

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 625.855.3

В.А. Гладких, Е.В. Королев

ФГБОУ ВПО «МГСУ»

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРОАСФАЛЬТОБЕТОНОВ¹

На основании анализа результатов лабораторных исследований обоснована эффективность использования сероасфальтобетона в дорожном строительстве.

Представлена методика проектирования сероасфальтобетона, в основу которой положено равенство объемов нефтяного битума базового состава асфальтобетона и вяжущей композиционной смеси, содержащей битум и серный модификатор.

Вычислен экономический эффект модифицирования битума серным модификатором. Расчет основан на определении разницы в стоимости серного модификатора, содержащего нейтрализатор эмиссии, замещающего дорогостоящий компонент асфальтобетона — нефтяной битум.

Ключевые слова: асфальтобетон, сероасфальтобетон, долговечность, дорожные покрытия, экономический эффект, повышенное сопротивление колееобразованию.

Повышение долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий является одной из актуальных задач, решение которой обеспечивает значительный экономический эффект, достигаемый за счет увеличения межремонтных сроков, а также общего срока службы автомобильных дорог [1].

Одной из причин сокращения срока службы асфальтобетонных покрытий (интенсивное развитие повреждений в виде колея, пластических деформаций, трещин и выбоин) является низкое качество нефтяных битумов.

В последние годы созданию новых комплексных видов вяжущих для дорожного асфальтобетона, способных повысить качество дорог и срок их службы, стало уделяться большое внимание. Битум является необходимой основой вяжущих, а требуемое качество достигается за счет введения в его состав различных модификаторов. Наиболее широко используются битумные вяжущие, модифицированные полимерными добавками или отходами химических производств [2, 3].

Перспективным направлением в производстве дорожных бетонов на основе органических вяжущих является использование в качестве модификатора элементарной серы [4]. Целесообразность такого способа, обусловленная ее физико-химическими свойствами, доступностью и низкой стоимостью, обоснована в [5]. В настоящее время асфальтобетоны с добавками серы успешно применяются в США, Канаде, Южной Корее, КНР, Индии. В СССР в 1986 г. были разработаны методические рекомендации по применению серы в дорожном строительстве [6]. Однако отсутствие опыта, неготовность технологиче-

¹ При поддержке гранта президента МД-6090.2012.8.

ской базы и низкая культура труда не позволили внедрить технологию модифицирования битума.

Сероасфальтобетонные смеси следует рассматривать в качестве разновидности асфальтобетонных, в которых битумное вяжущее частично заменено на серу. Применение серы в качестве добавки в асфальтобетонные смеси позволяет уменьшить расход битума (как правило, содержание серного компонента составляет 25...30 %), снизить температуру приготовления асфальтобетонных смесей [6, 7].

Интерес к этой теме обусловлен также проблемой утилизации технической серы, запасы которой увеличиваются в связи с возрастающими объемами серосодержащего углеводородного сырья и более глубокой очисткой от серы продуктов нефтепереработки, отходящих и дымовых газов коксохимических, металлургических и энергетических производств.

Практика применения и лабораторные исследования асфальтобетонов с добавкой серы показали, что кроме экономического эффекта, достигаемого за счет замещения наиболее дорогостоящего компонента — битума серой, улучшается качество дорожных асфальтобетонов [8, 9].

Добавление серы в асфальтобетонную смесь изменяет свойства битума. Часть серы образует химические соединения с битумом, а также выполняет функции наполнителя при температуре ниже 120 °С, что повышает жесткость и стойкость к колееобразованию. При температуре выше 120 °С сера — высокоподвижный расплав, который улучшает технологические свойства асфальтобетонной смеси [5]. Так, вязкость серы при 117 °С составляет 0,011 Па·с, с увеличением температуры вязкость жидкой серы вначале уменьшается, достигая минимума при 155 °С — 0,0065 Па·с. Начиная с 158 °С жидкая сера буреет, вязкость ее увеличивается и при 187 °С достигает максимального значения 93,3 Па·с [10]. Отсюда очевидно, что с позиции технологии (без учета химического взаимодействия серы с битумом и выделения токсичных газов H_2S и SO_2) нагревание расплава выше 150 °С нецелесообразно.

