

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-500-506>

УДК 625.855.3

Дисперсно-армированные полужесткие материалы на основе асфальтовяжущих

Асп. К. Э. Безоян¹⁾, канд. техн. наук, доц. Т. А. Чистова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Восстановление изношенных асфальтобетонных покрытий – это важная задача для дорожных отраслей многих стран. Дороги, построенные ранее с нежесткими дорожными покрытиями, не могут справиться с ростом транспортной нагрузки. Поэтому в практике дорожного строительства широко используют асфальтоцементные композиты различного состава. В статье предложено несколько вариантов получения асфальтоцементных композиционных материалов. Для эксперимента выбрано несколько составов на основе асфальтогранулята. В битум вводили добавку резиновой крошки с целью получения эластичной переходной зоны за счет деформативных свойств частиц резины, армирующих асфальтовяжущее вещество. В качестве армирования полужесткого материала использовали дисперсные волокна льна, целлюлозы и добавку в виде раствора солей поливалентных металлов, способные создавать дополнительные структурные связи в переходной зоне между цементным камнем и асфальтовяжущим. Экспериментальные исследования показали снижение угла внутреннего трения, что подтверждает высокую устойчивость деформирования без нарушения сплошности дисперсно-армированного материала из асфальтогранулята в широком интервале транспортных нагрузок. Лучшие деформативные качества и устойчивость к многократным нагрузкам показали составы с резиновой крошкой и льняным волокном. Добавка резиновой крошки модифицирует пленку битума, а частицы нерастворенной резины повышают эластичность материала. За счет этого при довольно больших деформациях (0,98 мм) и многократном нагружении сохраняется устойчивость образцов (работа разрушения составляет 3,80 Дж). Введение льняного волокна, обладающего высокой прочностью на разрыв и повышенной жесткостью, позволяет армировать переходный слой таким образом, что при достаточно высоких деформациях (0,73 мм) и большой работе разрушения (2,69 Дж) материал сохраняет устойчивость. Полученный материал может быть использован на грузонапряженных участках.

Ключевые слова: нежесткие дорожные одежды, пористый асфальтобетон, армирующая добавка, минеральное вяжущее, этtringит, пластическое деформирование, угол внутреннего трения

Для цитирования: Безоян, К. Э. Дисперсно-армированные полужесткие материалы на основе асфальтовяжущих / К. Э. Безоян, Т. А. Чистова // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 6. С. 500–506. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-500-506>

Dispersion-Reinforced Semi-Rigid Materials Based on Asphalt Binders

К. Е. Bezoyan¹⁾, Т. А. Chystova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Rehabilitation of deteriorated asphalt concrete pavements is an important task for the road industries in many countries. Roads built earlier with non-rigid road surfaces cannot cope with the growth of transportation load. Therefore, asphalt-cement composites of various compositions are widely used in the practice of road construction. In the article several variants of obtaining asphalt-cement composites are proposed. Several compositions based on asphalt granulate were selected for

Адрес для переписки

Чистова Татьяна Анатольевна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-73
smits@bntu.by

Address for correspondence

Chistova Tatsiana A.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolas str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel. : +375 17 293-96-73
smits@bntu.by

the experiment. Rubber crumb additive was introduced into bitumen in order to obtain an elastic transition zone due to the deformative properties of rubber particles reinforcing the asphalt binder. As reinforcement of the semi-rigid material, we used dispersed fibers of flax, cellulose and an additive in the form of a solution of polyvalent metal salts capable of creating additional structural bonds in the transition zone between the cement stone and the asphalt-binder. Experimental studies have shown a decrease in the angle of internal friction, which confirms the high stability of deformation without breaking the continuity of dispersed-reinforced material from asphalt granulate in a wide range of transport loads. Compositions with rubber crumb and linen fiber showed the best deformative qualities and resistance to repeated loads. The addition of crumb rubber modifies the bitumen film, and particles of undissolved rubber increase the elasticity of the material. Due to this, at rather large deformations (0.98 mm) and multiple loading, the stability of the samples is preserved (fracture work is 3.80 J). The introduction of linen fiber, which has high tensile strength and increased stiffness, allows to reinforce the transition layer in such a way that at sufficiently high strains (0.73 mm) and high work of destruction (2.69 J) the material remains stable. The resulting material can be used in load bearing areas.

