УДК 691.168

С.С. Иноземцев, Е.В. Королев

ФГБОУ ВПО «МГСУ»

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

Проанализированы основные причины преждевременного разрушения дорожных покрытий, одной из которых является недолговечность асфальтобетона, применяемого для верхнего слоя автомобильных дорог. Для увеличения долговечности асфальтобетона предложено использование активированного минерального порошка из диатомита, обработанного комплексной наноразмерной добавкой, состоящей из золей гидроксида железа (III) и кремниевой кислоты. Показано, что введение разработанного материала позволяет получить щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) с улучшенными показателями физико-механических свойств. Кроме того, его применение позволяет исключить из состава ЩМА дорогостоящие стабилизирующие волокна. С применением современных методов испытаний проведена оценка долговечности наномодифицированного ЩМА, результаты которой показывают, что разработанный асфальтобетон обладает большей стойкостью к образованию колеи при положительных температурах, к истиранию шипованным колесом при отрицательных температурах и воздействию погодноклиматических факторов: попеременного замораживания — оттаивания, увлажнения — высушивания и воздействию УФ и ИК-излучения. Установлено, что применение диатомита, обработанного комплексной наноразмерной добавкой при производстве асфальтобетона, позволяет управлять начальным структурообразованием ЩМА. Показано, что современные методы позволяют производить оценку долговечности асфальтобетона на этапе проектирования составов.

Ключевые слова: диатомит, золь, гидроксид железа (III), кремниевая кислота, долговечность, щебеночно-мастичный асфальтобетон.

В современных условиях эксплуатации долговечность автомобильных дорог недостаточна. Основными причинами преждевременного разрушения дорожных покрытий являются неудовлетворительное качество используемых материалов, низкая культура производства асфальтобетонного покрытия, а также несовершенство методов проектирования состава асфальтобетона с заданной долговечностью.

Очевидно, что внешние воздействия приводят к изменениям структуры материала. Структура (от лат. *Structūra* — строение) — совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность, т.е. сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях [1], связанных с изменением физико-химических связей как на границе раздела фаз, так и в отдельных компонентах. Нарушение связей в компонентах, которые обусловлены периодом релаксации напряжений и интенсивностью эксплуатационных воздействий, происходит, как правило, в течение длительного периода. Разрушение связей на границе раздела фаз имеет для материала катастрофический характер, так как взаимодействия на границе раздела фаз определяют формирование технической системы — композитного материала, обладающего неаддитивными свойствами. Такие взаимодействия имеют наименование

интегративных связей [2], т.е. обеспечивающих формирование системы (в данном случае — композитного материала). Отсюда следует, что управление структурообразованием материала на границе раздела фаз в период его эксплуатации является важной материаловедческой задачей.

В асфальтобетоне система битум — минеральный наполнитель занимает более 90 % границы раздела фаз [3, 4]. Нами для управления процессами начального структурообразования в пределах указанной границы раздела фаз предложена технология наномодифицирования посредством использования активного поверхностного модификатора (золь гидроксида железа (III) и кремниевой кислоты), нанесенного на поверхность пористого минерального носителя, толщиной не более 100 нм [5—7].

Для оценки возможности получения асфальтобетонов, обладающих улучшенными показателями физико-механических свойств, с применением поверхностно-активированного наполнителя, разработанного в соответствии с предложенной технологией, был осуществлен подбор составов щебеночно-мастичных асфальтобетонов ЦМА-20 с непрерывным гранулометрическим составом (табл. 1, 2).

