

DOI: 10.12737/22365

*Лебедев М.С., канд. техн. наук, инженер-исследователь
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Чулкова И.Л., д-р техн. наук, проф.
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия*

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИТУМНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, НАПОЛНЕННЫХ ЗОЛАМИ-УНОСА РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА*

michaell1987@yandex.ru

Наполнители в асфальтобетоне используют для повышения жесткости или прочности, уменьшения деформаций ползучести (остаточных деформаций), увеличения плотности асфальтовых смесей, в связи с чем имеет смысл оценивать структурирующую способность минеральных порошков, в том числе зол-уноса тепловых электростанций. Различия в методах испытаний у нас в стране и Европе значительно затрудняет сопоставление результатов испытаний. Поэтому представляет интерес сопоставление результатов при испытании минеральных порошков. В ходе исследований установлено, что низкокальциевая зола-уноса Омской ТЭЦ имеет более высокую пористость, что определяет ее способность вмещать в свою поровую структуру больше битума, чем высококальциевая зола Назаровской ГРЭС. Это отражается на результатах реологических испытаний мастик на вискозиметре и стандартными методами. Более высокая вязкость мастики на низкокальциевой золе во всем интервале температур (в том числе, при высоких эксплуатационных) характеризует ее меньшую температурную чувствительность и большую теплоустойчивость материала. Поэтому можно говорить о том, что материал с большей пористостью оказывает на битум более значительное структурирующее влияние.

Ключевые слова: *золы-уноса тепловых электростанций, битумные мастики, реологические характеристики, вязкость, пенетрация, температура размягчения.*

Введение. На сегодняшний день в нашей стране эффективность применения минеральных порошков для асфальтобетонных смесей оценивается по показателям, указанным в российских стандартах [1, 2], основные из которых характеризуют удельный расход битума на единицу массы наполнителя и физико-механические свойства асфальтовяжущих (смеси минерального порошка и битума) и асфальтобетонов, полученных с использованием исследуемых дисперсных продуктов. Отклонение свойств порошка от требований нормативных документов является причиной отказа от использования данного материала в составе смеси.

В свою очередь, такие характеристики наполнителя, как пористость, показатель битумоемкости, косвенно определяют содержание битума в композите (например, в асфальтовяжущем), и их более высоких значения обуславливают только повышенный расход вяжущего. Здесь стоит вспомнить о структурирующей роли минерального порошка [3–5]. Ведь возникающее при использовании наполнителя повышенной дисперсности или пористости более значительное структурирующее влияние на битум далеко не всегда учитывается [6–8]. Одной из причин этого может являться отсутствие в российских нормативных документах терминологии, методов испытаний и требований на подобные характеристики. В европейских стандартах одним

из ключевых показателей является изменение температуры размягчения битума после предварительного введения в него наполнителя в стандартном соотношении [9]. Также очень часто проводят реологические испытания полученных мастик (смеси битума и наполнителя) с помощью реометра динамического сдвига или подобного оборудования [10, 11]. У нас в стране некоторые исследователи оценивают структурирующую способность минерального порошка методом конической пластометрии [12–15]. Различия в методах испытаний определяют значительные расхождения в концентрации твердых частиц порошка в смеси с битумом в испытываемых битумо-минеральных композитах (асфальтовяжущих (в России) и мастик (в Европе)), что значительно затрудняет сопоставление результатов. Исходя из вышеизложенного, представляет интерес сопоставление результатов испытаний по российским и европейским стандартам при испытании минеральных порошков. Настоящая статья посвящена исследованиям зол-уноса (ЗУ) тепловых электростанций различного состава.

Основная часть. В качестве объектов исследований были выбраны две золы-уноса отечественных производств, различающиеся по содержанию оксида кальция: высококальциевая – зола-уноса сухого удаления Назаровской ГРЭС (Назарово, Красноярский край), низкокальцие-

вая – зола-уноса мокрого удаления Омской ТЭЦ-4 (Омск), высушенная перед использованием. Помимо состава золы имеют различную дисперсность – по данным лазерной granulometрии высококальциевая зола значительно более мелкая, однако низкокальциевая зола имеет более чем в 5 раз большую удельную поверхность по БЭТ (5900 м²/кг против 1100 м²/кг). Причиной этого может являться высокое содержание микропор в зольных частицах (что харак-

терно, в том числе, для остатков несгоревшего углерода).

