis of synthetic fibre of different length and short cellulose fibre, depending on the maximum coarseness of mineral aggregate of crushed stone-mastic*

asphalt concrete mixtures, as well as taking into account the obtained dependences to the estimation of viscosity of asphalt binders of different composition (for crushed stone-mastic asphalt concrete mixtures of selected composition) at high working temperature of 160 °C, have been proposed. The developed methodological principles of regulation of technological properties of crushed stone-mastic asphalt concrete as an element of design system of crushed stone-mastic asphalt concrete mixtures composition can be used.

Keywords: *crushed stone-mastic asphalt concrete mixture, technological stability, synthetic fibre, dispersed reinforcement.*

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the Krasnodar Krai State Public Institution «Krasnodaravtodor» and «Inzhtekh» LLC for organizational and laboratory support in conducting this study.

For citation: Nasonova I.G., Lira S.V. Technological stability of crushed stone-mastic asphalt concrete mixtures reinforced with synthetic fibre // Roads and Bridges. 2024; (52/2): 321-346. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России отмечается значительный рост транспортных нагрузок на дорожные одежды с асфальтобетонными покрытиями автомобильных дорог, что обусловлено повышением уровня автомобилизации населения страны **[1]**.

В связи с этим требуется постоянное усовершенствование не только методологических подходов обеспечения надежности и долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий, но и способов достижения требуемых показателей надежности и деформационной устойчивости асфальтобетонных смесей, применяемых для устройства конструктивных слоев дорожных одежд, в том числе щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (ЩМАС).

К основным отличительным особенностям ЩМАС можно отнести: высокое содержание щебня самой крупной фракции, использование высококачественного модифицированного битума (полимербитума), использование стабилизирующего волокна. Та-

ким образом, качество этих трех компонентов в большой степени и определяют надежность и долговечность ЩМАС.

Если вопросы качества щебня (формы, состояния поверхности, прочности и т.д.) и вяжущего (использование различных полимеров и модификаторов) изучаются постоянно, наряду с развитием системы регламентирования требований к показателям их свойств, то повышение надежности такого компонента, как стабилизирующее волокно, не является приоритетной задачей в рамках общей концепции развития прочностных и деформационных свойств ЩМАС, и, по существу, её решением занимаются производители стабилизирующих добавок, главным образом на основе целлюлозного волокна.

Это объясняется тем, что ранее для стабилизации асфальтовяжущего широко использовались дешевые минеральные волокна, например, асбестовые **[2]** и целлюлозные **[3]**. Асбестовые волокна впоследствии были запрещены из-за опасности, представляющей для здоровья человека. Целлюлозное волокно применяется в достаточном объеме и в настоящее время. Основными торговыми марками целлюлозных стабилизирующих добавок в мире являются Viatop®, Topcel®, Antrocel® и др. На рынке Российской Федерации представлены также целлюлозные добавки отечественных производителей: Армидон, Нанобит-СД, СД-3 ГБЦ и многие другие. Реализуются также добавки на основе хризотилового (филлосиликатного) волокна: Хризопро и Стилобит.

В то же время еще при первых широких испытаниях при внедрении ЩМАС в США **[4]** было отмечено, что целлюлозные волокна оказывают очень незначительное влияние на механические свойства асфальтобетонных смесей и являются сугубо технологическими компонентами, предотвращающими стекание вяжущего при приготовлении, транспортировке, укладке и уплотнении в дорожном покрытии. При этом указывалось, что целесообразно рассматривать совместное использование волокна различной природы и разных свойств для дисперсного армирования асфальтобетонных смесей.

Дисперсное армирование асфальтобетона – хаотическое распределение в структуре асфальтобетона упрочняющих элементов, чаще всего волокна (т.е. элементов, длина которых значительно превышает их ширину/диаметр), для повышения его прочности и деформационной устойчивости.

В зависимости от размеров волокна при дисперсном армировании можно регулировать показатели взаимосвязанных между собой подструктур асфальтобетона (микроструктуры (асфальтовяжущего), мезоструктуры (асфальтового раствора) и макроструктуры (каменного каркаса)) **[5]**, с учетом величины изменения показателей свойств которых складывается общий эффект от такого армирования.

В мировой практике, помимо целлюлозных и асбестовых волокон, наиболее широко применяются дисперсно-армирующие волокна асфальтобетонных смесей, а именно: минеральные, например, базальтовые **[6]**; синтетические, в том числе арамидные, полиэфирные, полиамидные, полиакрилонитрильные, нейлоновые и т.д. **[7]**; полиолефиновые, в том числе полипропиленовые **[8]**; стеклянные **[9]**; углеродные **[10]**.

Кроме того, проведен ряд исследований влияния смеси волокон (например, стеклянного и полимерного **[11]**, минерального и синтетического **[12]**, арамидного и полимерного/синтетического **[13]**, например, добавка Forta-FI® **[14]**, углеводородного и полимерного **[15]** и т.д.) на прочностные и деформационные свойства дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей.

Если отталкиваться от общих представлений об армировании композитов волокнистыми компонентами, то в зависимости от ориентации армирования свойства композита могут быть следующими **[16]**:

- изотропными: со случайным расположением коротких армирующих элементов (волокна) или дисперсных частиц;
- анизотропными: например, с непрерывным армированием длинным волокном.

При этом выделяют 4 основных вида армирования коротким волокном **(рис. 1)**:

- произвольно расположенными короткими волокнами;
- направленно расположенными короткими волокнами;
- смесью коротких произвольно расположенных волокон с различными свойствами (формой);
- смесью коротких произвольно расположенных волокон и дисперсных частиц.

