

УДК 625.855.3.001

*ЛУКАШЕВИЧ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
vnluc@yandex.ru*

*ЕФАНОВ ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ, аспирант,
ein7@yandex.ru*

*ПРОКОФЬЕВА ГАЛИНА ИВАНОВНА, ст. преподаватель,
pgi7.71941@mail.ru*

*ВАКС ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ, студент,
vaks1996@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приведенные результаты исследований свидетельствуют, что дисперсное армирование существенно улучшает структурно-механические свойства асфальтобетонов. При этом дисперсная арматура улучшает показатели при положительных температурах, а органическое вещество, содержащееся в отрезках волокон отработанных сорбентов, улучшая структуру адсорбционного слоя битума, увеличивает трещиностойкость асфальтобетона при отрицательных температурах.

Ключевые слова: органоминеральная смесь; дисперсная арматура; минеральные волокна; адсорбционные слои нефтяного битума; структурообразование; предельное напряжение; предел текучести; напряжение; деформация; пластическое состояние; пластическая вязкость.

*VIKTOR N. LUKASHEVICH, DSc, Professor,
lukvin@tsuab.ru*

*IGOR N. EFANOV, Research Assistant,
ein7@yandex.ru*

*GALINA I. PROKOFIEVA, Senior Lecturer,
pgi7.71941@mail.ru*

*IL'YA V. VAKS, Student,
vaks1996@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

INVESTIGATIONS OF STRUCTURAL-MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED ORGANO-MINERAL MATERIALS

The paper presents investigation results on properties of fiber-reinforced materials that show that this reinforcement significantly improves the structural-mechanical properties of asphalt concretes. Herewith, the fiber reinforcement enhances these properties at positive temperatures, while organic substances contained in fiber of waste sorbents, improve crack resistance of asphalt concrete at negative temperatures, thereby enhancing the structure of its adsorption layer.

Keywords: organo-mineral mix; fiber reinforcement; mineral fibers; adsorption layer; structure formation; limit stress; yield stress; strain; plastic state; plastic viscosity.

Органоминеральные материалы являются сложными многокомпонентными гетерогенными системами, обладающими комплексом специфических свойств (упругость, пластичность, ползучесть, релаксация напряжений и т. д.), показатели которых предопределены применяемыми органическими вяжущими. Упругие или пластичные свойства органоминеральных материалов проявляются в различной степени в зависимости от их состояния и условий внешнего воздействия – скорости деформирования, воздействия температурных полей. Дисперсно-армированные органоминеральные материалы являются еще более сложными системами, поскольку в их состав входят отрезки волокон дисперсной арматуры, и комплекс свойств будет зависеть не только от работы органического вяжущего, но и от работы дисперсной арматуры [1–4].

В зависимости от того, какие свойства проявляет преимущественно асфальтобетон, к нему применимы законы, вытекающие из теории упругости или теории пластичности. Оценку структурно-механических свойств асфальтобетонов целесообразно осуществлять на основе анализа кинетики развития деформаций. Определение структурно-механических свойств на основе анализа кривых течения является в настоящее время одним из наиболее объективных и доступных методов изучения этих свойств [5–7].

Формование образцов-цилиндров проводилось на прессе ПСУ-50 в соответствии с требованиями ГОСТ 12801–98. Испытания образцов асфальтобетона осуществлялись на машине для испытания асфальтобетонных материалов ИП 5150-50 через 3 сут после их формования. Перед испытанием каждого из образцов в машину ИП 5150-50 вводились его параметры d , h и задавалась скорость перемещения 0,005 см/с (3 мм/мин) в соответствии требованиями ГОСТ 12801–98. После испытания каждого из трех образцов из процессора машины выводились данные о прочности R_m (в МПа) и величины перемещения L_m и L_n (в мм). С интервалом 0,1 мм перемещения L записывалась действующая нагрузка F до полного разрушения образца. По трем образцам одного типа и фактора процессором машины определялись средние значения прочности R (МПа), величины перемещения L (мм), дисперсия и относительная деформация E . Термостатирование образцов проводилось в термостабилизированной ванне ИМ 5159.

