

А.Ю. МАРКОВ¹, В.В. СТРОКОВА¹, А.А. БЕЗРОДНЫХ¹, М.А. СТЕПАНЕНКО¹
¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

СВОЙСТВА ТОПЛИВНЫХ ЗОЛ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КАК КОМПОНЕНТОВ БИТУМНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты исследования вариативности физико-механических и физико-химических свойств, а также структурных особенностей алюмосиликатного техногенного сырья из отходов топливно-энергетических предприятий в виде зол различных типов как компонентов битумных эмульсий, используемых в составе гибридного связующего (портландцемент – битумная эмульсия) для цементоасфальтобетона. На основании анализа совокупности характеристик топливных зол определена возможность и целесообразность их введения в состав битумных эмульсий с целью получения в структуре цементоасфальтобетона битумных прослоек, позволяющих улучшить его эксплуатационные характеристики. В результате проведенного анализа среди рассматриваемого техногенного сырья выявлена наиболее удачная добавка-разбавитель, которая позволила бы на этапе введения в эмульсию сохранить ее свойства, а на этапе формирования структуры конечного композита обеспечить заданные свойства.

Ключевые слова: битумная эмульсия, топливная зола, цементоасфальтобетон, дорожное строительство.

A.Yu. MARKOV¹, V.V. STROKOVA¹, A.A. BEZRODNYKH¹, M.A. STEPANENKO¹
¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

PROPERTIES OF FUEL ASHES OF VARIOUS TYPES AS COMPONENTS OF BITUMEN EMULSION

Abstract. This paper presents the results of a study of the variability of physico-mechanical and physico-chemical properties, as well as structural features of aluminosilicate technogenic raw materials from wastes of fuel and energy enterprises in the form of various types of ashes as components of bitumen emulsions used in the composition of a hybrid binder (Portland cement – bitumen emulsion) for cement-asphalt concrete. Based on the analysis of the set of characteristics of fuel ashes, the possibility and expediency of their introduction into the composition of bitumen emulsions were determined with the aim of obtaining bitumen layers in the structure of cement-asphalt concrete, allowing to improve its operational characteristics. As a result of the analysis, the most effective diluent additive was identified among the studied technogenic raw materials, which would allow keeping its properties at the stage of introduction into the emulsion, and at the stage of forming the structure of the final composite to provide the desired properties.

Keywords: bitumen emulsion, fuel ash, cement-asphalt concrete, road construction.

1 Введение

В настоящее время применение битумных эмульсий при производстве дорожно-строительных работ имеет большую популярность: приготовление плотных эмульсионноминеральных смесей (в том числе грунтовых), подгрунтовка, устройство слоев дорожной одежды способом пропитки, технология холодного ресайклинга и новочип, ямочный ремонт, поверхностная обработка асфальтобетонных покрытий [1–4]. Специфика состава и свойств битумной эмульсии позволяет получать органоминеральные композиты с низким содержанием битума, но обладающими относительно высокими эксплуатационными характеристиками. Как правило, битумные эмульсии применяют в тех случаях, когда использование битума нефтяного дорожного невозможно либо в силу погодно-

климатических факторов (низкие температуры), либо, когда использование битума ведет к нецелесообразному его перерасходу.

Применяя битумные эмульсии в составе различных композитов, следует помнить, что эмульсии, сами по себе, являются композиционным материалом, сочетающим в себе битум, воду, эмульгатор, соляную кислоту и добавки (в случае необходимости регулирования свойств, например, адгезии) [5]. Модификация эмульсий неорганическими высокодисперсными компонентами позволит структурировать пленку, образуемую битумной эмульсией в составе полидисперсного органоминерального материала, что, в свою очередь, даст возможность улучшить качественные характеристики композита.

Примером такого материала является полужесткий композит в виде цементаасфальтобетона, структура которого образована гибридным связующим (портландцемент, битумная эмульсия) [6–10]. В данном случае интерес представляет битумная пленка, образованная на поверхности зерен щебня. Перспективным сырьем для модификации битума в составе дорожно-строительных композитов являются минеральные материалы техногенного происхождения в виде топливных зол. Существует положительный опыт их использования с целью улучшения структурно-механических характеристик битума [11–14], что в конечном итоге позволило улучшить эксплуатационные характеристики асфальтобетона на его основе.