Свойства зол, связанные с составом, дисперсностью, структурой и морфологией частиц, сильно отличаются (табл. 1). Особо хочется отметить различия в средней плотности порошков и, соответственно, в пористости. Большую пористость низкокальциевой золы можно объяснить более крупными частицами, неправильностью формы и их микропористостью (рис. 1).

Таблица 1

Некоторые характеристики зол-уноса как минеральных порошков (наполнителей) для асфальтобетонных смесей

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 52129–2003 на марку МП-2	Высококальциевая зола-уноса Назаровской ГРЭС	Низкокальциевая зола-уноса Омской ТЭЦ-4
Истинная плотность, г/см ³	–	2,78	2,10
Средняя плотность, г/см ³	–	1,92	1,27
Пористость, об. %	не более 40	30,9	39,5
Показатель битумоемкости, г/100 см ³ наполнителя	не более 80	47	74

Пористость порошка характеризует пространство, остающееся в уплотненном слое материала под определенной нагрузкой (в условиях проведения испытаний оно заполнено воздухом), которое будет заполнять битум при формировании структуры асфальтовяжущего (смеси наполнителя и битума). Исходя из имеющихся результатов, можно сделать вывод о том, что

удельный объемный расход битума на высококальциевой золе (Назаровской ГРЭС) будет ниже. Об этом говорят и различия в показателе битумоемкости, однако они значительно больше (74 против 47), чем в пористости (39,5 против 30,9), что объясняется существенно разным удельным весом (табл. 1).

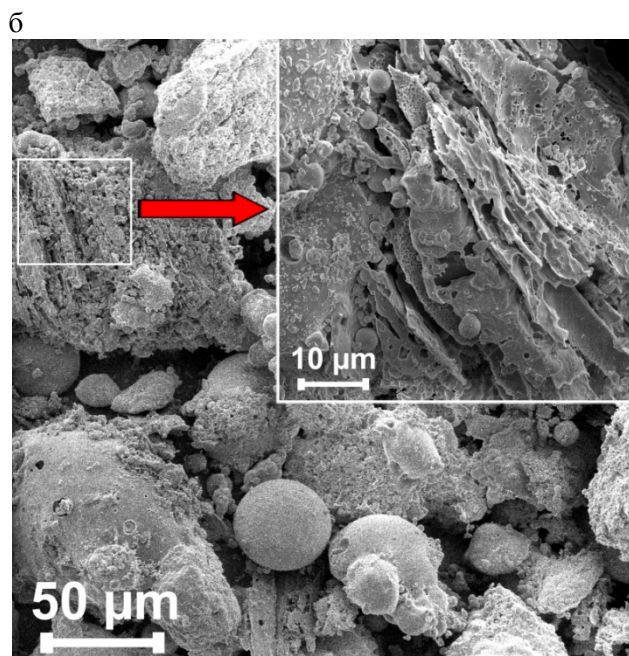
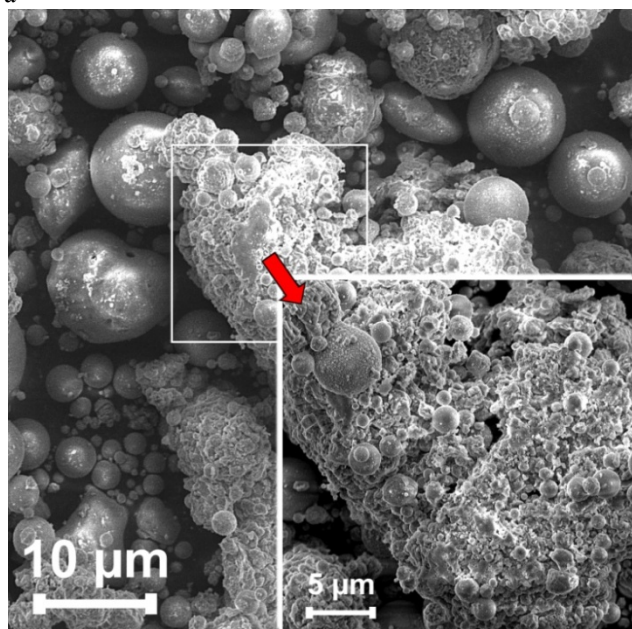