Табл. 1. Составы щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей ЦМА-20

Наименование показателя	Номер состава ЦМА							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Замещение МП-1 наномодифицированным диатомитом, % по объему	0	0	30	30	60	60	100	100
Щебень габбро-диабазовый фракции 5...20 мм, %	75,0	75,0	75,9	75,9	76,8	76,8	78,0	78,0
Отсев гранита фракции 0...5 мм, %	10,0	10,0	10,1	10,1	10,2	10,2	10,4	10,4
Минеральный порошок МП-1, %	15,0	15,0	10,6	10,6	6,1	6,1	—	—
Диатомит с наноразмерной добавкой, %	—	—	3,4	3,4	6,9	6,9	11,6	11,6
Viatop-66, (сверх 100 % минеральной части), %	0,3	0,3	—	—	—	—	—	—
Битум (сверх 100 % минеральной части), %	5,5	6,0	5,5	6,0	5,75	6,0	6,5	6,75

Табл. 2. Гранулометрический состав смесей ЦМА-20

Замещение МП-1 наномодифицированным диатомитом, % по объему	Содержание фракции с размером, мм, мельче									
	0,071	0,14	0,315	0,63	1,25	2,5	5	10	15	20
Требования ГОСТ*	8	8	9	11	13	15	20	25	50	90
	13	15	19	21	24	25	30	45	70	100
0	12	15	17	19	22	23	26	44	68	100
30	11	14	17	18	21	22	25	44	68	100
60	10	14	16	17	20	21	24	43	68	100
100	8	13	16	16	19	20	23	42	67	100

* Верхняя строка — минимальное значение; нижняя — максимальное.

Выбор непрерывной гранулометрии обусловлен тем, что наличие объемного битума в ЩМА обуславливает увеличение его пластической деформативности при растяжении, а также резкое снижение когезионной прочности материала при положительных температурах. Наличие полифракционной смеси наполнителей позволит снизить объемное содержание битума и ожидаемо повысить когезионную прочность асфальтобетона.

Оценку эффективности протекания процессов структурообразования на границе раздела фаз битум — минеральный материал проводили на образцах из ЩМА-20 с различным объемом замещения минерального порошка наномодифицированным диатомитом по показателям свойств, которые характеризуют реакцию структуры материала на эксплуатационные воздействия, например, водостойкость, стойкость к климатическим воздействиям, сдвигоустойчивость и стойкость к колееобразованию.

Анализ результатов исследования физико-механических свойств, приведенных в табл. 3, показал, что остаточная пористость возрастает с увеличением содержания активированного наполнителя в смеси, что снижает уплотняемость смеси за счет увеличения коэффициента внутреннего трения. ЩМА состава № 7, где карбонатный порошок заменен наномодифицированным диатомитом, а содержание битума составляло 6,5 %, не соответствует требованиям ГОСТ по остаточной пористости. Лучшими показателями свойств обладал ЩМА, в котором 100 % наполнителя заменены разработанным материалом.

Табл. 3. Показатели физико-механических свойств ЩМА

Наименование показателя	Требования ГОСТ	Значение показателя для разработанных составов ЩМА							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Количество щебня габбро-диабазового фракции 5...20 мм, %	—	75,0	75,0	75,9	75,9	76,8	76,8	78,0	78,0
Количество гранитного отсева фракции 0...5 мм, %	—	10,0	10,0	10,1	10,1	10,2	10,2	10,4	10,4
Количество минерального порошка МП-1, %	—	15,0	15,0	10,6	10,6	6,1	6,1	—	—
Количество диатомита с норазмерной добавкой, %	—	—	—	3,4	3,4	6,9	6,9	11,6	11,6
Количество Viatop-66, (сверх 100 % минеральной части), %	—	0,3	0,3	—	—	—	—	—	—
Количество битума (сверх 100 % минеральной части), %	—	5,5	6,0	5,5	6,0	5,75	6,0	6,5	6,75
Средняя плотность, г/см ³	—	2,60	2,61	2,56	2,58	2,52	2,53	2,43	2,44
Пористость минеральной части, %	15...19	16	16	16	16	17	17	18	18
Остаточная пористость, %	1,5...4,5	3,4	2,4	4,0	2,3	4,1	3,5	4,6	4,4
Водонасыщение, %	1,0...4,0	2,9	1,9	3,0	2,3	2,4	2,2	2,2	1,65