Использование топливных зол с целью модификации прослоек битума в структуре цементаасфальтобетона позволит создать подвижные (так называемые «шарнирные») элементы за счет строения частиц зол. Наряду с другими преимуществами это, впоследствии, позволит увеличить демпфирующую способность материала, что положительно повлияет на его долговечность [15–17]. При этом, модификация битумных пленок, образованных эмульсией, с учетом равномерного ее распределения по поверхности зерен щебня, возможна лишь при введении зол непосредственно в эмульсию. Необходимо обратить внимание на то, что ввиду специфики свойств топливные золы, которые оказывают положительное влияние на характеристики битума нефтяного дорожного, могут отрицательно повлиять на характеристики битумной эмульсии. В связи с этим возникает необходимость анализа совокупности физико-механических, физико-химических свойств и структурных особенностей топливных зол для установления возможности и целесообразности их введения в битумную эмульсию.

2 Метод

При оценке возможности использования тонкодисперсного алюмосиликатного минерального сырья в составе битумной эмульсии изучены топливные золы четырех отечественных производителей, отличающихся видом сжигаемого топлива, технологией его сжигания, технологией удаления остатков от сжигания (таблица 1).

Для установления возможности и целесообразности использования топливных зол как модификаторов битумных вяжущих отсутствуют нормативные документы регламентирующие обязательные требования. Однако, ранее при использовании топливных зол как модификаторов битума нефтяного дорожного нами успешно была предпринята попытка оценивать свойства топливных зол как минерального порошка, который в тандеме с битумом (асфальтовяжущее вещество) является главным сруктурообразующим элементом в составе асфальтобетонов. В этой связи, учитывая, что при взаимодействии с битумной эмульсией в составе цементаасфальтобетона золы образуют структурные элементы, сродни асфальтовяжущему, предложено произвести анализ физико-механических свойств топливных зол в соответствии с ГОСТ Р 52129–2003.

В дополнение к стандартным методикам исследования физико-механических свойств в работе изучалась нанопористость материала с использованием прибора Сорби-М, который позволяет проводить многоточечный анализ поверхности минеральных материалов по методу БЭТ с применением азота. Измерения с использованием данного прибора проводятся в автоматическом режиме и отображаются в реальном масштабе времени.

Таблица 1 – Первичная характеристика исследуемого минерального сырья техногенного происхождения

№ п/п	Наименование производителя топливной золы	Тип золы	Вид топлива	Зольность, %	Способ сжигания топлива	Способ удаления отходов
1	Троицкая ГРЭС	кислая	каменный уголь Экибастузского месторождения	40	сухой	сухой
2	Рефтинская ГРЭС					
3	Новотроицкая ТЭЦ				мокрый	мокрый
4	Назаровская ТЭС	основная	бурый уголь Ирша-Бородинского месторождения	6–12	сухой	сухой

Анализ химического и минерально-фазового состава осуществлялся с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. Количественная оценка состава зол проводилась с применением рентгенофазового анализа, основанного на методе Ритвельда.

Изучение морфоструктурных особенностей проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

3 Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов физико-механических свойств по стандартным методикам (таблица 2) показывает, что все исследуемое техногенное алюмосиликатное сырье является высокодисперсным и значительно различается между собой. Учитывая состав и механизм действия битумной эмульсии необходимо понимать, что чем выше будут площадь удельной поверхности, пористость и показатель битумоемкости той или иной золы, тем быстрее будет распадаться эмульсия.

Среди кислых зол между значениями пористости и показателя битумоемкости наблюдается корреляция, и, чем выше пористость, тем более высокий показатель битумоемкости. Чего нельзя сказать о площади удельной поверхности. Например, топливная зола Новотроицкой ТЭЦ при относительно высоких значениях пористости и показателя битумоемкости обладает самой низкой площадью удельной поверхности, а основная зола Назаровской ТЭС кардинально отличается от остальных (таблица 2). Так при высоких значениях площади удельной поверхности и пористости она обладает низким значением показателя битумоемкости. Следует обратить внимание на то, что среди всех топливных зол по значению пористости соответствует требованиям ГОСТ только кислая топливная зола Рефтинской ГРЭС, а по значениям показателя битумоемкости все материалы кроме золы Троицкой ГРЭС.

По совокупности рассматриваемых физико-механических характеристик можно сделать следующий вывод: для использования рассматриваемых минеральных материалов в составе битумных эмульсий можно рекомендовать только кислую топливную золу Рефтинской ГРЭС. Однако, для полноценного обоснования возможности и целесообразности использования нетрадиционного сырья для нестандартных решений необходимо всестороннее его изучение.