Keywords: non-rigid road pavements, porous asphalt concrete, reinforcing additive, mineral binder, ettringite, plastic deformation, internal friction angle

For citation: Bezoyan K. E., Chystova T. A. (2024) Dispersion-Reinforced Semi-Rigid Materials Based on Asphalt Binders // *Science and Technique*. 23 (6), 500–506. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-500-506> (in Russian)

Введение

Восстановление изношенных асфальтобетонных покрытий – актуальная задача для дорожных отраслей многих стран. Построенные ранее дороги с жесткими дорожными одеждами не способны выдерживать увеличивающиеся транспортные нагрузки. Поэтому в практике дорожного строительства достаточно широко применяют асфальтоцементные композиты различного состава.

Регенерированные материалы без существенного добавления минерального вяжущего (цемента) проявляют вязкоупругие свойства в широком температурно-временном диапазоне. В этом случае основными дефектами на покрытиях являются пластические деформации и усталостные трещины. При большом введении минерального вяжущего проявляются упругие свойства и повышенная сдвигоустойчивость при высоких температурах, однако могут проявляться и хрупкие свойства, которые способствуют низкотемпературному трещинообразованию и снижению циклической долговечности. Поэтому одним из наиболее важных вопросов является разработка таких композиционных материалов, которые были бы лишены указанных выше недостатков [1].

Исследования, проведенные в Уральском государственном лесотехническом университете [2], показали, что добавление в асфальтобетон волокон хризотила позволяет поднимать механическую прочность асфальтобетона до 3,8–4,3 МПа при 20 °С и до 2,0–2,3 МПа

при 50 °С. Применение стекловолокна в битумных композициях также повышает работоспособность щебеночно-мастичных композитов [3]. Но этого недостаточно, чтобы надежно воспринимать динамическое нагружение от современных транспортных средств, которое превышает 6,0 МПа [4]. В связи с этим возникла необходимость получения полужестких материалов, обладающих существенно более высокими прочностными свойствами.

Теоретические предпосылки

Учитывая изученный опыт [5–7], предложены два варианта получения полужестких материалов.

Первый заключался во втапливании цементного теста в высокопористый асфальтобетон, приготовленный с использованием частиц дробленого старого асфальтобетона (асфальтогранулят), обработанного сульфатом алюминия. Авторами статьи [8] доказано эффективное влияние сульфата ионов на цементный камень. Взаимодействие сульфата ионов с трехкальцевым алюминатным минералом цемента приводит к образованию гидросульфоалюмината трехсульфатной формы ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$), имеющего игольчатую или призматическую форму этtringита. В этом случае основное количество прочных фазовых контактов происходит с образованием непрерывного конденсационно-кристаллизационного каркаса, который развивается через непокрытые битумом частицы асфальтогранулята, и путем частичного

проникновения нитевидных кристаллов эттрингита через битумные пленки. Также происходит взаимодействие продуктов гидратации цемента с активными компонентами битума на поверхности частиц асфальтобетона. Сложившаяся таким образом пространственная конденсационно-кристаллизационная структура определяет упругие свойства композита. При этом повышается статический модуль упругости, характеризующий сдвигоустойчивость материала, увеличивается угол внутреннего трения минерального каркаса, связанного с кристаллами эттрингита с цементным камнем. Битумные пленки на частицах заполнителя в этом случае обеспечивают требуемую деформативность материала без нарушения его сплошности.

Вторым вариантом дисперсного армирования является введение в состав битума при получении пористого асфальтобетона микродисперсных волокон, длина которых сопоставима с толщиной пленки вяжущего на минеральных частицах. В этом случае выступающие из пленки битума волокна вклиниваются в цементное тесто и работают в качестве анкеров в затвердевшем цементном камне.

Расчетный метод прогнозирования пластического деформирования (колееобразования) в таком материале основан на экспериментальной зависимости скорости необратимого деформирования от режима нагружения и температуры. В общем виде реологическое уравнение для полужесткого материала имеет следующий вид [9]:

$$R_{cd} = \frac{R_c}{E_c} (E_{dmy} + E_t) + \sigma t \varphi, \quad (1)$$

где R_{cd} – сопротивление сдвигу; R_c – предельная структурная прочность; E_c – максимальный модуль упругости; E_{dmy} – длительный модуль упругости; E_t – модуль релаксации; σ – величина нормального напряжения в расчетном сечении; φ – угол внутреннего трения в материале [9].