Окончание табл. 3

Наименование показателя	Требования ГОСТ	Значение показателя для разработанных составов ЩМА							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре: –20 °С –50 °С	Не менее 2,2	4,0	3,8	4,2	4,0	4,3	4,1	5,3	5,2
	Не менее 0,65	1,3	1,1	1,4	1,2	1,6	1,4	2,2	2,1
Сдвигоустойчивость: коэффициент внутреннего трения; сцепление при сдвиге при температуре 50 °С, МПа	Не менее 0,93	0,93	0,94	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	1,00
	Не менее 0,18	0,24	0,20	0,24	0,21	0,29	0,27	0,37	0,36
Предел прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С, МПа	2,5...6,0	3,0	3,1	3,0	3,1	3,3	3,4	3,3	3,4
Водостойкость после длительного насыщения	Не менее 0,85	0,89	0,92	0,93	0,96	0,92	0,93	0,95	0,96
Устойчивость смеси к расслаиванию по показателю стекания вяжущего, %	Не более 0,2	0,13	0,14	0,12	0,13	0,10	0,11	0,06	0,08

Введение диатомита [8—11], обработанного наноразмерной добавкой на основе золя гидроксида железа (III) и кремниевой кислоты, позволяет обеспечить сорбирование свободного битума и увеличить когезионную прочность и стойкость материала к сдвиговым нагрузкам при положительных температурах. Кроме того, применение разработанного материала позволяет исключить использование дорогостоящих стабилизирующих волокон при производстве асфальтобетона, так как диатомит обеспечивает стойкость смеси к расслаиванию, выполняя функцию стабилизатора [12].

В эксплуатационных условиях дорожное покрытие испытывает влияние перепадов температур, в связи с этим ЩМА должен обладать стабильностью свойств при изменении температуры.

Для оценки стабильности свойств ЩМА в различных погодных-климатических условиях используются параметры, учитывающие перепады температур в летний период — коэффициент теплостойкости $k = \frac{R_{50}}{R_{20}}$ и зимний — коэффициент трещиностойкости $k_f = \frac{R_{50}}{R_{\text{раск}}}$. Результаты определения значений указанных параметров для разработанных составов ЩМА приведены на рис. 1.

Анализом данных рис. 1 установлено, что увеличение содержания диатомита, обработанного наноразмерной добавкой, привело к увеличению значений коэффициентов теплостойкости и трещиностойкости ЩМА. Так, значение коэффициента теплостойкости ЩМА, в котором 100 % минерального порошка заменены разработанным материалом, превышало аналогичный показатель эталонного состава на 24 %, а значение k_f — на 43 %.

Рис. 1. Показатели коэффициента теплостойкости (а) и трещиностойкости (б) разработанных составов ЩМА

Значения коэффициента внутреннего трения и сцепления при сдвиге при температуре 50 °С, характеризующие сдвигоустойчивость разработанных составов ЩМА, приведены на рис. 2.

Рис. 2. Параметры сдвигоустойчивости: а — коэффициент внутреннего трения; б — лабораторный показатель сцепления при сдвиге, МПа

Анализом данных, представленных на рис. 2, установлено, что значения коэффициента внутреннего трения и сцепления при сдвиге образцов ЩМА, в которых 100 % минерального порошка заменены поверхностно-активированным диатомитом, на 7,5 и 50 % превышали значения соответствующих характеристик контрольных составов.

Подобные изменения физико-механических свойств наномодифицированного ЩМА объясняются формированием на границе раздела фаз модификатор — битум прочной и плотной битумной пленки, полученной в результате сорбции внутренним поровым пространством зерен минерального носителя модификатора легких фракций. Это способствует увеличению контактной прочности и формированию структуры асфальтобетона с высокой способностью сопротивляться физико-механическим воздействиям. Формирование на границе раздела фаз битум — минеральный материал прочных физико-химических связей оказывает закономерное влияние на водостойкость ЩМА.

Так, установлено, что введение диатомита, обработанного наноразмерной добавкой, способствует увеличению коэффициента водостойкости ЩМА после длительного водонасыщения на 8...10 %.