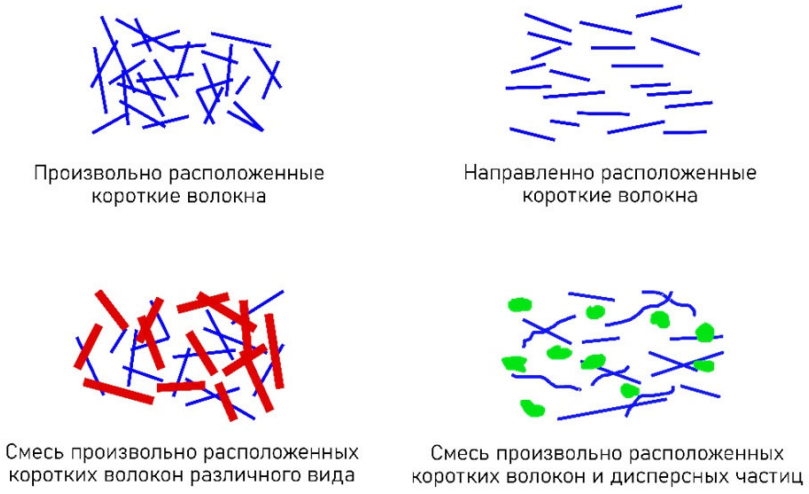

Рис. 1. Виды армирования коротким волокном

Механическая нагрузка на армированный волокном композит, не прикладывается непосредственно к отдельным волокнам, а перераспределяется через материал матрицы с концентрацией напряжений у концов волокна. Таким образом, свойства дисперсно-армированных коротким волокном композитов зависят в значительной степени от длины армирующего волокна.

Кроме того, существует критическая длина волокна l_{kr}, при которой происходит его разрушение **[16]**. При $l < l_{kr}$ величина растягивающих напряжений недостаточна для того, чтобы вызвать разрушение волокон, поэтому они вытягиваются из матрицы, и влияние их прочностных свойств не существенно. При $l > l_{kr}$ волокна разрушаются от растягивающих напряжений, и чем больше l, тем большей прочностью обладает структура композита. Критическая длина волокон увеличивается с уменьшением прочности границы раздела $\tau_{\text{гр}}$ и повышением прочности волокна $\sigma_{\text{в}}$ и его диаметра $d_{\text{в}}$.

Длина целлюлозного волокна в большинстве случае составляет 0,8 мм (с максимальной длиной отдельных волокон до 2 мм), что позволяет утверждать, что его длина l меньше критической l_{kr} вне зависимости от сдвиговой прочности границы раздела $\tau_{\text{гр}}$. Таким образом, целлюлозное волокно не может способствовать повышению прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных смесей, а выступает сугубо как наполнитель

асфальтовяжущего с повышенными адсорбционными свойствами **[17]**: показатель сорбции водяных паров при относительной влажности воздуха 65 % составляет 11-14 % по массе, в сравнении, например, с капроновым волокном, для которого данный показатель составляет 4-5 %. В то же время целлюлозное волокно обладает повышенным показателем набухания в воде – 55-130 %, для капронового данный показатель составляет 10-13 %.

Применительно к асфальтобетонным смесям, армированным коротким волокном (к данному виду волокна относятся и целлюлозные волокна), в качестве матрицы может выступать как асфальтовяжущее, так и вся структура асфальтобетона (асфальтовяжущее, мелкий и крупный заполнитель).

В отличие от целлюлозного волокна длина синтетических волокон может быть различна. С учетом особенностей свойств синтетических волокон их применение обеспечивает повышение не только технологической устойчивости (хоть и в меньшей в сравнении с целлюлозными волокнами степени) асфальтобетонных смесей, но и их показателей прочности и деформационной устойчивости (например, тогда, когда в качестве матрицы принимается структура асфальтобетона).

Таким образом, эффективная дисперсно-армирующая добавка для ЩМАС должна обеспечивать, во-первых, сохранение требуемых вязко-пластических свойств асфальтовяжущего как при температурах приготовления асфальтобетонных смесей, так и при низких температурах эксплуатации в покрытии, в том числе под воздействием агрессивных сред и воды, а, во-вторых, повышение структурной прочности асфальтобетонной матрицы на уровне крупного и мелкого заполнителя, что будет способствовать не только повышению циклической устойчивости и усталостной долговечности, но также росту показателей высокотемпературной и низкотемпературной деформационной устойчивости.

В связи с этим, состав дисперсно-армирующей добавки для ЩМАС должен быть оптимизирован по содержанию волокна, обеспечивающего армирование асфальтовяжущего (например, с оптимизацией его предела текучести при температуре приготовления асфальтобетонных смесей, транспортировки, укладки в покрытие и уплотнения) и в целом асфальтобетонной матрицы. При этом армирующий волокнистый компонент для асфальтобетонной матрицы должен быть оптимизирован по содержанию волокна различной (оптимальной) длины, так как, например, эффект ар-

мирования в значительной степени зависит от соотношения крупности заполнителя к длине отдельных волокон, что известно также из работ, описывающих принципы армирования цементобетонов волокном различной природы **[18]**.

Использование синтетического волокна различного вида в форме насыпной массы является сложным и неэффективным по причине его низкой насыпной плотности, что сопряжено с трудностями подачи, дозирования и обеспечения однородности перемешивания в асфальтосмесительных установках. С целью исключения указанных недостатков используются специальные приспособления **[19, 20]**, что несколько ограничивает более широкое применение таких волокон. В связи с этим, целесообразно рассматривать также вопрос изменения формы их применения, например, путем гранулирования с повышением насыпной плотности при сохранении армирующего эффекта.

1. Экспериментальные исследования технологической стабильности щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, армированных синтетическим волокном

Подбор состава экспериментальных асфальтобетонных смесей осуществлялся в соответствии с ГОСТ Р 58406.10-2020[1], а для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей – по ГОСТ Р 58406.1[2], с максимальной крупностью минерального заполнителя 8, 11 (11,2) и 16 мм. Составы асфальтобетонных смесей представлены в **табл. 1**.

Для выполнения экспериментальных исследований приняты два вида волокна:

- целлюлозное волокно;
- синтетическое волокно.

[1] ГОСТ Р 58406. 10-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2020. – 15 с.

[2] ГОСТ Р 58406.1-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 23 с.