Таким образом, угол внутреннего трения определяет способность покрытия сопротивляться сдвиговым нагрузкам и предотвращать образование колеи. Для его определения, согласно [10], используется формула

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{3(A_m - A_n)}{3A_m - 2A_n}, \quad (2)$$

где A_m , A_n – средняя работа деформирования образцов асфальтобетона при испытании по схеме Маршала и при одноосном сжатии.

Структурная прочность R_c , представленная в уравнении (1), также может регулироваться дисперсным армированием границы контакта цементного камня и обработанного битумом асфальтогранулята, что препятствует разрушению битумных пленок. Сочетание асфальтовяжущего и цементного камня, соединенных дисперсной арматурой, может гарантировать сдвигоустойчивость дорожного покрытия в широком диапазоне положительных температур. Установленные закономерности поведения полужестких материалов с комплексным набором упругих и вязкопластичных связей [11] позволили выработать критерий их сдвиго- и трещиностойкости.

Излишняя жесткость материала может сказаться на преждевременном растрескивании дорожного покрытия в зимний период, поэтому следует сохранить его определенную деформативность [12].

Согласно [13], условие вязкого разрушения композита можно представить в виде

$$(R_c - \sigma_a) n_a > R_b n_b \gamma, \quad (3),$$

где R_c – предельная структурная прочность асфальтовой составляющей; R_b – прочность бетонной матрицы; σ_a – величина напряжения, воспринимаемого асфальтовой составляющей; n_a и n_b – удельные площади поперечного сечения, занятые соответственно асфальтовой и цементной составляющей; γ – коэффициент вариации прочности бетонной составляющей по площади поперечного сечения, учитывающий неоднородность цементного камня.

Величина γ определяется следующим образом:

$$\gamma = \frac{R_b}{n_b R_b}, \quad (4)$$

где R_b – прочность бетонной матрицы при отсутствии асфальтовой составляющей.

Значение R_b находим по кривой зависимости прочности от температуры при максималь-

ной температуре, когда несущая способность пленок органического вяжущего практически отсутствует (более 80 °С).

Армирование переходной зоны с помощью волокна может существенно снизить хрупкость получаемого материала, поскольку наблюдаемое разрушение происходит по границе раздела между цементным камнем и покрытым битумом асфальтогранулятом.

В общем виде в случае армирования переходной зоны согласно нашим теоретическим представлениям формула (1) приобретает вид

$$R_{cd} = \frac{R_c}{E_c} (E_{dmy} + E_t) + \sigma \operatorname{tg} \varphi + \tau \left(\frac{l}{d} \right) \mu \delta, \quad (5)$$

где τ – величина сцепления волокна с битумом (сила на вырывание волокна из битума) при расчетной температуре; l – длина волокна; d – диаметр волокна; μ – коэффициент объемного армирования (отношение массы волокна к массе битума); δ – коэффициент, учитывающий количество волокон, зацементированных в цементном камне.

Третье слагаемое в формуле (5) определяет, в первую очередь, участие волокон в вязком деформировании при расчетных отрицательных температурах, определяющих температурную трещиностойкость материала [14].

Экспериментальная часть

На первом этапе был подобран устойчивый минеральный каркас пористого асфальтобетона, который представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав минеральной части асфальтобетонных смесей

Composition of the mineral part of asphalt concrete mixtures

Наименование материала	Содержание в смеси
Асфальтогранулят фракции 10–15 мм	80
Асфальтогранулят фракции 5–10 мм	15
Битум (сверх массы асфальтогранулята)	3

Для армирования в состав полужесткого материала вводили дисперсные волокна и добавки, способные создавать дополнительные структурные связи в переходной зоне между цементным камнем и асфальтовязущим.

Состав 1. В битум вводили целлюлозное волокно в количестве 0,3 % в качестве армирующей добавки.

Состав 2. В битум вводили целлюлозное волокно в количестве 0,3 %, но перед заполнением цементным камнем пористый асфальтобетон, в котором асфальтогранулят обрабатывали концентрированным раствором Al_2SO_4 с целью получения в дальнейшем кристаллов этtringита для прошивки битумной пленки.

Состав 3. В битум вводили добавку РБВ-Г (смесь битумной мастики с резиновой крошкой) в количестве 0,8 % с целью получения эластичной переходной зоны за счет деформативных свойств частиц резины, армирующих асфальтовязущее вещество.