Рис. 1. Микроструктура частиц зол-уноса: а – Назаровской ГРЭС; б – Омской ТЭЦ

Пористость характеризует содержание в материале воздушных пор между частицами. В европейских странах и США этот показатель называют пористостью по Ригдену (Rigden) [16]. По мнению исследователей такой параметр позволяет охватывать влияние распределения ча-

стиц по размерам, формы и текстуры в простом значении. Согласно Ригдену, наполнитель может удерживать определенный объем битума в своей пористой структуре, формируемой воздушными порами между частицами [17]. При этом возникает повышение вязкости (жесткости)

битума при наполнении дисперсным материалом. Соответственно наполнители могут вмещать внутри своей пористой структуры фиксированное количество битума (рис. 2). Битум сверх «зафиксированного в порах» можно назвать свободным. В этой связи, для фиксированного объема битума повышение жесткости – функция количества свободного битума, которая является результатом уровня пористости внутри структуры наполнителя.

Исходя из вышеизложенного, полученные значения пористости можно условно считать максимально возможным фиксированным объемом, который способен занять битум при смешении с наполнителем. Т.к. наполнители в асфальтобетоне используют для повышения жесткости или прочности, уменьшения деформаций

ползучести (остаточных деформаций), увеличения плотности асфальтовых смесей, имеет смысл оценить структурирующую способность зол-уноса, для чего были изучены реологические характеристики мастик, полученных смешением битума с золами-уноса, с использованием стандартных методов исследования битумов (пенетрация и температура размягчения) и колебательных методов исследования на реометре. Изменения в пенетрации и температуре размягчения записывали как разницу в показателях между битумом и мастикой. Мастики для испытаний готовили смешением горячего битума с золами в следующем объемном соотношении – 37,5 % золы и 62,5 % битума. В качестве органического вяжущего использовался битум нефтяной дорожный вязкий марки БНД 60/90.

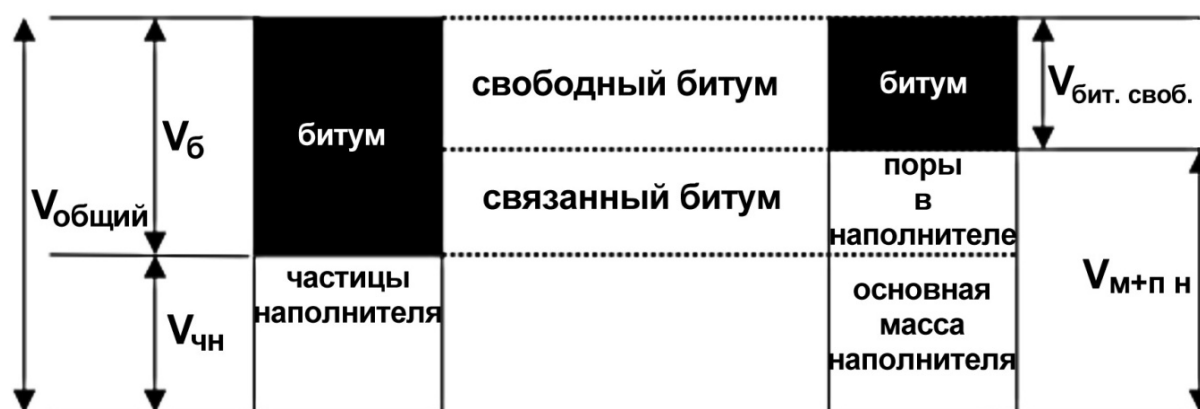


Рис. 2. Иллюстрация концепции «свободного битума» по Ригдену [17]:

$V_{\text{общий}}$ – общий объем мастики; $V_{\text{чн}}$ – объем частиц наполнителя; $V_{\text{б}}$ – объем битума;
 $V_{\text{бит. своб.}}$ – объем свободного битума; $V_{\text{м+п н}}$ – объем насыпанного наполнителя (материал+поры)