По данной методике определялись все параметры для образцов асфальтобетонов стандартного состава и с дисперсной арматурой при $t = 0$ °С, $t = 20$ °С, $t = 50$ °С сухих и в водонасыщенном состоянии. По данным испытаний построены графики (рис. 1–9) зависимости F от L для определения структурно-механических показателей.

Исследования проводились на мелкозернистой плотной асфальтобетонной смеси II марки, тип Б. В качестве вяжущего использовался вязкий нефтяной дорожный битум марки БНД 90/130, соответствующий требованиям ГОСТ 22245–90, в количестве 6 % от массы минерального материала. Для дисперсного армирования асфальтобетонных смесей применялись отходы стекловолокна в количестве 0,5 % от массы минерального материала.

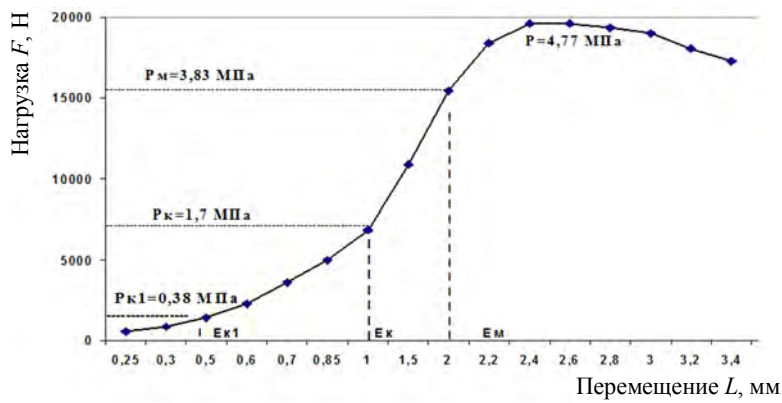


Рис. 1. Расчетная схема к определению деформативно-прочностных свойств асфальтобетона стандартного состава при температуре 20 °С

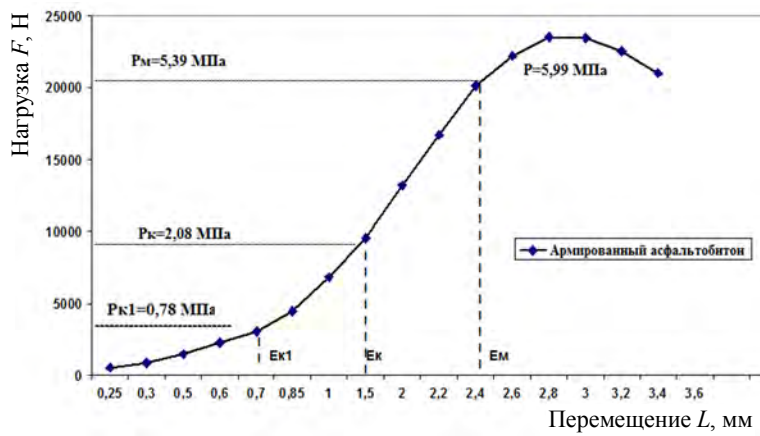


Рис. 2. Расчетная схема к определению деформативно-прочностных свойств дисперсно-армированного асфальтобетона при температуре 20 °С