Состав 4. В битум вводили льняное волокно в количестве 0,3 % в качестве армирующей добавки.

Состав 5. Использовали чистый битум в качестве контрольного материала для оценки эффективности армирования.

Материалы указанных составов готовили путем введения в битум армирующих добавок и получения асфальтобетонной матрицы, которая в дальнейшем пропитывалась цементным тестом. Состав цементного теста приведен в табл. 2.

Таблица 2

Состав цементного теста

Composition of cement paste

Наименование материала	Количество, % по массе
Портландцемент ПЦ 500 Д0	100
Гиперпластификатор Sika Viskocret 20 he	2,0 (от массы цемента)
Ускоритель твердения «Темп»	0,4 (от массы цемента)

Полученные образцы-цилиндры подвергали испытаниям с целью определения их водонасыщения (характеризующего пористость) и реологических показателей.

На рис. 1–3 выборочно представлены обобщенные диаграммы деформирования образцов-цилиндров асфальтобетона при скорости нагружения по образующей 3 мм/мин и температуре 20 °С. При этой температуре нагрузку воспринимает как вязкий битум, так и жесткий цементный камень. В данных условиях эффект армирования переходной зоны представляется наиболее наглядно.

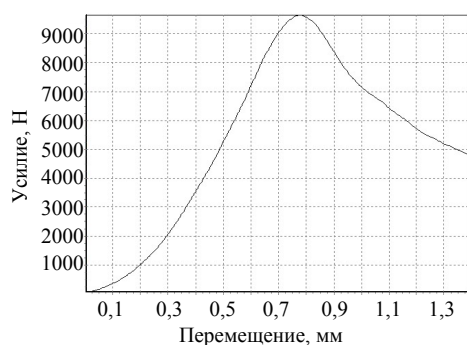


Рис. 1. Диаграмма деформации дисперсно-армированного полужесткого материала (состав 5, без добавок)

Fig. 1. Deformation diagram of dispersion-reinforced semi-rigid materials (of composition 5, no additives)

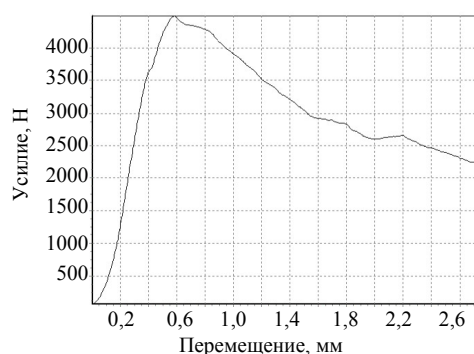


Рис. 2. Диаграмма деформации дисперсно-армированного полужесткого материала (состав 1, целлюлозное вещество)

Fig. 2. Deformation diagram of dispersion-reinforced semi-rigid materials (of composition 1, cellulosic substance)

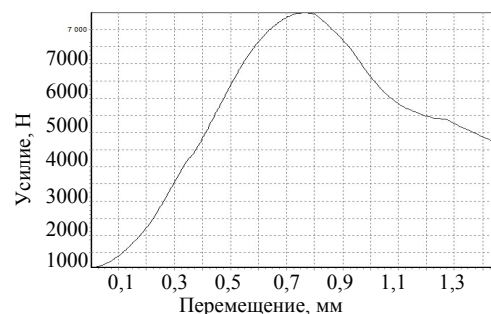


Рис. 3. Диаграмма деформации дисперсно-армированного полужесткого материала (состав 2, целлюлозное волокно + Al_2SO_4)

Fig. 3. Deformation diagram of dispersion-reinforced semi-rigid materials (of composition 2, cellulose fiber + Al_2SO_4)

Анализ диаграмм деформирования показывает, что угол наклона кривых при возрастающих нагрузках на графиках существенно изменяется, что свидетельствует о влиянии дисперсного армирования на процесс разрушения образцов. В табл. 3 представлены усредненные реологические показатели процесса разрушения образцов.