Методы испытаний асфальтобетонов, предусмотренные существующими нормативными документами, не позволяют объективно оценить его долговечность в эксплуатационных условиях. В соответствии с ГОСТ 12801—98¹ предусмотрено определение предела прочности асфальтобетона в момент разрушения образцов, в то время как в покрытии материал испытывает динамические воздействия с нагрузками значительно меньше предельных. Кроме того, при эксплуатации асфальтобетон подвергается циклическому воздействию погодно-климатических факторов, влияние которых в существующих методиках не учитывается. В связи с этим для оценки долговечности асфальтобетона целесообразно использование методик с условиями испытаний, максимально приближенными к условиям нагружения и окружающей среды.

Оценку долговечности ЩМА и его способности сопротивляться эксплуатационным воздействиям проводили по результатам испытаний стойкости к образованию колеи при положительных температурах (AASHTO TP 63), стойкости к истиранию при воздействии колеса с шипами при отрицательной температуре (рис. 3) и влиянию погодно-климатических факторов (рис. 4).

Рис. 3. Кривые колееобразования разработанных составов ЩМА-20 при положительной (а) и отрицательной температурах (б): 1—4 — составы № 1, 3, 5, 8 соответственно

Полученные результаты свидетельствуют, что применение диатомита, обработанного наноразмерной добавкой, позволяет снизить вероятность образования колеи при положительной температуре с одновременным увеличением стойкости к абразивному воздействию шипованных колес при отрицательной температуре.

Поскольку универсального метода оценки климатического воздействия на асфальтобетон в настоящее время не существует [13—18], нами исследовалась динамика изменения значений физико-механических характеристик (предела прочности при сжатии при температурах 20 и 50 °С, предела прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С) рис. 5 при погодно-климатических воздействиях, согласно требованиям известной методики [19].

¹ ГОСТ 12801—98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний (с Изменением № 1). М. : ГУП ЦПП, 1999. 58 с.

При эксплуатации климатические воздействия, особенно циклические изменения температуры, вызывают разуплотнение структуры ЩМА, обусловленное старением вяжущего и накоплением дефектов, что с течением времени приводит к деградации физико-механических свойств материала.

Критерием оценки влияния погодно-климатических факторов на физико-механические свойства ЩМА являлся коэффициент деградации их значений:

$$k_{\Delta R} = \frac{2}{\Delta R_{20} + \Delta R_{50}} + \frac{1}{\Delta R_p} \rightarrow \max,$$

где ΔR_{20} — изменение предела прочности при сжатии при температуре 20 °С; ΔR_{50} — то же при температуре 50 °С; ΔR_p — изменение предела прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С.

После одного условного года воздействия погодно-климатических факторов у образцов всех составов наблюдались увеличение предела прочности на растяжение при расколе и снижение предела прочности при сжатии при температурах 20 и 50 °С.

Это связано со старением вяжущего в процессе эксплуатации и уменьшением концентрации легких фракций в битуме, приводящее к повышению температуры хрупкости до 0 °С и увеличению жесткости при 20 и 50 °С.

Интегральная оценка изменения структуры [20] наномодифицированного и традиционного ЩМА (значения критерия $k_{\Delta R}$) приведена в табл. 4.

Табл. 4. Значения $k_{\Delta R}$ для эталонного и наномодифицированного ЩМА

Наименование показателя	Значения показателя для составов			
	№ 1	№ 3	№ 5	№ 8
Критерий $k_{\Delta R}$	0,368	0,429	0,478	0,635

Таким образом, применение диатомита, обработанного наноразмерной добавкой на основе золя гидроксида железа (III) и кремниевой кислоты, позволяет управлять начальным структурообразованием ЩМА при его производстве посредством формирования на границе раздела фаз прочной и плотной

Рис. 4. Гистограмма снижения прочности после погодно-климатических воздействий в течение 1 условного года

Рис. 5. Гистограмма изменения прочности образцов на растяжение при расколе при температуре 0 °С после воздействия погодно-климатических факторов в течение 1 условного года

битумной пленки и регулирования содержания легких фракций битума. Кроме того, введение наномодифицированного диатомита обеспечивает получение материала с улучшенными эксплуатационными свойствами за счет блокирования процессов окисления и полимеризации битума при взаимодействии с наночастицами гидроксида и оксида железа, расположенными в активной части наномодификатора.