Таблица 1

Составы ЩМАС, армированных синтетическим волокном

ЩМАС на битумном вяжущем БНД 50/70				
Состав ЩМАС	***ЩМА 16***	***ЩМА 11***	***ЩМА 8***	***Производитель/поставщик материала***
Щебень фр. 8-16 мм	55 (51,74)	-	-	ООО «Выбор-С»
Щебень фр. 8-11,2 мм	-	50 (46,94)	-	
Щебень фр. 4-8 мм	17 (15,99)	20 (18,78)	77 (72,03)	
Песок дробл. фр. 0-4 мм	17 (15, 99)	20 (18,78)	13 (12,16)	
Минеральный порошок	11 (10,35)	10 (9,39)	10 (9,35)	АО «КЗПМ»
Битумное вяжущее БНД 50/70	5,9 (5,55)	6,1 (5,73)	6,5 (6,08)	ООО «Лукойл-Волгоград-нефтепереработка»
Целлюлозная стабилизирующая добавка Viatop	0,4 (0,38)	0,4 (0,38)	0,4 (0,38)	ООО «Инжтех»
Всего	106,3 (100)	106,5 (100)	106,9 (100)	

В качестве целлюлозного использовалось волокно Arbocel® ZZ 8/1 G.

В качестве дисперсно-армирующего волокнистого компонента добавок было выбрано полиамидное волокно Briture.

В общем случае, исходя из показателей свойств, средняя расчетная критическая длина целлюлозного и полиамидного во-

локна l_{kr} является практически одинаковой, если принять, что прочность границы раздела $\tau_{\text{гр}}$ с матрицей подобна.

Приготовление смеси 2 видов волокна производили путем кратковременного (3-4 с) перемешивания в высокоскоростном ножевом измельчителе DM-6. При использовании только синтетического волокна его также распушивали подобным способом с целью увеличения эффективности волокнистой массы.

Дозирование волокна каждого вида перед приготовлением волокнистой смеси производилось по его массе.

Исходя из данных о прочности и геометрических характеристиках синтетического и целлюлозного волокон, можно утверждать, что в части армирования структуры как асфальтовяжущего, так и в целом асфальтобетонной смеси, синтетические волокна будут проявлять себя в качестве армирующего компонента практически одинаково, если принять, что сдвиговая прочность на границе раздела $\tau_{\text{гр}}$ примерно одинакова, так как определяется в большей степени свойствами матрицы, а не поверхностью волокна. Очевидно, что состояние поверхности волокна играет свою важную роль в повышении упрочняющего эффекта от армирования, однако при рассмотрении структуры дисперсно-армированного асфальтобетона данным эффектом можно пренебречь.

Таким образом, единственным важным параметром оптимизации для синтетического волокна со стандартными геометрическими характеристиками (прочность от 30 до 200 гс/текс; диаметр от 5 до 50 мкм) является длина элементарных волокон l и содержание волокна различной длины a_l для расхода волокна $c_{\text{в}}$ от массы минеральной части асфальтобетонной смеси с максимальным размером щебня d_c.

Матрица планирования эксперимента на 1-м уровне моделирования и результаты испытаний представлены в **табл. 2.**

В качестве параметра состояния для данного эксперимента был принят показатель стекания вяжущего B (ГОСТ Р 58406.1-2020).

На втором уровне моделирования свойств была проведена оптимизация технологической устойчивости асфальтовяжущих (показатель стекания вяжущего) по показателю динамической

вязкости $v_{ав}$ (ГОСТ 33137- 2014[3]) через показатель предела текучести τ_0 в зависимости от содержания дисперсно-армирующих (синтетических) и стабилизирующих (целлюлозных) волокон.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента на 1-м уровне моделирования и результаты испытаний

В виде переменной				В виде величины показателя				В, %
X_1	X_2	X_3	X_4	l, мм	$c_в$, %	a_l, %	d_c, мм	
+1	+1	+1	+1	18	0,9	100	16	0,32
-1	-1	+1	+1	6	0,3	100	16	0,40
-1	+1	-1	+1	6	0,9	0	16	0,25
+1	-1	-1	+1	18	0,3	0	16	0,52
-1	+1	+1	-1	6	0,9	100	8	0,02
+1	-1	+1	-1	18	0,3	100	8	0,36
+1	+1	-1	-1	18	0,9	0	8	0,06
-1	-1	-1	-1	6	0,3	0	8	0,31
+1	0	0	0	18	0,6	50	11	0,21
-1	0	0	0	6	0,6	50	11	0,22
0	+1	0	0	12	0,9	50	11	0,14
0	-1	0	0	12	0,3	50	11	0,42
0	0	+1	0	12	0,6	100	11	0,21
0	0	-1	0	12	0,6	0	11	0,24
0	0	0	+1	12	0,6	50	16	0,34
0	0	0	-1	12	0,6	50	8	0,19
0	0	0	0	12	0,6	50	11	0,20

На 2-м уровне моделирования были приняты следующие входные факторы:

- содержание смеси волокна (стабилизирующего и дисперсно-армирующего) $a_в$ в асфальтовяжущем, % от массы битума;

[3] ГОСТ 33137- 2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения динамической вязкости ротационным вискозиметром. – М.: Стандартинформ, 2015. – 11 с.

- содержание стабилизирующего волокна в смеси волокна $a_{св}$, % от массы смеси волокна;
- содержание минерального порошка $a_{мп}$ в асфальтовяжущем, % от массы битума;
- средневзвешенная длина синтетического волокна $l_{ср}$ в волокнистой смеси, мм, в зависимости от содержания в ней отдельных волокон a_{l1}, a_{l2}, a_{l3}, при условии, что $a_{l_i} + a_{l_{i+1}} + a_{l_{i+2}} = 100\,\%$; $a_{l_{i+1}} = a_{l_{i+2}}, a_{l_i} = a_{l_{i+1}} + a_{l_{i+2}}$ и т. д.