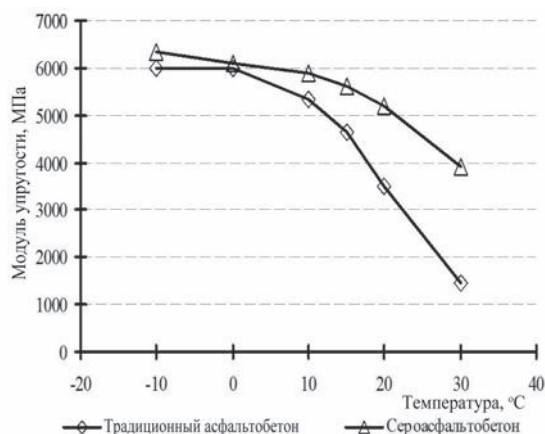
В зависимости от количества добавленной серы ее кристаллизация приводит к различным уровням упрочнения асфальтобетона.

Сероасфальтобетон имеет высокую сдвигоустойчивость и жесткость в условиях воздействия высоких эксплуатационных температур, о чем свидетельствуют результаты исследований механических свойств асфальтобетонов с добавкой серы [9, 11].

Установлено, что при одних и тех же значениях эксплуатационной температуры величина модуля упругости сероасфальтобетона выше, чем у традиционных асфальтобетонов (рис.).

Естественно предположить высокую стойкость сероасфальтобетонов к колееобразованию. Предположение подтверждается результатами проведенных испытаний [9, 11], позволяющих оценить устойчивость асфальтобетонного покрытия к деформациям (колееобразованию) под воздействием высокой температуры и многократной колесной нагрузки. Испытания проводились с использованием анализатора асфальтового покрытия (ААП) и установки, проводящей испытания по «Гамбургскому» тесту. Результаты исследования трех составов

асфальтобетона: контрольного без добавления серы, составов с 30- и 40%-ным замещением битума серой — свидетельствуют о высокой сопротивляемости сероасфальтобетона к образованию колеи, уровень колееобразования которого в 1,5...2 раза ниже, чем у традиционных асфальтобетонов.



Зависимость модуля упругости асфальтобетонов от эксплуатационной температуры

Замещение части битума серой не оказывает негативного влияния на низкотемпературные свойства асфальтобетонных смесей, что подтверждается исследованиями [9, 11]. В данных работах изучалось низкотемпературное трещинообразование на образцах асфальтобетона согласно стандарту AASHTO TP10-93. Принцип теста состоял в следующем: цилиндрический образец с приложенным к нему растягивающим усилием охлаждается с постоянной скоростью на 10 °C в час. Данные документируются до тех пор, пока образец не будет поврежден. Температура, при которой наступает разрушение, принимается за температуру трещинообразования. Результаты испытаний свидетельствуют, что температура трещинообразования асфальтовых смесей, содержащих серу, идентична температуре трещинообразования традиционных асфальтовых покрытий. Температура трещинообразования, определявшаяся согласно указанной выше методике, снижается по мере того, как битум становится мягче, т.е. битумы с высокой температурой размягчения обладают лучшей сопротивляемостью к трещинообразованию. Это ожидаемый результат, так как менее вязкие марки битума являются более деформативными при снижении температуры и поэтому лучше подходят для борьбы с низкотемпературным растрескиванием в холодном климате.

Кроме того, проводилось определение динамического модуля упругости для традиционных асфальтобетонных составов и составов с добавкой серы в [9, 11]. Исследование проводилось в соответствии с AASHTO TP62, с использованием ИРС тестера характеристик асфальтовой смеси. Полученные при испытании данные свидетельствуют, что сероасфальтобетон обладает более высоким модулем упругости при высоких эксплуатационных температурах, нежели обычный асфальтобетон; при низких температурах сероасфальтобетон имеет модуль упругости, аналогичный обычному асфальтобетону. Таким обра-

зом, замещение битума серой практически не оказывает влияния на низкотемпературные свойства асфальтовых смесей.

При использовании в качестве модификатора асфальтобетона порошковой серы происходит эмиссия токсичных газов.

Данная проблема решается использованием комплексного серного модификатора, содержащего не менее 90 % серы, а также нейтрализатор эмиссии сероводорода и диоксида серы. Нейтрализатор включает органический компонент, обеспечивающий снижение температуры хрупкости битума.