Таблица 3

Показатели, характеризующие процесс деформирования и разрушения

Indicators characterizing the process of deformation and destruction

Состав	Водо-насыще-ние, %	Разрушаю-щее усилие, Н	Деформа-ция, мм	$\text{tg}\alpha$	Работа, Дж
1	5,3	4178	0,69	0,66	1,44
2	4,2	7565	0,82	1,20	3,01
3	2,3	7728	0,98	0,85	3,80
4	1,6	7325	0,73	0,88	2,69
5	1,7	9019	1,08	1,21	4,85

Из приведенных в табл. 3 данных следует, что армирование волокнами целлюлозы (состав 1) позволяет обеспечить довольно высокую деформативность ($\text{tg}\alpha = 0,66$), сравнимую с уровнем обычного асфальтобетона ($\text{tg}\alpha = 0,35\text{--}0,40$). Однако работа разрушения этого материала очень мала, следовательно, материал недостаточно устойчив под действием многократной транспортной нагрузки.

Сочетание армирования с помощью целлюлозного волокна и эттрингита (состав 2) неэффективно, так как деформативность материала очень низкая ($\text{tg}\alpha > 1,0$). В этом случае разрушение идет в хрупком режиме аналогично, как и в составе 5, где разрушение связано с резкой потерей несущей способности цементного камня. Эттрингит имеет хрупкие кристаллы, которые прошивают пленку битума и защемляются в минеральном каркасе, поэтому разрушение их происходит без значимых деформаций. В составе 5 поры максимально заполнены цементным камнем (водонасыщение минимальное – 1,7 %), поэтому нагрузка передается непосредственно на хрупкий материал, поскольку нет места для пластических деформаций.

Лучшие деформативные качества и устойчивость к многократным нагрузкам показали составы 3 и 4 ($\text{tg}\alpha$ находится в пределах 0,85–0,88). Добавка РБВ-Г (состав 3) модифицирует пленку битума, а частицы нерастворенной резины повышают эластичность материала. За счет этого при довольно больших деформациях (0,98 мм) и многократном нагружении сохраняется устойчивость образцов (работа разрушения составляет 3,80 Дж).

Введение льняного волокна, обладающего высокой прочностью на разрыв и повышенной жесткостью, позволяет армировать переходный слой таким образом, что при достаточно высоких деформациях (0,73 мм) и большой рабо-

те разрушения (2,69 Дж) материал сохраняет устойчивость.

Для оптимизации состава асфальтовяжущего в переходной зоне изменяемыми факторами при планировании эксперимента стали содержание дополнительного количества битума в асфальтобетоне и содержание армирующей добавки (табл. 4). Для дисперсного армирования на разделе сред битума и цементного камня применялось льняное волокно как одно из наиболее удачных решений согласно исследованиям, представленным выше.

Таблица 4

Составы специальных асфальтобетонных смесей

Compositions of special asphalt concrete mixtures

Состав	Содержание битума 70/100 (сверх 100 % минеральной части)	Содержание льняного волокна (сверх 100 % минеральной части)
1	2,5	0,1
2	2,5	0,3
3	2,5	0,5
4	3,5	0,1
5	3,5	0,3
6	3,5	0,5
7	4,5	0,1
8	4,5	0,3
9	4,5	0,5

Критерием оптимизации служила усталостная долговечность материала, характеризующая способность воспринимать многократные колесные нагрузки (рис. 4).

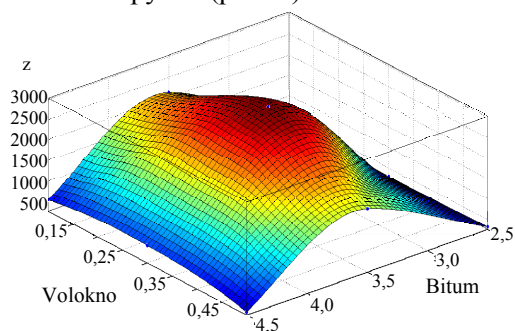


Рис. 4. Зависимость усталостной долговечности (количества циклов до падения модуля жесткости на 50 %) полужесткого материала от содержания битума и армирующего волокна

Fig. 4. Dependence of fatigue life (number of cycles until the stiffness modulus drops by 50 %) of semi-rigid material based on bitumen content and reinforcing fiber

Снижение содержания армирующей добавки до 0,1 % негативно сказывается на усталостных свойствах материала, так как не проявляется армирующий эффект. Увеличение содержания армирующей добавки более 0,3 % также оказывает

негативный эффект. Это происходит за счет чрезмерного структурирования пленок битума и изменения их деформативных свойств.

ВЫВОДЫ

1. Наибольшей усталостной долговечностью и оптимальной деформативностью обладает полужесткий материал с содержанием вновь вводимого битума 3,5 % и армирующей добавки 0,3 %.