Матрица планирования эксперимента на 2-м уровне моделирования и результаты испытаний представлены в **табл. 3.**

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента на 2-м уровне моделирования и результаты испытаний

В виде переменной				*В виде величины показателя*				τ_0*, Па	m*
X_1	X_2	X_3	X_4	$a_в$, %	$a_{св}$, %	$a_{мп}$, %	$l_{ср}$, *мм*		
+1	+1	+1	+1	16	75	250	15	118,6800	0,2239
-1	-1	+1	+1	4	25	250	15	3,6052	0,8731
-1	+1	-1	+1	4	75	100	15	2,2096	0,9024
+1	-1	-1	+1	16	25	100	15	7,1056	0,8041
-1	+1	+1	-1	4	75	250	9	5,1465	0,8675
+1	-1	+1	-1	16	25	250	9	13,1640	0,7229
+1	+1	-1	-1	16	75	100	9	115,3700	0,2332
-1	-1	-1	-1	4	25	100	9	0,7850	0,9436
+1	0	0	0	16	50	175	12	36,857	0,4843
-1	0	0	0	4	50	175	12	2,2517	0,9107
0	+1	0	0	10	75	175	12	29,325	0,5284
0	-1	0	0	10	25	175	12	3,9403	0,8599
0	0	+1	0	10	50	250	12	11,968	0,7274
0	0	-1	0	10	50	100	12	9,0923	0,7554
0	0	0	+1	10	50	175	15	10,089	0,7661
0	0	0	-1	10	50	175	9	10,244	0,7589
0	0	0	0	10	50	175	12	10,185	0,7604

*Примечание: рассчитан на основании обработки кривых течения (**табл. 4**) для зависимости вида $\tau = \tau_0 \cdot \gamma^m$.*

Результаты измерения кривых течения асфальтовяжущих экспериментальных составов представлены в **табл. 4**.

Таблица 4

Результаты измерения кривых течения асфальтовяжущих экспериментальных составов

№ п/п	Напряжение сдвига τ, Па, для скорости сдвига (γ), $с^{-1}$						
	1	2	3	5	10	15	30
1	120,31	136,63	144,10	178,96	196,33	228,80	245,17
2	3,31	6,27	10,65	17,07	23,60	39,33	68,06
3	1,84	5,15	5,99	10,52	14,84	25,66	48,18
4	6,40	15,41	18,21	21,97	43,40	60,95	117,05
5	4,14	10,65	15,02	25,03	33,93	47,57	100,72
6	12,28	24,53	28,70	43,20	67,32	84,71	164,56
7	114,36	133,69	152,14	161,99	207,44	227,01	241,05
8	0,84	1,54	2,03	3,40	6,90	10,11	20,40
9	35,47	51,27	68,33	79,74	110,38	133,43	193,16
10	2,56	3,80	6,26	9,33	17,04	25,05	56,81
11	28,62	44,50	53,81	62,44	100,67	129,10	172,38
12	4,13	6,23	11,27	15,99	26,19	42,50	73,72
13	10,99	20,31	27,57	41,50	63,66	87,44	133,29
14	9,44	14,42	21,09	31,29	50,43	71,07	119,79
15	9,44	19,01	25,10	30,97	58,33	79,86	139,38
16	10,05	18,30	24,47	31,46	60,02	78,70	138,51
17	10,13	17,17	23,30	36,24	57,70	78,31	136,39

Представленные результаты экспериментальных исследований в полной мере позволили произвести оптимизацию состава добавок на основе синтетического и целлюлозного волокон по показателю стекания вяжущего для разработанных составов ЩМАС,

а также предложить методологию такого рода оптимизации применительно к любым составам ЩМАС в зависимости от геометрических характеристик отдельных синтетических волокон в смеси синтетического и целлюлозного волокон.

2. Оптимизация состава смеси синтетического и целлюлозного волокон по показателю стекания вяжущего в ЩМАС

Результаты обработки экспериментальных данных полностью подтвердили гипотезу о том, что величина показателя стекания вяжущего в ЩМАС с синтетическим волокном зависит от состава таких волокнистых композиций, определяемого содержанием фибры различной длины.

Эмпирическая зависимость к определению показателя стекания вяжущего B, полученная в результате обработки данных эксперимента **(табл. 2)**, имеет следующий вид **(1)**:

$$B = 0{,}280 - 0{,}921 \cdot c_{\text{в}} + 0{,}022 \cdot d_c + 0{,}008 \cdot l_{\text{ср}} + 0{,}428 \cdot c_{\text{в}}^2 \ . \qquad (\mathbf{1})$$

Коэффициент детерминации R^2 для представленной зависимости составляет 95,82 %, а скорректированный коэффициент детерминации R^2 – 94,43 %, стандартная ошибка регрессии для исследуемой величины B – 0,030, что позволяет считать полученную регрессионную зависимость достоверной и достаточной для оценки свойств.

В соответствии с **(1)** значение коэффициента вариации средней длины волокна должно составлять от 0,253 до 0,085 соответственно для расчетной средней длины волокна от 6 до 18 мм для предельного отклонения содержания волокна в асфальтобетонной смеси на уровне ±5% от проектной величины подобранного состава.

Графически данная эмпирическая зависимость для ЩМА 11 может быть представлена следующим образом (**рис. 2**).