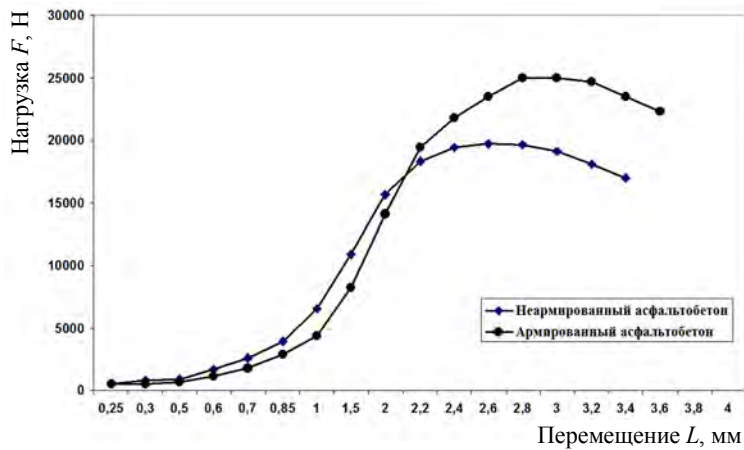


Рис. 3. Зависимость перемещения от нагрузки на образцы армированного и неармированного асфальтобетона при температуре 20 °С

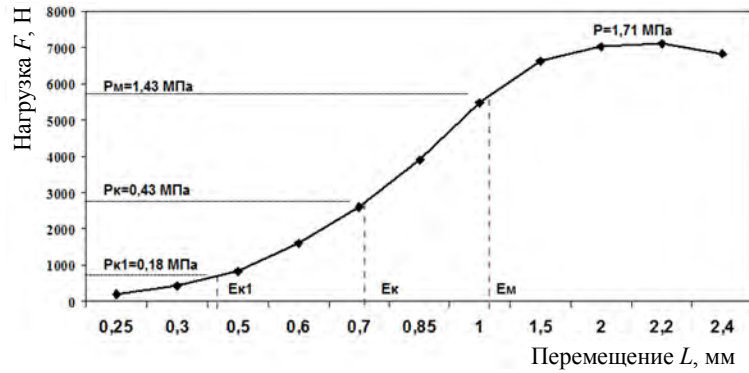


Рис. 4. Расчетная схема к определению деформативно-прочностных свойств неармированного асфальтобетона при температуре 50 °С

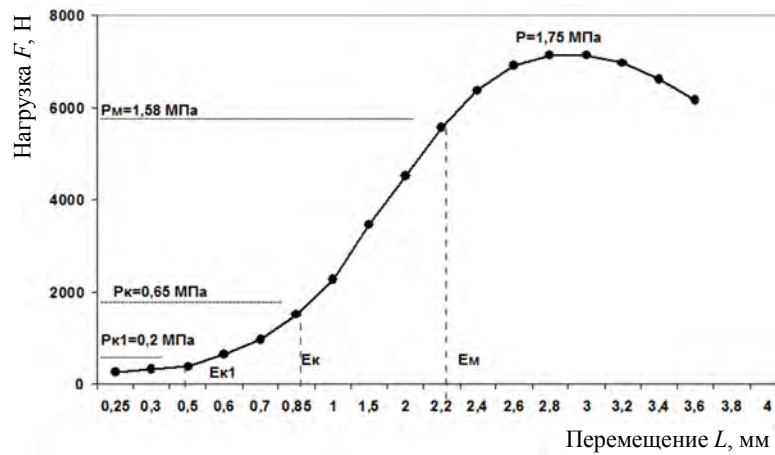


Рис. 5. Расчетная схема к определению деформативно-прочностных свойств дисперсно-армированного асфальтобетона при температуре 50 °С

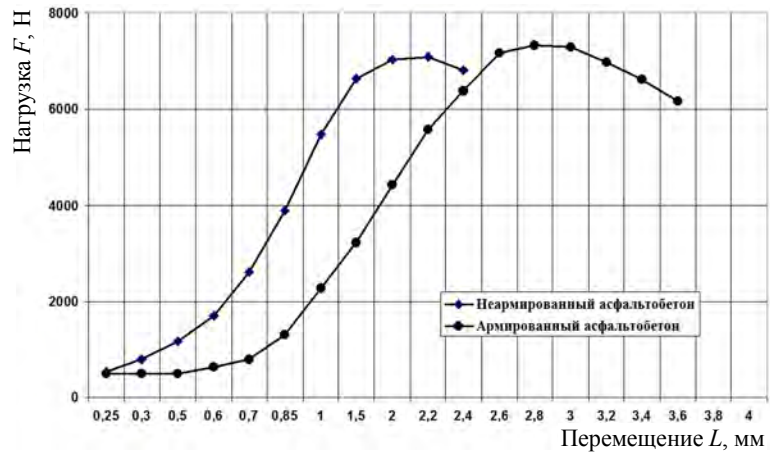


Рис. 6. Зависимость перемещения от нагрузки на образцы армированного и неармированного асфальтобетона при температуре 50 °С