2. При уменьшении содержания битума менее 3,5 % материал становится более жестким и хрупким и его усталостная долговечность снижается.

3. При увеличении содержания битума до 4,5 % уменьшается объемная пористость асфальтобетона и происходит эффект неполной пропитки полужесткого материала цементным раствором. Появляются замкнутые пустоты и каверны, что негативно сказывается на физико-механических свойствах и усталостной долговечности материала.

4. Введение волокон и частиц резины в переходный слой между цементным камнем и поверхностью заполнителя препятствует трещинообразованию, деформационные кривые становятся более пологими.

5. Установлено, что показатель $tg\sigma$, характеризующий деформативность полужесткого материала, снижается в случае применения добавки РБВ-Г, содержащей резиновую крошку и мастику, до 0,85 и до 0,88 при добавлении льняных волокон. Это позволяет надеяться, что дисперсно-армированный материал будет деформироваться без нарушения его сплошности в широком диапазоне нагрузок. В обоих случаях работа разрушения полужестких материалов превышает 2,5 Дж, что свидетельствует об их высокой устойчивости к многократным нагрузкам.

6. Таким образом, дисперсное армирование с помощью указанных добавок позволяет получать довольно прочный материал, который не потребует устройства деформационных швов для восприятия температурных напряжений. дисперсно-армированного материала может быть использован в первую очередь на участках торможения и разгона транспортных средств, где наблюдаются сдвиговые деформации у традиционного асфальтобетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холодные регулированные смеси на основе асфальтогранулятов для устройства верхних слоев дорожных покрытий / В. А. Веренько [и др.] // Дороги и мосты. 2020. № 2 (44). С. 187–213.