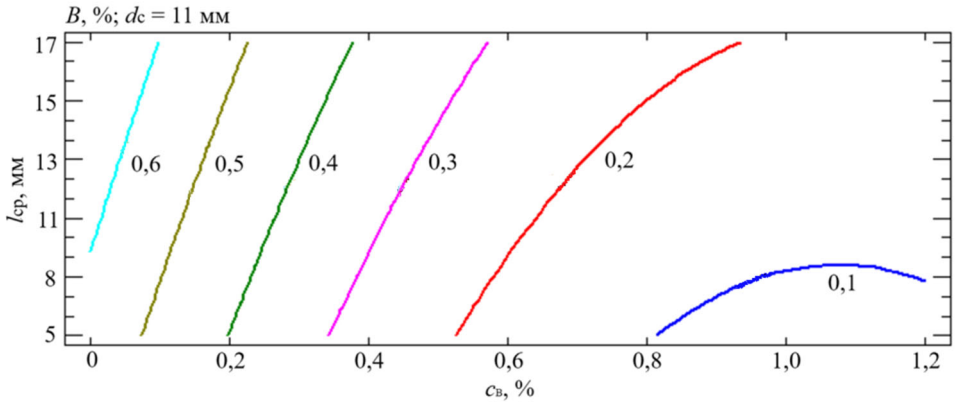

Рис. 2. Зависимость к определению показателя стекания вяжущего B

Как видно из представленных результатов **(1)**, **(рис. 2)**, величина показателя стекания B определенно зависит от содержания волокна различной длины в волокнистой смеси, применяемой для стабилизации битумного вяжущего в экспериментальных составах ЩМАС. С ростом средней длины волокна $l_{\text{ср}}$ в волокнистой смеси показатель стекания вяжущего B увеличивается при одинаковом ее весовом содержании $c_{\text{в}}$. Такая ситуация представляется абсолютно логичной из-за разницы в наполнении битумной матрицы волокном, т.е. из-за разницы в величине объемного содержания волокна в элементарном объеме. Так, например, стекание вяжущего B для ЩМА 11 будет одинаковым и равным 0,2 % для содержания 0,5 % волокна со средней длиной 5 мм и для содержания 0,9 % волокна со средней длиной 20 мм. Кроме того, следует отметить влияние размера щебня в ЩМАС – с ростом крупности щебня d_c показатель стекания вяжущего B возрастает: при содержании смеси волокна 0,6 % при его средней длине 15 мм показатель стекания вяжущего составляет соответственно 0,18 %, 0,25 % и 0,36 % для ЩМАС с крупностью щебня 8 мм, 11 мм и 16 мм.

В то же время, с точки зрения экономической и технической эффективности, добавка для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей должна обеспечивать улучшение не только технологических, но также прочностных и деформационных свойств.

Однако, как следует из представленных выше результатов, эффективность смеси синтетического волокна различной длины

по показателю стекания вяжущего возрастает со снижением средней длины волокна в смеси. При этом нельзя утверждать об одновременном росте наряду с технологической устойчивостью показателей прочности и деформационной устойчивости во всем диапазоне рабочих температур, так как армирования асфальтовяжущего в данном случае недостаточно, и оно должно касаться и элементов мезо- и макроструктуры асфальтобетонной смеси.

Для комплексной оптимизации состава добавки на основе синтетического волокна целесообразно вводить, как отмечалось выше, минимально необходимое количество волокна с повышенными гидрофильными свойствами, например, целлюлозного волокна. Это позволит предусмотреть возможность более широкой оптимизации состава такого рода добавок исходя из эффективной средней длины синтетического волокна.

В результате выполненного эксперимента **(табл. 3, 4)** была получена эмпирическая зависимость, связывающая предел текучести асфальтовяжущих τ_0 от их состава: от содержания минерального порошка $\mathrm{a}_{\text{мп}}$, смеси синтетического волокна $\mathrm{a}_{\text{св}}$ со средней длиной $l_{\text{ср}}$ и целлюлозного волокна $\mathrm{a}_{\text{цел}}$:

$$\tau_0 = -0{,}315 + \frac{6 \cdot \mathrm{a}_{\text{мп}}^2}{10^5} + \frac{66 \cdot \mathrm{a}_{\text{цел}}^3}{10^3} - \frac{\left(\mathrm{a}_{\text{св}} \cdot l_{\text{ср}}\right)^2}{10^4} + \frac{348 \cdot \mathrm{a}_{\text{св}}^2}{10^4} + \frac{\mathrm{a}_{\text{св}}^4}{10^4} \ . \quad (2)$$

Коэффициент детерминации R^2 для представленной зависимости составляет 99,99 %, а скорректированный коэффициент детерминации R^2 – 99,79 %. Стандартная ошибка регрессии для исследуемой величины τ_0 составляет 0,215, что позволяет считать полученную регрессионную зависимость достоверной и достаточной для оценки свойств.

Анализ полученной зависимости свидетельствует об однозначном увеличении предела текучести τ_0 при увеличении содержания любого из компонентов. Минеральный порошок оказывает минимальное влияние, а целлюлозное волокно – максимальное. Влияние содержания синтетического волокна определенно зависит от его средней длины $l_{\text{ср}}$ в волокнистой смеси.

Если произвести расчет **(2)** для асфальтовяжущего, содержащего 185 % минерального порошка от массы битума, средняя длина волокна в смеси составляет 12 мм, то получается, что целлюлозное и синтетическое волокна могут в равной степени оказывать влияние на показатель текучести, однако, содержание

синтетического волокна должно быть в 2,5-3 раза больше. При этом оказывает влияние, как отмечалось выше, и средняя длина волокна в волокнистой смеси. В принципе, отличие содержания волокна этих двух типов по показателю текучести асфальтовяжущего соизмеримо с показателем их гидрофильности **[17]**, с учетом степени армирования структуры асфальтовяжущего синтетическим волокном различной длины.

Принимая во внимание составы асфальтовяжущих, использованных в ходе предыдущего эксперимента **(табл. 3)**, с учетом **(2)**, были получены величины показателя текучести τ_0, указанные в **табл. 5**.

Таблица 5

Характеристики ЩМАС, армированных синтетическим волокном

№ п/п	Максимальный размер щебня d_c, мм	Содержание смеси синтетического волокна $a_{св}$, %	Средняя длина волокна $l_{ср}$, мм	Содержание минерального порошка $a_{мп}$, %	Показатель средней толщины битумной пленки ТВР, мкм	Показатель стекания вяжущего В, %	Показатель текучести асфальтовяжущего τ_0, Па
1	16	15,25	18	186	623	0,32	4,8736
2	16	5,08	6	186	623	0,40	2,5907
3	16	15,23	15	186	623	0,25	7,9551
4	16	5,08	9	186	623	0,52	2,4363
5	8	13,92	6	154	145	0,02	10,5456
6	8	4,64	18	154	145	0,36	0,9525
7	8	13,92	9	154	145	0,06	9,3624
8	8	4,62	15	154	145	0,31	1,2397
9	11	9,80	13,5	164	362	0,21	3,1559
10	11	9,84	10,5	164	362	0,22	4,1214
11	11	14,70	12	164	362	0,14	9,1163
12	11	4,90	12	164	362	0,42	1,7172
13	11	9,80	12	164	362	0,21	3,6540
14	11	9,84	12	164	362	0,24	3,6785
15	16	10,15	12	186	623	0,34	4,3570
16	8	9,27	12	154	145	0,19	3,1289
17	11	9,84	12	164	362	0,20	3,6785