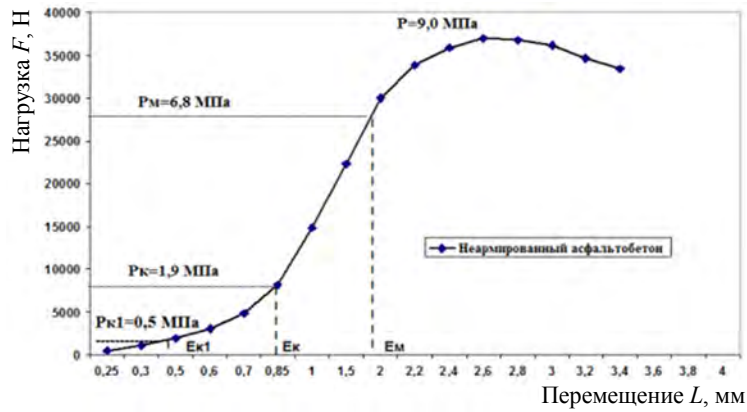


Рис. 7. Расчетная схема к определению деформативно-прочностных свойств асфальтобетона стандартного состава при температуре 0°C

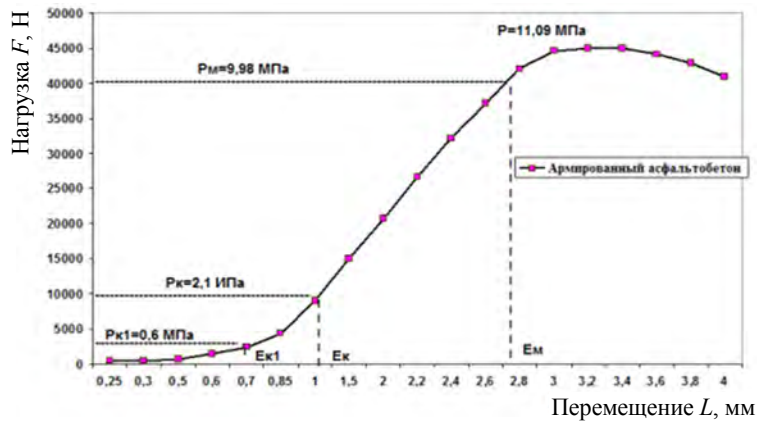


Рис. 8. Расчетная схема к определению деформативно-прочностных свойств дисперсно-армированного асфальтобетона при температуре 0°C

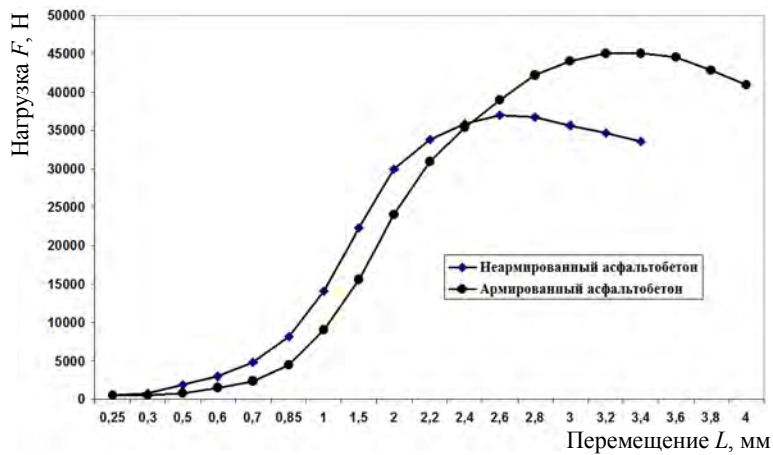


Рис. 9. Зависимость перемещения от нагрузки на образцы армированного и неармированного асфальтобетона при температуре 0°C

В результате определения показателей физико-механических свойств асфальтобетонов установлено, что они соответствуют требованиям ГОСТ 9128–2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия».