Согласно полученным результатам, ЗУ Омской ТЭЦ изменяет свойства битума несколько сильнее (табл. 2). Особенно большая разница получилась в изменении температуры размягчения (14 °С у ЗУ Назаровской ГРЭС и 31 °С у ЗУ Омской ТЭЦ). Изменение условной вязкости (пенетрации) менее заметно, но в целом тенденция сохраняется как при средней температуре испытания (25 °С), так и при низкой (0 °С). Это согласуется показателем пористости, который выше как раз у низкокальциевой золы. Соответственно она способна вмещать в свою поровую структуру больше битума, чем высококальциевая зола. Это означает, что фиксированного битума в объеме мастики будет больше, а свободного меньше (рис. 2). Если рассматривать температуру размягчения как условный показатель вязкости при более высоких температурах, то формируется интересная картина: с увеличением температуры испытаний (эксплуатации) разница в вязкости мастик возрастает. Это говорит о том, что эффект структурирования за счет

большей пористости проявляется при более высоких температурах. Подобные результаты находят отражение в трудах других исследователей [11, 18]. Полученные зависимости хорошо видны из индексов пенетрации: ЗУ Назаровской ГРЭС увеличивает его с -0,91 у исходного битума до -0,35, а ЗУ Омской ТЭЦ – уже до 1,66. Индекс пенетрации характеризует термическую чувствительность битумных вяжущих и мастик на их основе, и чем он выше, тем меньше вязкость зависит от температуры и больше теплоустойчивость материала. На основании полученных результатов физико-механических показателей мастик целесообразно подробно рассмотреть их высокотемпературное поведение, исходя из данных реологии.

Для того, чтобы охарактеризовать битум и мастики в большем температурном диапазоне, их подвергали испытаниям колебательными методами на ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1. Стандартная испытательная система реометра состояла из двух параллельных метал-

лических пластин (верхняя подвижная диаметром 12 мм), датчика контроля температуры, нагружающего устройства и системы сбора данных и контроля. Выбор геометрии испытаний основан на предположении о значительной большей вязкости мастик по сравнению с бездобавочным битумом. Толщина таблеток битума и мастик составляла 1 мм. Определение реологических характеристик проводилось согласно стандартам AASHTO T315 [19] и NT TR 538 [20] в диапазоне температур от +45 до +80 °С с шагом 5 °С (точка 45 °С не показана на графике)

(рис. 3). Помимо температуры задаваемыми параметрами в этих испытаниях являлись величина приложенных напряжений (крутящий момент составлял 100 мкН·м) и время приложения нагрузки (частота 1,59 Гц). Испытание проводилось в режиме CSS (с контролируемым напряжением сдвига). Выходящим параметром выступала деформация, по значениям которой (задаваемые напряжения являлись постоянными) рассчитывали комплексный модуль G^* как отношение амплитуд напряжений и деформаций [21].

Таблица 2

Физико-механические показатели мастик на основе зол-уноса различного состава

Показатели	Применяемый наполнитель	
	Высококальциевая зола-уноса Назаровской ГРЭС	Низкокальциевая зола-уноса Омской ТЭЦ
Изменение пенетрации		
При 25 °С	39	47
При 0 °С	7	10
Изменение температуры размягчения между мастикой и битумом, °С	14	31
Индекс пенетрации	-0,35	1,66