Основным условием проектирования сероасфальтобетона является равенство объемов битума и битума с частичным замещением серой, т.е.:

$$\frac{B}{\rho_B} = \frac{CBV}{\rho_{CBV}}, \quad (1)$$

где B — расход битума для приготовления асфальтобетона заданной марки; ρ_B — плотность битума; CBV — расход битума и вводимой в смесь серы; ρ_{CBV} — плотность битума с добавкой серы.

Отсюда объем вяжущего для асфальтобетона с добавкой серы целесообразно представить следующим образом:

$$\frac{CBV}{\rho_{CBV}} = \frac{B^*}{\rho_B} + \frac{S}{\rho_S}, \quad (2)$$

где S — расход серы; ρ_S — плотность серы.

При некотором фиксированном количестве серы a_s в асфальтобетонной смеси

$$S = a_s B.$$

Условие равенства объемов преобразуется к виду

$$\frac{B}{\rho_B} = \frac{B^*}{\rho_B} + \frac{a_s B}{\rho_S}. \quad (3)$$

Отсюда расходы битума и серы для приготовления асфальтобетонной смеси равны:

$$B^* = B \left(1 - a_s \frac{\rho_B}{\rho_S} \right); \quad (4)$$

$$S = a_s B.$$

В общем случае расход битума в асфальтобетонных смесях с добавкой многокомпонентного модификатора имеет следующий вид:

$$B^* = B \left(1 - \sum a_i \frac{\rho_B}{\rho_i} \right), \quad (5)$$

где a_i — степень наполнения по массе i -го компонента модификатора; ρ_i — плотность i -го компонента модификатора.

Целесообразность применения серного модификатора обусловлена не только его положительным воздействием на эксплуатационные свойства асфальтобетона, но и экономическим эффектом, достигаемым за счет частичной замены дорогостоящего органического вяжущего серным модификатором.

Разница в стоимости тонны традиционного и сероасфальтобетона равна

$$P = BC_B - (B^*C_B + MC_M), \quad (6)$$

где B — расход битума в асфальтобетонной смеси без добавления серы; C_B — стоимость битума; B^* — расход битума в асфальтобетонной смеси с добавлением серного модификатора; M — расход модификатора, рассчитываемый по формуле $M = a_i B$; C_M — стоимость модификатора.

Экономический эффект от применения серного модификатора равен

$$\Xi = V(\rho_1 B C_B - \rho_2 B^* C_B - \rho_2 M C_M), \quad (7)$$

где V — объем асфальтобетона, рассчитываемый по формуле $V = lbt$, где l , b и t — соответственно длина, ширина и толщина покрытия; ρ_1 — плотность асфальтобетона без добавления серного модификатора; ρ_2 — плотность асфальтобетона с добавлением серного модификатора.

Результаты расчета экономической эффективности приведены в таблице.

Результат расчета экономической эффективности

№	Состав вяжущего асфальтобетона	Расход компонентов на 1 т, т	Стоимость компонентов вяжущего 1 т АБС, р.	Разница в стоимости 1 т асфальтобетона*		Стоимость вяжущего в асфальтобетоне, р.**	Экономический эффект, р.***
				р.	%		
1	Битум	0,065	1040	—	—	798700,0	—
2	Битум	0,0554	886,4	114,6	11,0	714260	84400
	Сера (30 % замещения)	0,0195	39				
3	Битум	0,0542	867,2	46,1	4,4	767640	31060
	Комплексный серный модификатор (30 % замещения)	0,0195	126,75				
4	Битум	0,0525	840,4	52,3	5,0	761340	37730
	Комплексный серный модификатор (более 30 % замещения)	0,0225	147,3				

Примечание. * разность в стоимости тонны асфальтобетона без добавления серного модификатора и с добавлением определена по формуле (6); ** стоимость вяжущего в асфальтобетоне, рассчитанная для покрытия со следующими параметрами: длина 1000 м, ширина 6 м, толщина слоя покрытия 0,05 м; *** экономический эффект определен по формуле (7); стоимость компонентов асфальтобетона, используемая в расчетах: битум — 16000 р./т, техническая сера — 2000 р./т, комплексный серный модификатор — 6500 р./т; содержание битума в асфальтобетоне 6,5 % от общей массы; плотность асфальтобетона без добавления серного модификатора — 2559 кг/м³, плотность асфальтобетона с 30%-ным замещением битума серой — 2578 кг/м³; плотность асфальтобетона с 30%-ным замещением битума комплексным серным модификатором — 2571 кг/м³, плотность асфальтобетона с замещением более 30 % (30 % замещается серой, еще некоторая часть замещается другими компонентами модификатора) — 2573 кг/м³.