Приготовление дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси осуществлялось в следующем порядке. Минеральный материал дозировался и нагревался до температуры 140–160 °С. В нагретый материал вводили минеральный порошок и производили перемешивание. Затем вводился вязкий нефтяной битум, нагретый до температуры 130–150 °С, после чего осуществлялось перемешивание. В перемешанную асфальтобетонную смесь вводили расчетное количество дисперсной арматуры и после тщательного перемешивания армированной смеси формовали образцы.

На основании испытаний, проведенных на машине ИП 5150-50, и полученных зависимостей F от L проведены расчеты вязкости асфальтобетона и получены границы упругой и эластичной деформации зоны текучести, зоны полного разрушения материала. Получен также равновесный модуль, включающий в себя зону упругой и эластичной деформаций.

Анализируя прочностные, структурно-механические свойства асфальтобетонов стандартного состава и дисперсно-армированных асфальтобетонов (рис. 1–9), можно отметить, что дисперсно-армированный асфальтобетон имеет более высокую вязкость в зоне пластичности по сравнению с вязкостью асфальтобетона стандартного состава при $t = 20$ °С, которая составляет $9,22 \cdot 10^4$ и $6,56 \cdot 10^4$ Н/(см·с) соответственно. Прочностные показатели на границе верхнего предела текучести и зоны разрушения для асфальтобетона с дисперсной арматурой и асфальтобетона стандартного состава составляют 5,39 и 3,83 МПа соответственно.

Дисперсно-армированные асфальтобетоны имеют более высокую вязкость в зоне пластичности по отношению к вязкости асфальтобетона стандартного состава при $t = 50$ °С, которая составляет $2,66 \cdot 10^4$ и $2,5 \cdot 10^4$ Н/(см·с) соответственно. Прочностные показатели на границе верхнего предела текучести и зоны разрушения для асфальтобетона с дисперсной арматурой и асфальтобетона стандартного состава составляют 1,53 и 1,43 МПа соответственно.

Вязкость и прочностные свойства при $t = 0$ °С асфальтобетона с дисперсной арматурой имеют более высокие показатели по сравнению с асфальтобетоном стандартного состава, но соответствуют требованиям ГОСТ 9128. Трещиностойкость образцов при этом, в связи с наличием дисперсной арматуры, снижаться не будет, поскольку растягивающие напряжения примет на себя дисперсная арматура.

Проведены также исследования структурно-механических свойств асфальтобетонов, приготовленных по традиционной технологии, а также дисперсно-армированных чистыми отрезками химических волокон и отрезками волокон отработанных сорбентов, подвергшихся центрифугированию после насыщения их сырой нефтью. Сырая нефть содержалась в объеме 5 % от массы органического вяжущего и выполняла функцию модификатора поверхности минеральных материалов, улучшая при этом структуру нефтяного битума в адсорбционном слое, повышая адгезию и снижая интенсивность избира-

тельной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов [8]. Результаты исследования приведены в таблице.

Показатели деформационно-прочностных свойств асфальтобетонов из смесей, приготовленных по существующей и предлагаемым технологиям