Библиографический список

1. Большой энциклопедический словарь / под ред. А.М. Прохорова. 2-е изд., перераб. и доп. М. ; СПб. : Большая Рос. энцикл., 1997. 1456 с.
2. Данилов А.М., Королев Е.В., Гарькина И.А. Строительные материалы как системы // Строительные материалы. 2006. № 7. С. 55—57.
3. Гезенцев Л.Б. Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов. М. : Стройиздат, 1971. 255 с.
4. Гридчин А.М., Ядика В.В., Кузнецов Д.А., Высоцкая М.А., Кузнецов А.В. Особенности свойств поверхности кислых минеральных материалов для асфальтобетонных смесей // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 56—57.
5. Иноземцев С.С., Гришина А.Н., Королев Е.В. Модель комплексного наноразмерного модификатора для асфальтобетонов // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3. С. 15—21.
6. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Mineral carriers for nanoscale additives in bituminous concrete // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. Pp. 80—86.
7. Королев Е.В., Гришина А.Н. Синтез и исследование наноразмерной добавки для повышения устойчивости пен на синтетических пенообразователях для пенобетонов // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 30—33.
8. Cong P., Chen S., Chen H. Effects of diatomite on the properties of asphalt binder // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 30. Pp. 495—499.
9. Zhu D.-P., Zhang J.-Z., Chen J.-B., Yuank K., Cheng C. Experiment on road performance of diatomite modified asphalt mixture in permafrost regions // Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport. 2013. Vol. 26. No. 4. Pp. 23—28.
10. Tan Y.-Q., Zhang L., Zhang X.-Y. Investigation of low-temperature properties of diatomite-modified asphalt mixtures // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 36. Pp. 787—795.
11. Zhang Y., Zhu H., Wang G., Chen T. Evaluation of low temperature performance for diatomite modified asphalt mixture // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 413. Pp. 246—251.
12. Илюполов С.К., Мардирасова И.В. Эффективный модификатор-стабилизатор для щебеночно-мастичных смесей // Автомобильные дороги. 2006. № 7. С. 19—22.
13. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Модель деструкции композиционных материалов // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2008. Т. 15. № 3. С. 459—460.
14. Гридчин А.М., Духовный Г.С., Котухов А.Н., Погромский А.Н. Оценка воздействия климатических факторов на асфальтобетон // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. Шухова. 2003. № 5. С. 262—264.
15. Печеный Б.Г. Долговечность битумных и битумоминеральных покрытий. М. : Стройиздат, 1981. 123 с.
16. Котлярский Э.В., Воейко О.А. Долговечность дорожных асфальтобетонных покрытий и факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации. М. : Техполиграфцентр, 2007. 136 с.
17. Золотарев В.А. Время как критерий оценки долговечности асфальтовых материалов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2013. № 1 (64). С. 10—13.

18. *Высоцкая М.А., Кузнецов Д.К., Барабаш Д.Е.* Особенности структурообразования битумно-минеральных композиций с применением пористого сырья // *Строительные материалы*. 2014. № 1—2. С. 68—71.

19. *Соколов Б.Ф., Маслов С.М.* Моделирование эксплуатационно-климатических воздействий на асфальтобетон. Воронеж : Изд-во ВГУ, 1987. 104 с.

20. *Баженов Ю.М., Данилов А.М., Гарькина И.А., Королев Е.В.* Системный анализ в строительном материаловедении. М. : МГСУ, 2012. 432 с.

Поступила в редакцию в феврале 2015 г.

Об авторах: **Иноземцев Сергей Сергеевич** — кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии», **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (499) 188-04-00, inozemcevss@mgsu.ru;

Королев Евгений Валерьевич — доктор технических наук, профессор, директор научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии», проректор, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (499) 188-04-00, korolevev@mgsu.ru.