2. Дедюхин, А. Ю. Разработка технологии дисперсного армирования асфальтобетонных смесей несортными фракциями волокон хризотила: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / А. Ю. Дедюхин. Екатеринбург: УрГЛУ, 2009. 22 с.
3. Акулич, А. В. Структура и свойства дисперсно-армированных асфальтобетонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А. В. Акулич. Минск, 1987. 27 с.
4. Бусел, А. В. Перспективы применения тонкослойных цементобетонных дорожных покрытий в условиях роста транспортных нагрузок / А. В. Бусел, А. И. Смыковский, Т. А. Чистова // Технологии бетонов. 2008. № 2. С. 68–70.
5. Петрович, П. П. Исследование свойств укладываемого бетона для строительства покрытий автомобильных дорог / П. П. Петрович, А. В. Дмитричев // Современные проблемы строительства и реконструкции зданий и сооружений: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: ВоГТУ, 2003. С. 217–218.
6. Асмагулаев, Б. А. Укладываемый бетон на основе медленнотвердеющего шлакового вяжущего / Б. А. Асмагулаев // Автомобильные дороги. 1993. № 9. С. 18–20.
7. Бусел, А. В. Использование дисперсно-армированного бетона в элементах мостового полотна [Электронный ресурс] / А. В. Бусел, В. С. Артимович // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / редкол.: С. Е. Кравиченко (гл. ред.) [и др.]; сост. В. А. Ходяков. Минск: БНТУ, 2021. С. 41–47. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/108503>.
8. Бусел, А. В. Активация крупного заполнителя – резерв экономии цемента и повышения прочного тяжелого бетона / А. В. Бусел, В. В. Киселев, Т. А. Чистова // Строительная наука и техника. 2006. № 3. С. 21–23.
9. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько [и др.]. Минск: Арт Дизайн, 2015. 296 с.
10. Кирюхин, Г. Н. Моделирование работоспособности и долговечности асфальтобетона в дорожных покрытиях / Г. Н. Кирюхин. М.: Технополиграфцентр, 2018. 330 с.
11. Теоретические основы анализа полужестких материалов для дорожных одежд / В. А. Веренько [и др.] // Автомобильные дороги и мосты. 2019. № 2 (24). С. 23–29.
12. Телтаев, Б. Б. Низкотемпературное растрескивание асфальтобетонного покрытия: объяснение явления и прогноз количества трещин / Б. Б. Телтаев // Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. № 3. С. 30–34.
13. Веренько, В. А. Прогнозирование расчетных характеристик бетонов на органогидравлических вяжущих в широком диапазоне температур и скоростей деформирования / В. А. Веренько, А. А. Макаревич // Вестник Белорусского национального технического университета. 2010. № 3. С. 20–27.
14. Бусел, А. В. Битумно-эпоксидные композиции для регенерированного асфальтобетона / А. В. Бусел, У. Г. Сушкевич, В. Г. Соловьев // Наука и техника в дорожной отрасли. 2020. № 2. С. 34–37.
15. with Non-Grade Fractions of Chrysotile Fibers [Dissertation]. Ekaterinburg: Publishing House of the Ural State Forestry Engineering University (in Russian).
16. Akulich A. V. (1987) *Structure and Properties of Dispersed-Armour-Coated Asphalt Concrete* [dissertation]. Minsk, Belarusian Polytechnic Institute (in Russian).
17. Busel A. V., Smykovsky A. I., Chistova T. A. (2008) Prospects for the Use of Thin-Layer Cement Concrete Road Surfaces in Conditions of Increasing Traffic Loads. *Tekhnologii Betonov* [Concrete Technology], (2), 68–70 (in Russian).
18. Petrovich P. P., Dmitrichev A. V. (2003) Study of the Properties of Compacted Concrete for the Construction of Road Surfaces. *Sovremennye problemy stroitel'stva i rekonstruktsii zdaniy i sooruzhenii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern Problems of Construction and Reconstruction of Buildings and Structures. Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Vologda, Vologda State Technical University, 217–218 (in Russian).
19. Asmatulaev B. A. (1993) Rolled Concrete Based on Slow-hardening Slag Binder. *Avtomobilnye Dorogi* [Highways], (9), 18–20 (in Russian).
20. Busel A. V., Artimovich V. S. (2021) Use of Dispersed Reinforced Concrete in Bridge Deck Elements. *Sovremennye problemy stroitel'stva i rekonstruktsii zdaniy i sooruzhenii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Road Construction and Its Engineering Support. Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 101–109. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/108503> (in Russian).
21. Busel A. V., Kiselev V. V., Chistova T. A. (2006) Activation of Coarse Aggregate is a Reserve for Saving Cement and Increasing the strength of Heavy Concrete. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (3), 21–23 (in Russian).
22. Verenko V. A., Zankovich V. V., Ladyshev A. A., Lira S. V., Afanasenko A. A., Yatsevich P. P. (2015) *Durable Asphalt Concrete Pavements for Roads, Bridges and Streets*. Minsk, Art Design Publ. 296 (in Russian).
23. Kiryukhin G. N. (2018) *Modeling the Performance and Durability of Asphalt Concrete in Road Surfaces*. Moscow, Tekhnopoligrafstsentr Publ. 330 (in Russian).
24. Verenko, V. A., Busel A. V., Shumchik V. K., Zankovich V. V., Li Shonghu (2019) *Theoretical Basis for the Analysis of Semi-rigid Pavement Materials. Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], (2), 23–29 (in Russian).
25. Teltaev B. B. (2019) Low-Temperature Cracking of Asphalt Concrete pavement: Explanation of the Phenomenon and Prediction of the Number of Cracks. *Nauka i Tekhnika v Dorozhnoy Otrastli* [Science and Technology in the Road Industry], (3), 30–34 (in Russian).
26. Verenko V. A., Makarevich A. A. (2010) Prediction of the Design Characteristics of Concrete with Organic-Hydraulic Binders in a Wide Range of Temperatures and Deformation Rates. *Vestnik Belorusskogo Natsionalnogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (3), 20–27 (in Russian).
27. Busel A. V., Sushkevich U. G., Solovyov V. G. (2020) Bitumen-Epoxy Compositions for Regenerated Asphalt Concrete. *Nauka i Tekhnika v Dorozhnoy Otrastli* [Science and Technology in the Road Industry], (2), 34–37 (in Russian).

Received: 11.03.2024

Accepted: 20.05.2024

Published online: 29.11.2024

REFERENCES

1. Verenko, V. A., Zankovich V. V., Zaitsev E. O., Lira S. V., Nasonova I. G., Shan Bo, Khou Dekhua (2020) Cold Controlled Mixtures Based on Asphalt Granules for the Construction of Top Layers of Road Surfaces. *Dorogi i Mosty* [Roads and Bridges], (2), 187–213 (in Russian).
2. Dedyukhin A. Yu. (2009) *Development of Technology for Dispersed Reinforcement of Asphalt Concrete Mixtures*