В этой связи, наряду с нормируемыми физико-механическими свойствами была изучена нанопористость топливных зол с применением прибора Сорби-М (рисунок 1).

Наиболее высоким показателем общей пористости наноразмерного характера выделяются топливные золы Троицкой ГРЭС, Рефтинской ГРЭС и Назаровской ТЭС. У этих материалов присутствуют нанопоры нескольких размерных диапазонов. Для всех трех указанных топливных зол характерен пик в области > 10 нм (рисунок 1). Наиболее высоким их содержанием характеризуется топливная зола Троицкой ГРЭС (рисунок 1 а). У указанной топливной золы отмечается высокое содержание пор диаметром примерно 40–65 нм. Далее

отмечается менее высокий пик с более широким размерным диапазоном в области около 95–200 нм. Таким же пиком характеризуются и топливные золы Рефтинской ГРЭС и Назаровской ТЭС (рисунок 1 б, г). Кроме того, эти золы характеризуются одинаковыми пиком в области 65–95 нм. В отличие от двух других зол зола Назаровской ТЭС характеризуется относительно небольшим количеством пор в области > 20 нм, но при этом имеет небольшое количество пор в области 20–30 нм (рисунок 1 г).

Таблица 2 – Физико-механические свойства топливных зол в соответствии с ГОСТ Р 52129–2003

№ п/п	Наименование производителя топливных зол	Содержание частиц, % по массе: – мельче 1,25 мм; – мельче 0,315 мм; – мельче 0,071 мм	Удельная поверхность по данным ПСХ-12(SP), м ² /кг	Пористость, %	Показатель Битумоемкости, г/100 см ³	Влажность, %
1	Троицкая ГРЭС	100; 99,4; 79	492	43	84	0,27
2	Рефтинская ГРЭС	100; 99,4; 76,3	327	36	51	0,15
3	Новотроицкая ТЭЦ	100; 99; 63,3	301	42	75	0,59
4	Назаровская ТЭС	100; 99,9; 94,5	449	47	59	0,40
5	Требования ГОСТ Р 52129–2003 (марка МП-2)	≥ 95; 80–95; ≥ 60	–	≤ 40	≤ 80	≤ 2,5