Для цитирования: *Иноземцев С.С., Королев Е.В.* Эксплуатационные свойства наномодифицированных щебеночно-мастичных асфальтобетонов // *Вестник МГСУ*. 2015. № 3. С. 29—39.

S.S. Inozemtsev, E.V. Korolev

OPERATIONAL PROPERTIES OF NANOMODIFIED STONE MASTIC ASPHALT

In order to prolong the lifetime and to improve the quality of pavements made of asphalt concrete it is necessary to apply innovative solutions in the process of design of such building materials. In order to solve the problem of low durability of asphalt concrete a modifier was proposed, which consists of diatomite, iron hydroxide sol (III) and silica sol. Application of the diatomite with nanoscale layer of nanomodifier allows getting a stone mastic asphalt, which has high values of physical and mechanical properties and allows refusing from expensive stabilizing additive. Mineral filler was replaced by diatomite, which has been modified by iron hydroxide sol (III) and silica sol. Modified diatomite allows sorption of bitumen and increase the cohesive strength and resistance to shear at positive temperatures. The modified asphalt has higher resistance to rutting at high temperature, abrasion resistance at low temperature and impact of climatic factors: alternate freezing and thawing, wetting-drying, UV and IR radiations. It is achieved by formation of solid and dense bitumen film at the phase interface and controlling the content of light fractions of the bitumen. The modifier consists of sol of iron hydroxide, which blocks the oxidation and polymerization of bitumen during operation. The proposed material allows controlling the initial structure formation of stone mastic asphalt. It was shown that modern test methods allow assessing the durability of asphalt in the design phase compositions.

Key words: diatomite, sol, iron hydroxide (III), silicon acid, durability, stone mastic asphalt.

References

1. Prokhorov A.M. *Bol'shoy entsiklopedicheskiy slovar'* [Great Encyclopedic Dictionary]. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, Saint Petersburg, Bol'shaya Ros. entsikl. Publ., 1997. 1456 p. (In Russian)