Наименование показателей деформационно-прочностных свойств		Асфальтобетон из смеси, приготовленной по традиционной технологии	Асфальтобетон, дисперсно-армированный необработанными химическими волокнами	Асфальтобетон, дисперсно-армированный волокнами отработанных сорбентов	
Деформационно-прочностные свойства при температуре	20 °C	P_{K1} , МПа	0,55	0,58	0,56
		ε_{K1} , мм	0,88	1,33	1,32
		P_K , МПа	1,69	1,86	1,84
		ε_K , мм	1,5	2,0	2,2
		P_M , МПа	370	420	417
		ε_M , мм	2,23	2,83	2,80
		P , МПа	4,70	5,08	5,02
		ε , мм	2,95	3,5	3,4
		P_K-P_M	1,69–3,70	1,86–4,20	1,84–4,17
		$\varepsilon_M-\varepsilon_K$	1,5–2,23	2,0–2,83	2,2–2,8
	η_M , Н/(см·с)	$6,3 \cdot 10^4$	$7,24 \cdot 10^4$	$7,22 \cdot 10^4$	
	50 °C	P_{K1} , МПа	0,20	0,25	0,24
		ε_{K1} , мм	0,62	0,73	0,71
		P_K , МПа	0,60	0,93	0,92
		ε_K , мм	1,2	1,5	1,5
		P_M , МПа	1,12	1,52	1,50
		ε_M , мм	0,17	0,2	0,19
		P , МПа	1,43	2,06	2,01
		ε , мм	2,27	2,79	2,65
		P_K-P_M	6,0–1,12	9,3–1,52	9,2–1,50
		$\varepsilon_M-\varepsilon_K$	1,2–1,7	1,5–2,0	1,5–1,9
	η_M , Н/(см·с)	$1,84 \cdot 10^4$	$2,54 \cdot 10^4$	$2,52 \cdot 10^4$	
	0 °C	P_{K1} , МПа	0,55	0,68	0,70
		ε_{K1} , мм	0,63	1,47	1,77
		P_K , МПа	1,65	2,18	2,15
		ε_K , мм	1,37	2,13	2,15
		P_M , МПа	4,48	5,50	5,43
		ε_M , мм	2,37	3,10	3,11
		P , МПа	6,44	7,30	7,26
		ε , мм	3,36	4,12	4,15
P_K-P_M		1,65–4,48	2,18–5,50	2,15–5,43	
$\varepsilon_M-\varepsilon_K$		0,137–0,237	0,213–0,412	0,215–0,415	
η_M , Н/(см·с)	$8,66 \cdot 10^4$	$9,60 \cdot 10^4$	$9,46 \cdot 10^4$		

Примечание. P_{K1} , ε_{K1} – предельное напряжение, при котором материал работает в упругой стадии, и соответствующая ему деформация; P_K , ε_K – предел текучести и соответствующая ему деформация; P_M , ε_M – предельное напряжение, при котором начинается разрушение материала и соответствующая ему деформация; P , ε – предельное напряжение, при котором происходит полное разрушение материала, и соответствующая ему деформация; P_M-P_K , $\varepsilon_M-\varepsilon_K$ – интервал напряжений, в пределах которого материал находится в пластическом состоянии, и соответствующий ему интервал деформаций; η_M – пластическая вязкость; $\eta_M = P_M-P_{K1}/d\varepsilon/dt$.

Результаты исследования свидетельствуют: дисперсное армирование асфальтобетонных смесей существенно улучшает структурно-механические свойства асфальтобетонов.