В результате статистической обработки данных, представленных в **табл. 5**, получена эмпирическая зависимость (**3**) **(рис. 3),** связывающая показатель стекания вяжущего B с величиной предела текучести τ_0 асфальтовяжущего и со средней толщиной битумной пленки в асфальтобетонной смеси TBP, которая может быть рассчитана по известной методологии **[21]** в зависимости от формы, содержания и крупности минеральных частиц.

$$B = \exp\left(-5{,}64 + 0{,}91 \cdot \ln\left(\frac{\tau_0}{TBP}\right)\right) \quad . \qquad (3)$$

Коэффициент детерминации R^2 для представленной зависимости составляет 90,58 %, а скорректированный коэффициент детерминации R^2 – 89,95 %. Стандартная ошибка регрессии для исследуемой величины B составляет 0,249, что позволяет считать полученную регрессионную зависимость достоверной и достаточной для оценки свойств.

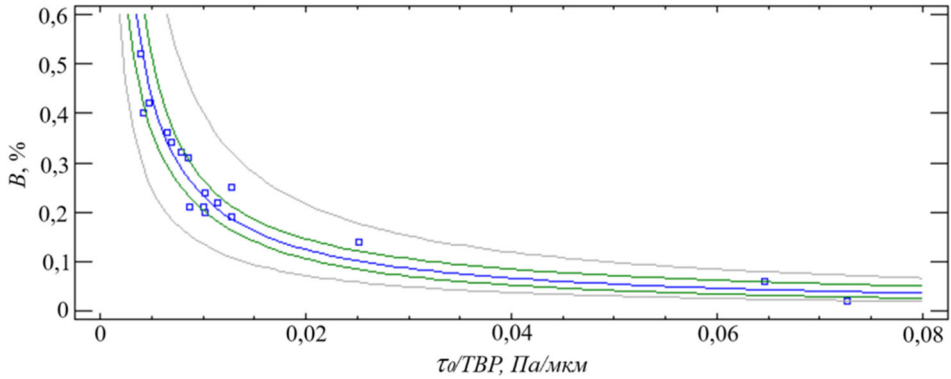

Рис. 3. Зависимость к определению показателя стекания вяжущего B

Разработанные эмпирические зависимости **(1-3)** позволили произвести расчет минимально необходимого содержания стабилизирующего (целлюлозного) волокна в составе добавки на основе синтетического волокна различной длины. Эффективными с точки зрения обеспечения технологических свойств ЩМАС, с учетом требуемой максимально допустимой величины показателя

стекания вяжущего B, равной 0,2 %, можно считать указанные ниже составы волокнистых добавок **(табл. 6).**

Таблица 6

Составы волокнистых добавок для ЩМАС

Тип ЩМАС	*Средняя длина синтетического волокна, мм*	*Содержание синтетического волокна в добавке, %*	*Содержание целлюлозного волокна в добавке, %*	*Содержание добавки в составе ЩМАС, % от массы минеральной части*
ЩМА 8	6-18	100	0	0,45-0,70
ЩМА 11	6-18	100	0	0,55-0,90
ЩМА 16	6-8	100	0	0,90-1,05
ЩМА 8	6-18	100-85	0-15	0,40-0,60
ЩМА 11	6-18	90-60	10-40	0,50-0,80
ЩМА 16	6-18	75-55	25-45	0,60-0,85

В то же время, выбор оптимальной средней длины синтетического волокна в составе добавки должен производится исходя из эффективности армирования структуры асфальтобетона, так как как в противовес технологическим свойствам, которые улучшаются со снижением средней длины волокна, прочностные и деформационные свойства будут тем лучше, чем средняя длина волокна больше. Решению данной задачи будет посвящено следующее исследование.

Разработанные методологические принципы регулирования технологических свойств ЩМАС, армированных синтетическими волокнами, могут быть использованы как отдельный элемент системы проектирования их составов путем оптимизацией предела текучести асфальтовяжущих τ_0 и показателя стекания вяжущего B при высоких рабочих температурах в зависимости от средней длины волокна, крупности щебня в асфальтобетонной смеси и содержания битума (например, через показатель средней толщи-

ны битумной пленки TBP). Такой подход позволит определять эффективную степень армирования матрицы асфальтовяжущего синтетическим волокном (т.е. его оптимальный расход), что обеспечит не только требуемый уровень стекания вяжущего, но и позволит использовать полученные данные при оптимизации прочностных и деформационных свойств армированных синтетическим волокном ЩМАС, например, в рамках развития методологических принципов ГОСТ Р 58406.10-2020 или ОДМ 218.3.054[4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Состав дисперсно-армирующей добавки для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей оптимизирован по содержанию волокна, обеспечивающего армирование асфальтовяжущего (с оптимизацией его предела текучести при температуре приготовления асфальтобетонных смесей, транспортировке, укладке в покрытие и уплотнении).

2. Армирующий волокнистый компонент для асфальтобетонной матрицы оптимизирован по содержанию волокна различной (оптимальной) длины.

3. Разработаны эмпирические зависимости, позволяющие производить оптимизацию состава добавок на основе синтетического волокна, в том числе оптимизацию с учетом добавления короткого целлюлозного волокна с повышенными сорбционными свойствами.

4. Разработанные методологические принципы регулирования технологических свойств ЩМАС могут быть использованы как элемент системы проектирования их составов.