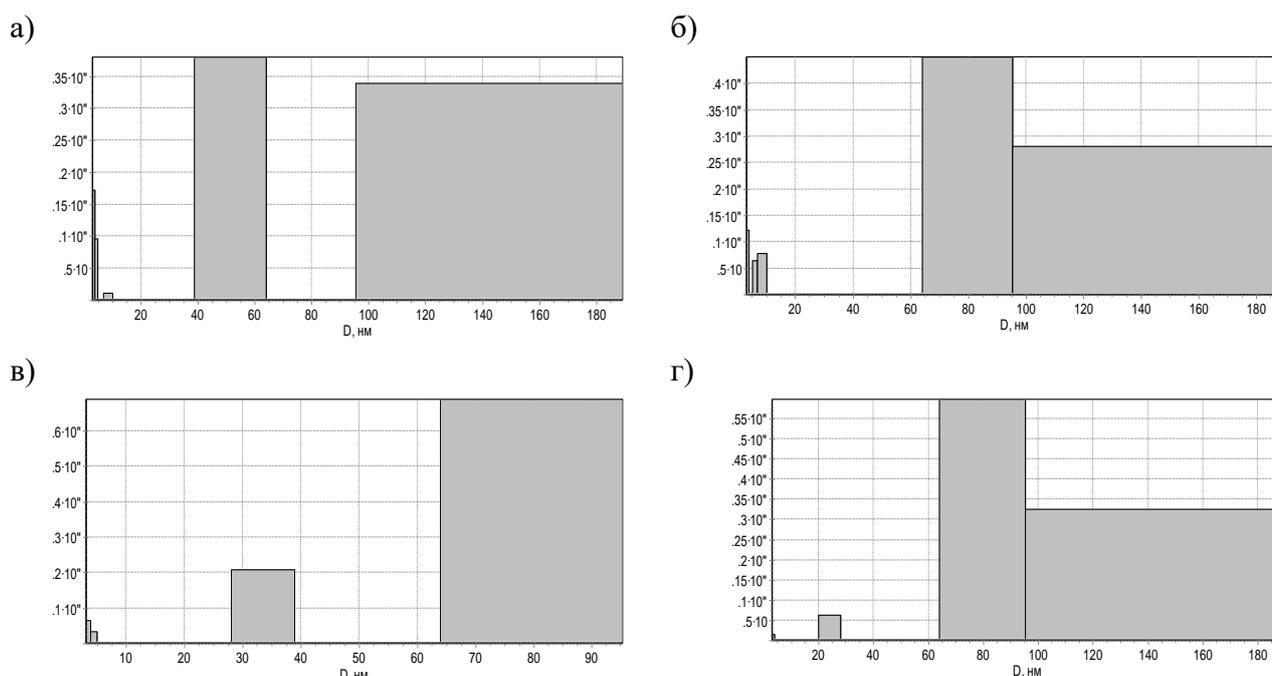


Рисунок 1 – Нанопористость тонкодисперсного алюмосиликатного сырья:
а) Троицкой ГРЭС; б) Рефтинской ГРЭС; в) Новотроицкой ТЭС; г) Назаровской ТЭС

Значительно выделяется по показателю нанопористости среди всех рассматриваемых материалов топливная зола Новотроицкой ТЭЦ. Единственное ее сходство с остальными – это наличие пор диаметром > 10 нм (рисунок 1 в). Небольшой пик отмечается в области около 30–40 нм. Основная часть пор приходится на диапазон 65–95 нм.

Изучение нанопористости минеральных материалов позволяет более подробно оценить взаимодействие минерального материала с пленкой битума и установить потенциальную способность материала к физической адсорбции с компонентами различных фракций. Создавая капиллярный подсос, наружные поры минерального материала будут притягивать битум в большем количестве. Это может привести к преждевременному распаду

эмульсии. Таким образом, при выборе минерального материала для введения в состав битумной эмульсии необходимо выбирать материал с низким показателем нанопористости. При этом чем больше диаметр пор, тем лучше т.к. при введении в состав эмульсии топливная зола выступает в роли разбавителя, а после распада органического вяжущего в составе строительного композита добавка должна оказывать «подшипниковый» эффект. Анализ графиков, характеризующих общую нанопористость техногенного сырья показывает, что топливная зола Рефтинской ГРЭС является наиболее предпочтительной.

Физико-химические свойства являются не менее важным аспектом в установлении возможности и целесообразности применения минеральных материалов в составе битумных эмульсий. В работе был проведен анализ физико-химических свойств, включающих химический (таблица 3) и минерально-фазовый (рисунок 2) составы.

Таблица 3 – Химический состав топливных зол

Наименование производителя топливной золы	Содержание, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	п.п.п.	пр.
Троицкая ГРЭС	62,53	28,75	0,61	4,10	0,21	1,06	1,05	0,29	4,95	1,40
Рефтинская ГРЭС	60,20	30,92	1,28	3,35	0,15	0,58	0,53	0,75	1,90	2,24
Новотроицкая ТЭЦ	56,20	27,70	1,35	6,18	0,10	4,64	1,16	1,18	4,85	1,49
Назаровская ТЭС	31,55	8,84	37,80	8,99	4,40	6,31	0,76	0,20	3,15	1,15