Экономия на замене битума в расчете на 1 км двухполосного верхнего слоя асфальтобетонного покрытия составляет 31...85 тыс. р. (в зависимости от применяемого вида серного модификатора и его количества). Это определяется тем, что на 1 км дорожного полотна расходуется около 760 т асфальтобетона, содержащего примерно 49 т битума; при переходе на сероасфальтобетон расход вяжущих составит 40 т битума и 15 т модифицированной серы.

Результаты указанных выше исследований, а также приведенные экономические показатели свидетельствуют, что применение сероасфальтобетона целесообразно для покрытий дорог РФ, где перепады температур носят экстремальный характер.

Кроме экономического эффекта, достигаемого за счет замещения битума серой, улучшаются и эксплуатационные свойства асфальтобетонов, увеличивается его сопротивляемость к колееобразованию. В результате этого повышается долговечность дорожных покрытий, что обеспечивает значительный экономический эффект за счет сокращения затрат на проведение ремонтных работ; улучшается транспортно-эксплуатационное состояние дорожных покрытий в течение их срока службы. Использование в качестве добавки для асфальтобетонов серы частично решает и экологическую проблему ее утилизации.

Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Режим доступа: http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=19188. Дата обращения: 10.02.13.
2. *Сохадзе В.Ш.* Новые возможности битумных материалов // Строительство и недвижимость. 2001. № 2. С. 25—29.
3. Рекомендации по применению битумно-резиновых композиционных вяжущих материалов для строительства и ремонта покрытий автомобильных дорог : изд. офиц. Введ. 2003.02.05. М. : Росавтодор. 13 с.
4. *Руденская И.М., Руденский А.В.* Органические вяжущие для дорожного строительства. М. : Транспорт, 1984. 229 с.
5. *Королев Е.В., Баженов Ю.М., Альбакасов А.И.* Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы. Оренбург : ИПК ОГУ, 2010. 364 с.
6. Методические рекомендации по применению асфальтобетонов с добавкой серы и по технологии строительства из них дорожных покрытий. М. : Союздорнии, 1986. Режим доступа: <http://txt.g-ost.ru/43/43620/>. Дата обращения: 10.02.13.
7. Сероасфальтобетонные смеси / М.Н. Алехина, Ю.Э. Васильев, Н.В. Мотин, И.Ю. Сарычев // Строительные материалы. 2011. № 10. С. 12—13.
8. *Kennepol G.Dzh.A., Logan A., Bin D.S.* Mixtures for road surfaces with sulfur-asphalt binders. Technology of asphalt pavement. 1975. Reporst, Technologists Association of asphalt paving, Phoenix, Arizona, pp. 485—518.
9. *Strikljend D., Kolanzh D., Shou P., Pag N.* Study of the properties of asphalt mixes with sulfur additives at low temperatures. Shell Sulphur Solutions, 16 p.
10. *Менковский М.А., Яровский В.Т.* Технология серы. М. : Химия, 1985. 286 с.
11. *Timm D., Trjen N., Tejlor A., Robbins M., Paujell B.* Evaluation of the quality of the mixture and the structural strength of pavements using Shell Thioave. Report NZAT 09-05, Auburn University, 2009.

Поступила в редакцию в марте 2013 г.

Об авторах: **Гладких Виталий Александрович** — аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Gladkich_87@mail.ru;

Королев Евгений Валерьевич — доктор технических наук, профессор, советник РААСН, проректор по учебной работе, директор научно-образовательного центра по направлению «Нанотехнологии», ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, (8495)287-49-14, korolev@nocnt.ru.