© Насонова И.Г., Лира С.В., 2024

[4]ОДМ 218.3.054-2015. Устройство поверхностной обработки и тонких слоев износа с применением различных видов фиброволокон. М., 2018, 64 с. (Разработаны ООО «ДорТехИнвест». Приняты и введены в действие распоряжением Федерального дорожного агентства от 29 сентября 2015 г. № 1801-р).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Russia. Number of Registered Vehicles. URL: https://www.ceicdata.com/en/indicator/russia/number-of-registered-vehicles.*
2. *Marais C.P. The use of asbestos in trial sections of gap-graded asphalt and slurry seals // Proceedings of the third conference on asphalt pavements for South Africa. – Durban: TRID, 1979. – P. 172-175.*
3. *Serfass J.P. Fiber-modified asphalt concrete characteristics, applications and behavior / J.P. Serfass, J. Samanos // Asphalt Paving Technology. – 1996. – № 65. – P. 193-230.*
4. *Brown E.R. Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures. – Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, 1993. – 87 p.*
5. *Волков М.И. Дорожно-строительные материалы / М.И. Волков, И.М. Борщ, И.М. Грушко – 5-е, перераб. и доп. изд. – М.: Транспорт, 1975. – 528 с.*
6. *Андронов С.Ю. Сравнение результатов получения композиционных асфальтобетонных смесей дисперсно-армированых с добавкой базальтового фиброволокна / С.Ю. Андронов, А.А. Задирака // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 2 (120). – С. 161-166.*
7. *Пшеничных О.А. Опыт применения дисперсно-армированных асфальтобетонов в дорожном строительстве / О.А. Пшеничных, Д.С. Скорик // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2020. – №. 1. – С. 121-127.*
8. *Ефанов Н.Е. Влияние технологии дисперсного армирования асфальтобетонных смесей на процессы их структурообразования / Н.Е. Ефанов, В.Н. Лукашевич, И.В. Пиряев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2007. – №. 1. – С. 204-209.*
9. *Бусел А.В. Асфальтовяжущее на упрочняющих волокнистых компонентах / А.В. Бусел, Т.А. Чистова, А.Н. Наумовец // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – №. 1. – С. 106-109.*

10. *Zarei M. Economical and technical study on the effect of carbon fiber with high strength on hot mix asphalt (HMA) / M. Zarei, F. Akbarinia, Z. Rahmani et al. // Electronic Journal of Structural Engineering. – 2020. – Vol. 20. – P. 6-12.*
11. *Пшеничных О.А. Армирование асфальтобетонных смесей синтетическими волокнами / О.А. Пшеничных, А.Л. Пожидаева, Д.С. Михайлюк и др. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2021. – №. 1. – С. 80-86.*
12. *Андронов С.Ю. Способ совместного дисперсного армирования асфальтобетона / С.Ю. Андронов, А.А. Задирака, Е.Д. Дитер // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2019. – №. 1. – С. 14-20.*
13. *Slebi-Acevedo C.J., Lastra-Gonzalez P., Castro-Fresno D., Bueno M. An experimental laboratory study of fiber-reinforced asphalt mortars with polyolefin-aramid and polyacrylonitrile fibers // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 248, 118622.*
14. *Ласман И.А. Синтетические волокна для дисперсного и пространственного армирования асфальтобетонного покрытия / И.А. Ласман, Н.И. Токар, Д.Ю. Шкабаро и др. // Материалы международной научно-практической конференции «Инновации в строительстве – 2022». – Брянск: ФГБОУ ВО «БГИТУ», 2022. – С. 238-242.*
15. *Zhang M.R. Modification of asphalt by dispersing waste polyethylene and carbon fibers in it / M.R. Zhang, C.Q. Fang, S.S. Zhou et al. // New Carbon Materials. – 2016. – Vol. 31. – №. 4. – P. 424-430.*
16. *Юскаев В.Б. Композиционные материалы / В.Б. Юскаев. – Сумы: СумГУ, 2006. – 199 с.*
17. *Кынин А.Т. Прогнозирование изменения сорбционных и механических свойств химических волокон и нитей при температурно-влажностных воздействиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.19.01 / Кынин Александр Тимофеевич / Санкт-Петербургский гос. ун-т технологии и дизайна. – СПб, 1996. – 40 с.*
18. *Московский С.В. Влияние дисперсного армирования на деформационно-прочностные свойства бетона / С.В. Московский, А.С. Носков, В.С. Руднов, В.Н. Алехин //*

Академический вестник УралНИИПроект РААСН. – 2016. – №. 3 (30). – С. 67-71.

19. *Патент № 2645701 Российская Федерация, МПК B28C 5/40(2006.01). Установка для приготовления фибросодержащей строительной смеси: № 2016152393/2016; заявл. 28.12.2016; опубл. 27.02.2018 / Андронов С.Ю., Артеменко А.А.; патентообладатель: Андронов С.Ю. Бюл. № 6 // Yandex.ru: патенты https://yandex.ru/patents/doc/RU2645701C1_20180227 (дата обращения: 23.05.2024).*
20. *Андронов С.Ю., Алферов В.И., Кочетков А.В. Совершенствование методов введения фиброволокон в горячие и холодные асфальтобетонные смеси / С.Ю. Андронов, В.И. Алферов, А.В. Кочетков // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – № 2. – 12 с.*
21. *Королев И.В. Пути экономии битума в дорожном строительстве / И.В. Королев. – М.: Транспорт, 1986. – 149 с.*

REFERENCES

1. *Russia. Number of Registered Vehicles. URL: https://www.ceicdata.com/en/indicator/russia/number-of-registered-vehicles.*
2. *Marais C.P. The use of asbestos in trial sections of gap-graded asphalt and slurry seals // Proceedings of the third conference on asphalt pavements for South Africa. – Durban: TRID, 1979. – P. 172-175.*
3. *Serfass J.P. Fiber-modified asphalt concrete characteristics, applications and behavior / J.P. Serfass, J. Samanos // Asphalt Paving Technology. – 1996. – № 65. – P. 193-230.*
4. *Brown E.R. Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures. – Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, 1993. – 87 p.*
5. *Volkov M.I. Dorozhno-stroitel`ny`e materialy` / M.I. Volkov, I.M. Borshh, I.M. Grushko – 5-e, pererab. i dop. izd. – M.: Transport, 1975. – 528 s.*
6. *Andronov S.Yu. Sravnenie rezul`tatov polucheniya kompozicionny`x asfal`tobetonny`x smesej dispersno-armirovany`x s dobavkoj bazal`tovogo fibrovolokna / S.Yu. Andronov, A.A. Zadiraka // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. – 2017. – № 2 (120). – S. 161-166.*