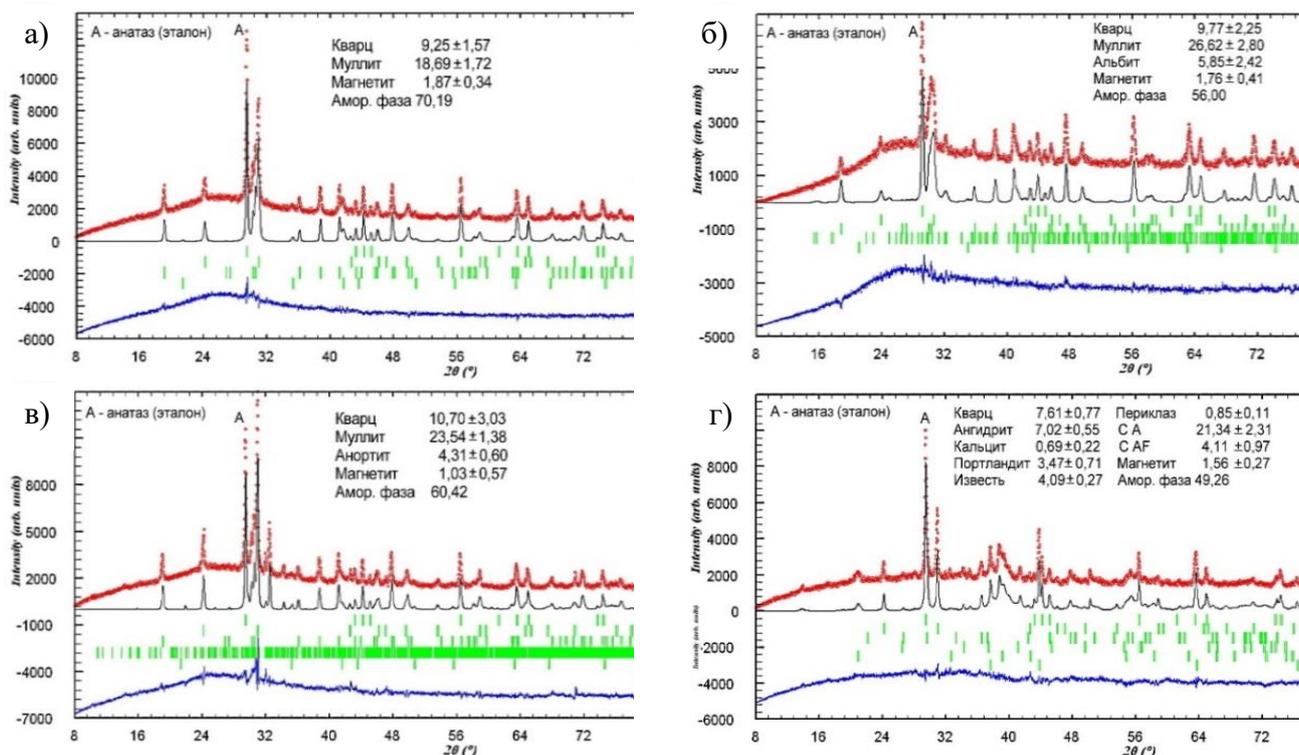


Рисунок 2 – Минерально-фазовый состав топливных зол:

а) Троицкой ГРЭС; б) Рефтинской ГРЭС; в) Новотроицкой ТЭЦ; г) Назаровской ТЭС

Количественный полнопрофильный рентгенофазовый анализ с использованием расчетного метода Ритвельда позволил установить особенности минерально-фазового состава и сопоставить их с химическим. По содержанию оксида кальция (таблица 3) алюмосиликатные топливные золы делятся на 2 типа: низкокальциевые – кислые топливные золы Троицкой и Рефтинской ГРЭС и Новотроицкой ТЭЦ; высококальциевые – основная топливная Назаровской ТЭС. Данные о химическом и минерально-фазовом составе

напрямую взаимосвязаны: суммарное количество оксидов кремния, алюминия, железа и магния коррелирует с количеством аморфной фазы.

Предположительно в качестве добавок разбавителей битумных эмульсий наиболее предпочтительными будут являться максимально аморфизованные техногенные минеральные материалы. Соответственно, кислые топливные золы представляют наибольший интерес. При этом наибольшим количеством аморфной фазы характеризуется зола Троицкой ГРЭС. Использование высококальциевой топливной золы в составе битумной эмульсии попадает под сомнение в связи с высоким содержанием оксида кальция, из-за чего этот материал обладает высокой структурирующей способностью по отношению к битуму.

Таким образом, совокупность рассмотренных выше свойств топливных зол позволила установить, кислые топливные золы являются наиболее перспективным тонкодисперсным техногенным сырьем. Однако наравне с физико-механическими и физико-химическими свойствами решающее значение может иметь строение частиц. В работе изучение строения частиц проводилось с помощью растрового электронного микроскопа (рисунок 3).