При этом дисперсная арматура улучшает показатели при положительных температурах, а органическое вещество, содержащееся в отрезках волокон отработанных сорбентов, улучшая структуру адсорбционного слоя битума, увеличивает трещиностойкость асфальтобетона при отрицательных температурах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лукашевич, В.Н.* Применение теории перколяции для исследования процессов структурообразования дисперсно-армированных асфальтобетонов / В.Н. Лукашевич, И.Н. Ефанов // *Автомобильные дороги и мосты*. – 2014. – № 1 (13). – С. 47–53.
2. *Лукашевич, В.Н.* Исследование влияния технологии приготовления асфальтобетонных смесей на процессы старения асфальтового вяжущего при использовании волокнистых сорбентов в качестве дисперсной арматуры / В.Н. Лукашевич, И.Н. Ефанов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2012. – № 2. – С. 191–196.
3. *Справочная энциклопедия дорожника*. Строительство и реконструкция автомобильных дорог. Т. I / А.П. Васильев, Б.С. Марышев, В.В. Силкин [и др.]; под ред. А.П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2005.
4. *Кирюхин, Г.Н.* Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона / Г.Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов. – М.: Элит, 2009. – 176 с.
5. *Бонченко, Г.А.* Асфальтобетон. Сдвигоустойчивость и технология модифицирования полимером / Г.А. Бонченко. – М.: Машиностроение, 1994. – 176 с.
6. *Баловнева, И.И.* Исследование влияния гранулометрического состава на сдвигоустойчивость асфальтобетона / И.И. Баловнева. – Балашиха: Союздорнии, 1970. – 31 с.
7. *Королев, И.В.* О толщине битумной пленки в асфальтобетоне / И.В. Королев // *Исследование свойств битумов, применяемых в дорожном строительстве*: тр. Союздорнии. – 1970. – Вып. 46. – С. 20–26.
8. *Лукашевич, В.Н.* Технология дисперсного армирования асфальтобетонных смесей волокнистыми сорбентами, направленная на улучшение свойств битума в адсорбционном слое за счет снижения интенсивности избирательной фильтрации его компонентов / В.Н. Лукашевич, И.Н. Ефанов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2012. – № 2. – С. 197–201.

REFERENCES

1. *Lukashevich V.N., Efanov I.N.* Primenenie teorii perkolyatsii dlya issledovaniya protsessov strukturoobrazovaniya dispersno armirovannykh asfal'tobetonov [Application of percolation theory for investigations of structure formation processes in fiber-reinforced concretes]. *Avtomobil'nye dorogi i mosty*. 2014, No. 1. Pp. 47–53. (rus)
2. *Lukashevich V.N., Efanov I.N.* Issledovanie vliyaniya tekhnologii prigotovleniya asfal'tobetonnnykh smesei na protsessy stareniya asfal'tovogo vyazhushchego pri ispol'zovanii voloknistykh sorbentov v kachestve dispersnoi armatury [Concrete mix technology and asphalt cement aging in fiber reinforcement]. *Vestnik TSUAB*. 2012. No. 2. Pp. 191–196. (rus)
3. *Vasiliev A.P., Marishev B.S., Silkin V.V.* Spravochnaya entsiklopediya dorozhnika. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya avtomobil'nykh dorog. Tom I. [Encyclopedia of road worker. Construction and reconstruction of roads. Volume I]. Moscow: Informavtodor Publ., 2005. 356 p. (rus)
4. *Kiryukhin G.N., Smirnov E.A.* Pokrytiya iz shchebenochno-mastichnogo asfal'tobetona [Stone mastic asphalt coatings]. Moscow: Elit Publ., 2009. 176 p. (rus)

5. *Bonchenko G.A.* Asfaltobeton. Sdvigoustoichivost' i tekhnologiya modifitsirovaniya polimerom [Asphalt. Shear resistance and polymer modification technology]. Moscow : Mashinostroenie-1 Publ., 1994. 176 p. (rus)
6. *Balovneva I.I.* Issledovanie vliyaniya granulometricheskogo sostava na sdvigoustoichivost' asfal'tobetona [influence of particle size distribution on shear resistance asphalt concrete]. Balashikha : Soyuzdornii Publ., 1970. 31 p. (rus)
7. *Korolev I.V.* O tolshchine bitumnoi plenki v asfal'tobetone [Thickness of asphalt concrete film]. *Proc. Soyuzdornii*, 1990. No 46. Pp. 20–26. (rus)
8. *Lukashevich V.N., Efanov I.N.* Tekhnologiya dispersnogo armirovaniya asfal'tobetonnykh smesei voloknistymi sorbentami, napravlyennaya na uluchshenie svoistv bituma v adsorbtsionnom sloe za schet snizheniya intensivnosti izbiratel'noi fil'tratsii ego komponentov [Fiber reinforcement of asphalt mixes for bitumen property improvement due to intensive filtering of its components]. *Vestnik TSUAB*. 2012. No. 2. Pp. 197–201. (rus)