7. *Pshenichny`x O.A. Opy`t primeneniya dispersno-armirovanny`x asfal`tobetonov v dorozhnom stroitel`stve / O.A. Pshenichny`x, D.S. Skorik // Vestnik Donbasskoj nacional`noj akademii stroitel`stva i arxitektury`. – 2020. – №. 1. – S. 121-127.*
8. *Efanov N.E. Vliyanie texnologii dispersnogo armirovaniya asfal`tobetonny`x smesej na processy` ix strukturoobrazovaniya / N.E. Efanov, V.N. Lukashevich, I.V. Piryaev // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. – 2007. – №. 1. – S. 204-209.*
9. *Busel A.V. Asfal`tovyazhushhee na uprochnyayushhix voloknisty`x komponentax / A.V. Busel, T.A. Chistova, A.N. Naumovecz // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Stroitel`stvo i arxitektura. – 2014. – №. 1. – S. 106-109.*
10. *Zarei M. Economical and technical study on the effect of carbon fiber with high strength on hot mix asphalt (HMA) / M. Zarei, F. Akbarinia, Z. Rahmani et al. // Electronic Journal of Structural Engineering. – 2020. – Vol. 20. – P. 6-12.*
11. *Pshenichny`x O.A. Armirovanie asfal`tobetonny`x smesej sinteticheskimi voloknami / O.A. Pshenichny`x, A.L. Pozhidaeva, D.S. Mixajlyuk i dr. // Vestnik Donbasskoj nacional`noj akademii stroitel`stva i arxitektury`. – 2021. – №. 1. – S. 80-86.*
12. *Andronov S.Yu. Sposob sovmestnogo dispersnogo armirovaniya asfal`tobetona / S.Yu. Andronov, A.A. Zadiraka, E.D. Diter // Texnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel`stve. – 2019. – №. 1. – S. 14-20.*
13. *Slebi-Acevedo C.J., Lastra-Gonzalez P., Castro-Fresno D., Bueno M. An experimental laboratory study of fiber-reinforced asphalt mortars with polyolefin-aramid and polyacrylonitrile fibers // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 248, 118622.*
14. *Lasman I.A. Sinteticheskie volokna dlya dispersnogo i prostranstvennogo armirovaniya asfal`tobetonnogo pokry`tiya / I.A. Lasman, N.I. Tokar, D.Yu. Shkabaro i dr. // Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Innovacii v stroitel`stve – 2022». – Bryansk: FGBOU VO «BGITU», 2022. – S. 238-242.*
15. *Zhang M.R. Modification of asphalt by dispersing waste polyethylene and carbon fibers in it / M.R. Zhang, C.Q. Fang, S.S. Zhou et al. // New Carbon Materials. – 2016. – Vol. 31. – №. 4. – R. 424-430.*

16. *Yuskaev V.B. Kompozicionny`e materialy` / V.B. Yuskaev. – Sumy`: SumGU, 2006. – 199 s.*
17. *Ky`nin A.T. Prognozirovanie izmeneniya sorbcionny`x i mexanicheskix svojstv ximicheskix volokon i nitej pri temperaturno-vlazhnostny`x vozdejstviyax: avtoref. dis. ... d-ra texn. nauk: 05.19.01 / Ky`nin Aleksandr Timofeevich / Sankt-Peterburgskij gos. un-t texnologii i dizajna. – SPb, 1996. – 40 s.*
18. *Moskovskij S.V. Vliyanie dispersnogo armirovaniya na deformacionno-prochnostny`e svojstva betona / S.V. Moskovskij, A.S. Noskov, V.S. Rudnov, V.N. Alexin // Akademicheskij vestnik UralNIIProekt RAASN. – 2016. – №. 3 (30). – S. 67-71.*
19. *Patent № 2645701 Rossijskaya Federaciya, MPK B28C 5/40(2006.01). Ustanovka dlya prigotovleniya fibrosoderzhashchej stroitel'noj smesi: № 2016152393/2016; zayavl. 28.12.2016; opubl. 27.02.2018 / Andronov S.Yu., Artemenko A.A.; patentoobladatel': Andronov S.Yu. Byul. № 6 // Yandex.ru: patenty https://yandex.ru/patents/doc/RU2645701C1_20180227 (data obrashcheniya: 23.05.2024).*
20. *Andronov S.Yu., Alferov V.I., Kochetkov A.V. Sovershenstvovanie metodov vvedeniya fibrovolokon v goryachie i xolodny`e asfal`tobetonny`e smesi / S.Yu. Andronov, V.I. Alferov, A.V. Kochetkov // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2020. – T. 12. – № 2. – 12 c.*
21. *Korolev I.V. Puti e`konomii bituma v dorozhnom stroitel`stve / I.V. Korolev. – M.: Transport, 1986. – 149 s.*

……...

Информация об авторах

И.Г. Насонова – аспирант, Кубанский государственный технологический университет, институт строительства и транспортной инфраструктуры, Краснодар, Россия

С.В. Лира – руководитель, Государственное казенное учреждение Краснодарского края «Краснодаравтодор», Краснодар, Россия

Information about the authors

I.G. Nasonova – Postgraduate student, Kuban State Technological University, Institute of Construction and Transport Infrastructure, Krasnodar, Russia
S.V. Lira – Head, Krasnodar Krai State Public Institution, Krasnodar, 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.

Рецензенты: канд. техн. наук Е.Н. Симчук (АНО «НИИТСК»); д-р техн. наук А.В. Кочетков (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию 24.05.2024. Одобрена после рецензирования 23.09.2024. Принята к публикации 23.10.2024.

The article was submitted 24.05.2024. Approved after reviewing 23.09.2024. Accepted for publication 23.10.2024.