Для цитирования: *Гладких В.А., Королев Е.В. Технико-экономическая эффективность применения сероасфальтобетонов // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 76—83.*

V.A. Gladkikh, E.V. Korolev

TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF SULPHUR-MODIFIED ASPHALT CONCRETES

The authors have proven that sulphur-modified asphalts can be efficiently applied in road building. The authors' conclusions are based on the analysis of their laboratory research findings.

In the article, the authors provide their methodology for design of the sulphur-modified asphalt concrete. The core point of the methodology proposed by the authors consists in the equality of volumes of the oil bitumen in the benchmark composition of the asphalt concrete and in the composite binder containing the bitumen and sulphur modifier.

The authors have also analyzed the economic efficiency of modifying the bitumen by the sulphur modifier. The analysis is based on identification of difference between the value of the sulphur modifier that contains the emission neutralization agent instead of the oil bitumen, an expensive component of the asphalt concrete.

Key words: asphalt, sulfur-modified asphalt concrete, durable paving, economic benefits, higher resistance to rutting.

References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Transport Strategy of the Russian Federation through 2030]. Available at: http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=19188. Date of access: 10.02.13.
2. Sokhadze V.Sh. *Novye vozmozhnosti bitumnykh materialov* [New Capabilities of Bitumen Materials]. *Stroitel'stvo i nedvizhimost'* [Construction and Real Estate]. 2001, no. 2, pp. 25—29.
3. *Rekomendatsii po primeneniyu bitumno-rezinovykh kompozitsionnykh vyazhushchikh materialov dlya stroitel'stva i remonta pokrytiy avtomobil'nykh dorog* [Recommendations for Application of Composite Bitumen-rubber Binders in Construction and Repair of the Road Paving]. Moscow, Rosavtodor Publ., 13 p.
4. Rudenskaya I.M., Rudenskiy A.V. *Organicheskie vyazhushchie dlya dorozhnogo stroitel'stva* [Organic Binders for Road Building Purposes]. Moscow, Transport Publ., 1984, 229 p.
5. Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Al'bakasov A.I. *Radiatsionno-zashchitnye i khimicheski stoykie sernye stroitel'nye materialy* [Radiation Protective and Chemical-resistant Sulphur-based Construction Materials]. Orenburg, IPK OGU Publ., 2010, 364 p.
6. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu asfal'tobetonov s dobavkoy sery i po tekhnologii stroitel'stva iz nikh dorozhnykh pokrytiy* [Methodological Recommendations for Application of Asphalt Concreted Containing Sulphur Additives and Technology of Road Pavements Constructed through the Application of the Above Compositions]. Moscow, Soyuzdornii Publ., 1986. Available at: <http://txt.g-ost.ru/43/43620/>. Date of access: 10.02.13.

7. Alekhina M.N., Vasil'ev Yu.E., Motin N.V., Sarychev I.Yu. Seroasfal'tobetonnye smesi [Sulphur-Asphalt Concrete Mixtures]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2011, no. 10, pp. 12—13.

8. Kennepol G.Dzh.A., Logan A., Bin D.S. Mixtures for Road Surfaces with Sulfur-asphalt Binders. Technology of Asphalt. Report, Technologists Association of Asphalt Paving, 1975, pp. 485—518.

9. Strikljend D., Kolanzh D., Shou P., Pag N. Study of the Properties of Asphalt Mixes with Sulfur Additives at Low Temperatures. Shell Sulphur Solutions, 16 p.

10. Menkovskiy M.A., Yarovskiy V.T. *Tekhnologiya sery* [Sulphur Technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1985, 286 p.

11. Timm D., Trjen N., Tejlor A., Robbins M., Paujell B. Evaluation of the Quality of the Mixture and the Structural Strength of s Using Shell Thioave. Report NZAT 09-05, Auburn University, 2009.

About the authors: **Gladkikh Vitaliy Aleksandrovich** — postgraduate student, Department of Technology of Binders and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Gladkikh_87@mail.ru;

Korolev Evgeniy Valer'evich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Adviser, Russian Academy of Architectural and Building Sciences (RAACS), Vice Rector for Academic Affairs, Director, Research and Educational Centre for Nanotechnologies, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; korolev@nocnt.ru.

For citation: Gladkikh V.A., Korolev E.V. Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya seroasfal'tobetonov [Technical and Economic Efficiency of Sulphur-modified Asphalt Concretes]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 4, pp. 76—83.