2. Danilov A.M., Korolev E.V., Gar'kina I.A. Stroitel'nye materialy kak sistemy [Building Materials as Systems]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2006, no. 7, pp. 55—57. (In Russian)
3. Gezentsvey L.B. *Asfal'tovyy beton iz aktivirovannykh mineral'nykh materialov* [Asphalt Concrete Made of Activated Mineral Materials]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 255 p. (In Russian)
4. Gridchin A.M., Yadika V.V., Kuznetsov D.A., Vysotskaya M.A., Kuznetsov A.V. Oso-bennosti svoystv poverkhnosti kislykh mineral'nykh materialov dlya asfal'tobetonnykh smesey [Features of the Properties of Acidic Mineral Materials' Surface for Asphalt]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2007, no. 8, pp. 56—57. (In Russian)
5. Inozemtsev S.S., Grishina A.N., Korolev E.V. Model' kompleksnogo nanorazmernogo modifikatora dlya asfal'tobetonov [Model of Complex Nanoscale Modifier for Asphalt Concrete]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional Architecture and Engineering]. 2013, no. 3, pp. 15—21. (In Russian)
6. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Mineral Carriers for Nanoscale Additives in Bituminous Concrete. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1040, pp. 80—86. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.80>.
7. Korolev E.V., Grishina A.N. Sintez i issledovanie nanorazmernoy dobavki dlya povysheniya ustoychivosti pen na sinteticheskikh penoobrazovatelyakh dlya penobetonov [Synthesis and Study of Nanoscale Additive to Enhance the Foams Stability with Synthetic Blowing Agents for Foam Concrete]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2013, no. 2, pp. 30—33. (In Russian)
8. Cong P., Chen S., Chen H. Effects of Diatomite on the Properties of Asphalt Binder. *Construction and Building Materials*. 2012, vol. 30, pp. 495—499. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.011>.
9. Zhu D.-P., Zhang J.-Z., Chen J.-B., Yuank K., Cheng C. Experiment on Road Performance of Diatomite Modified Asphalt Mixture in Permafrost Regions. *Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport*. 2013, vol. 26, no. 4, pp. 23—28.
10. Tan Y.-Q., Zhang L., Zhang X.-Y. Investigation of Low-Temperature Properties of Diatomite-Modified Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*. 2012, vol. 36, pp. 787—795.
11. Zhang Y., Zhu H., Wang G., Chen T. Evaluation of Low Temperature Performance for Diatomite Modified Asphalt Mixture. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 413, pp. 246—251. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.413.246>.
12. Iliopolov S.K., Mardirosova I.V. Effektivnyy modifikator-stabilizator dlya shchebenochno-mastichnykh smesey [Effective Modifier Stabilizer for Stone Mastic Mixtures]. *Avtomobil'nye dorogi* [Automobile Roads]. 2006, no. 7, pp. 19—22. (In Russian)
13. Gar'kina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. Model' destrukttsii kompozitsionnykh materialov [Destruction Model of Composites]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review of Applied and Industrial Mathematics]. 2008, vol. 15, no. 3, pp. 459—460. (In Russian)
14. Gridchin A.M., Dukhovnyy G.S., Kotukhov A.N., Pogromskiy A.N. Otsenka vozdeystviya klimaticheskikh faktorov na asfal'tobeton [Assessing the Impact of Climatic Factors on Asphalt Concrete]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. Shukhova* [Bulletin BSTU named after V.G. Shukhov]. 2003, no. 5, pp. 262—264. (In Russian)
15. Pechenyy B.G. *Dolgovechnost' bitumnykh i bitumomineral'nykh pokrytiy* [Durability of Bituminous and Bituminous-Mineral Coatings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981, 123 p. (In Russian)
16. Kotlyarskiy E.V., Voeyko O.A. *Dolgovechnost' dorozhnykh asfal'tobetonnykh pokrytiy i faktory, sposobstvuyushchie razrusheniyu struktury asfal'tobetona v protsesse ekspluatatsii* [Durability of Asphalt Concrete Pavement and Destruction Factors of Asphalt Concrete Structure during the Operation]. Moscow, Tekhpolygonentr Publ., 2007, 136 p. (In Russian)
17. Zolotarev V.A. Vremya kak kriteriy otsenki dolgovechnosti asfal'tovykh materialov [Time as Criterion for Assessing the Durability of Asphalt Materials]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli* [Science and Technology in the Road Sector]. 2013, no. 1 (64), pp. 10—13. (In Russian)

18. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.K., Barabash D.E. Osobennosti strukturoobrazovaniya bitumno-mineral'nykh kompozitsiy s primeneniem poristogo syr'ya [Features of Structure Formation of Bitumen-Mineral Compositions with the Use of Porous Materials]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2014, no. 1—2, pp. 68—71. (In Russian)

19. Sokolov B.F., Maslov S.M. *Modelirovanie ekspluatatsionno-klimaticheskikh vozdeystviy na asfal'tobeton* [Modeling of Operational And Climate Impacts On Asphalt]. Voronezh, VGU Publ., 1987, 104 p. (In Russian)

20. Bazhenov Yu.M., Danilov A.M., Gar'kina I.A., Korolev E.V. *Sistemnyy analiz v stroitel'nom materialovedenii* [System Analysis in Construction Materials Science]. Moscow, MGSU Publ., 2012, 432 p. (In Russian)

About the authors: **Inozemtsev Sergey Sergeevich** — Candidate of Technical Sciences, junior research worker, Scientific Educational Center Nanomaterials and Nanotechnologies, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7 (499) 188-04-00; inozemcevss@mgsu.ru;

Korolev Evgeniy Valer'evich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Scientific Educational Center Nanomaterials and Nanotechnologies, Vice Rector, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7 (499) 188-04-00; korolev@vse.mgsu.ru.

For citation: Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Ekspluatatsionnye svoystva nanomodifitsirovannykh shchebenochno-mastichnykh asfal'tobetonov [Operational Properties of Nanomodified Stone Mastic Asphalt]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 3, pp. 29—39. (In Russian)