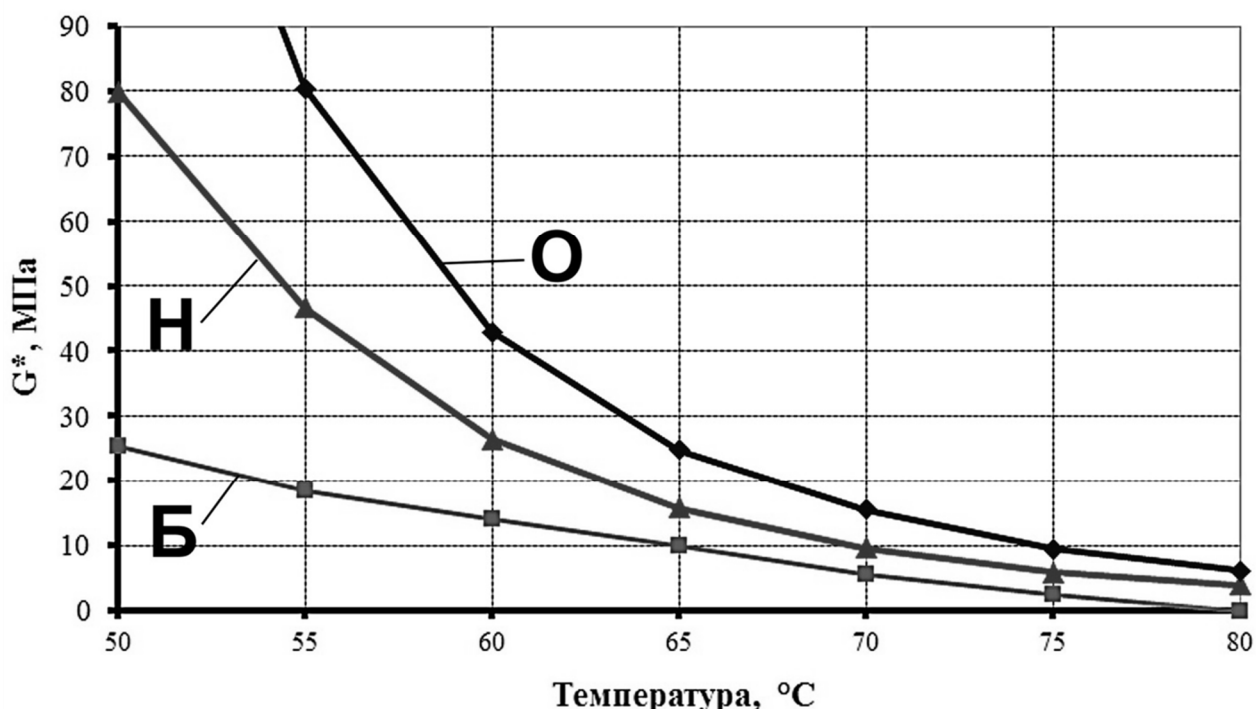


Рис. 3. Зависимость комплексного модуля G^* битума и мастик различного состава от температуры испытаний: Б – битум; Н – ЗУ Назаровской ГРЭС; О – ЗУ Омской ТЭЦ

Согласно полученным данным, комплексный модуль мастики на низкокальциевой золе оказался выше во всем интервале температур (рис. 3). Во всем температурном диапазоне испытаний мастика на ЗУ Омской ТЭЦ имеет зна-

чения модуля 1,5–2,5 раза больше, чем битумный композит на ЗУ Назаровской ГРЭС. При этом обе золы способствуют сильному возрастанию вязкости битума – высококальциевая в 1,5–3,5 раза, низкокальциевая – в 2,5–8,5(!) раз.

Результаты согласуются с физико-механическими свойствами мастик, в частности с температурой размягчения (табл. 2). Однако стоит отметить, что полученным значениям температуры размягчения на графике (рис. 3) соответствуют разные значения комплексного модуля (вязкости). Это связано с тем, что температура размягчения обозначает определенное состояние вязкости материала, при которой битум (мастика) из относительно твердого состояния переходит в жидкое. Этот показатель принято считать условным, т.к. органические вяжущие, как аморфные тела, не имеют строго определенной точки размягчения, у них есть определенный интервал размягчения. Измеряемая температура есть некоторая случайная точка, которая зависит от методики испытания, например, скорости нагрева, площади и толщины образца и т.д.

Выводы. Полученные результаты реологических испытаний мастик на реометре и стандартными методами позволяют сделать вывод о большей температурной чувствительности мастики на высококальциевой золе с меньшей пористостью. Это согласуется с рассчитанными значениями индекса пенетрации (табл. 2). Более высокая вязкость мастики на низкокальциевой золе во всем интервале температур (в том числе, при высоких эксплуатационных) будет обеспечивать необходимую прочность. Соответственно, можно говорить о том, что материал с большей пористостью оказывает на битум более значительное структурирующее влияние.

**Работа выполнена в рамках стипендии Президента Российской Федерации № СП-2099.2015.1, гранта РФФИ №15-33-51017, с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 52129–2003. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия. Введ. 2004–01–01. М.: Госстрой России, 2004. 25 с.
2. ГОСТ 9128-2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. Введ. 2014–11–01. М.:Стандартинформ, 2014. 55 с.
3. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцев, Н.В. Горельшев, А.М. Богуславский, И.В. Королев [под ред. Л.Б. Гезенцева]. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1985. 350 с.
4. Ядыкина В.В. Повышение качества асфальто- и цементобетона из техногенного сырья с учетом состояния его поверхности: дис...д-ра.

техн. наук. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. 455 с.

5. Селицкая Н.В., Духовный Г.С., Ядыкина В.В. Исследование физико-механических и эксплуатационных свойств эмульсионной мастики на основе композиционного наноструктурированного органоминерального вяжущего // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. №5. С. 20–24.

6. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Барабаш Д.Е. Особенности структурообразования битумо-минеральных композиций с применением пористого сырья // Строительные материалы. 2014. №1–2. С. 68–71.

7. Гридчин А.М., Коротаев А.П., Ядыкина В.В., Кузнецов Д.А., Высоцкая М.А. Дорожные композиты на основе дисперсного вспученного перлита // Строительные материалы. 2009. № 5. С. 42–44.

8. Кузнецов Д.А., Агамян Б.С., Баранов Т.Р. Устойчивость к образованию трещин при старении асфальтобетона с пористыми минеральными порошками // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №6. С. 43–45.

9. BS EN 13179-1:2000. Test for filler aggregate used in bituminous mixtures. Delta ring and ball test. BSI, 2000. 10 p.

10. Taylor R. Surface interactions between bitumen and mineral fillers and their effects on the rheology of bitumen-filler mastics. Ph.D. thesis, Univ. of Nottingham, UK., 2007. 238 p.

11. Delaporte, B., N. Di Benedetto, P. Chaverot, and G. Gauthier. Effect of ultrafine particles on linear viscoelastic of mastics and asphalt concretes // Transportation Research Record 2051, Washington, D. C.. 2008. pp. 41–48.

12. Асфальтобетон с использованием гидравлически активных минеральных порошков: учеб. пособие / А. М. Гридчин, В. В. Ядыкина, М. А. Высоцкая, Д. А. Кузнецов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 163 с.

13. Грамматиков Г.А. Асфальтобетон с применением карбидной извести в качестве минерального порошка: автореф. дис...канд. техн. наук. Волгоград: ВолгГАСУ, 2006. 18 с.

14. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Выбор минерального носителя наноразмерной добавки для асфальтобетона // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 158–167.

15. Коротаев А.П. Повышение качества асфальтобетона за счет использования пористого минерального порошка: автореф. дис...канд. техн. наук. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. 22 с.

16. BS EN 1097-4:2008. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the voids of dry compacted filler. BSI, 2009. 14 p.

17. Rigden D.J.. The use of fillers in bituminous road surfacing // Journal of the Society of Chemical Industry, 1947. Vol. 66. p.299.

18. Радовский Б.С. Современные требования к каменным материалам для асфальтобетонных смесей в США // Дорожная техника. 2009. С 74–85.

19. AASHTO T315, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of As-

phalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010. 33 p.

20. NT TR 53, Superpave test methods for asphalt - Procedure for DSR testing. Distributed by: NORDTEST Tekniikantie 12 FIN-02150 ESPOO, Finland. 2002. 39 p.

21. Лебедев М.С. Колебательные испытания при определении реологических характеристик битумов // «Научные аспекты современных исследований»: сб. статей Международной научно-практической конференции. Уфа: Изд-во ООО «Омега Сайнс», 2015. С. 18–25.

Lebedev M.S., Chulkova I.L.

STUDY OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BITUMEN COMPOSITES WITH DIFFERENT FLY ASHES

Fillers in asphalt concrete are used to improve the hardness or strength characteristics, reducing of creep deformation (residual deformation), density increasing. In compliance with it the structuring capacity of mineral fillers including fly ashes from power stations should be studied. Differences in testing methods in Russia and European countries initiate big difficulties in comparison of experimental data for mineral powders. In this work the higher porosity and higher bitumen content of low-calcium fly ash from Omsk power plant vs. high-calcium fly ash from Nasarovsk power plant. It is confirmed by rheological data for bitumen mastic determined by viscosimeter. The higher value of viscosity for bitumen mastics with low-calcium fly ash in the studied temperature range (including operating high temperatures) is associated with lower temperature sensitivity and higher heat resistance of final composite. So, the composite with higher porosity effects on bitumen binder structure formation more significantly.

Key words: fly-ashes from power stations, bitumen mastics, rheological characteristics, viscosity, penetration, melting point

Лебедев Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, инженер-исследователь Центра высоких технологий. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: michaelL1987@yandex.ru

Чулкова Ирина Львовна, доктор технических наук, профессор кафедры "Строительные материалы и специальные технологии". Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия.
Адрес: Россия, 644080, Омск, пр. Мира 5.
E-mail: chulkova_il@sibadi.org