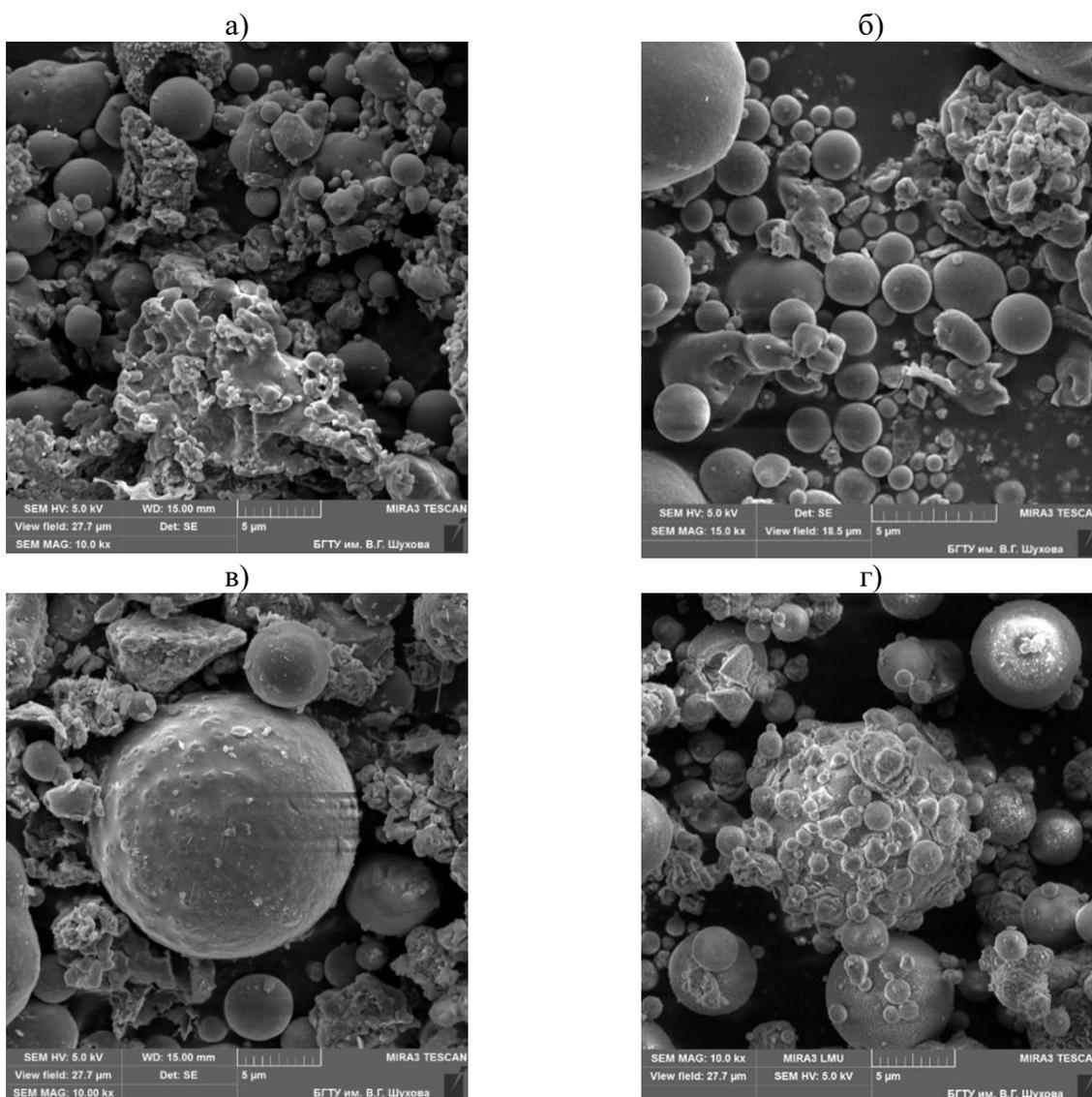


Рисунок 3 – Морфоструктурные особенности топливных зол:
а) Троицкой ГРЭС; б) Рефтинской ГРЭС; в) Новотроицкой ТЭС; г) Назаровской ТЭС

Представленные топливные золы (рисунок 3) имеют полидисперсное распределение частиц, различную форму и природу. Все рассматриваемые материалы характеризуются преимущественным содержанием в общей массе материала частиц, представляющих собой практически правильные сферы. Однако при переходе от одного типа золы к другому в структуре материалов наблюдаются некоторые отличия. Так, например, в составе кислых зол отмечается присутствие оплавленных частиц отличной от идеальной сферической формы. В составе техногенного сырья наблюдается большое количество обломочных частиц, которые, очевидно, являются реликтовыми образованиями исходных каменноугольных пород (рисунок 3). Следует обратить внимание на то, что среди частиц кислой топливной золы Рефтинской ГРЭС (рисунок 3, б) в отличие от двух других практически отсутствуют примеси в виде обломочных частиц, кроме того поверхность частиц выглядит практически идеально гладкой. Поверхность же сферических частиц других материалов, в том числе и основной топливной золы Назаровской ТЭС, имеет шероховатости и поры (рисунок 3 а, в, г).

Присутствие обломочных частиц с высокоразвитой поверхностью, а также наличие шероховатости и пор на поверхности сферических частиц, скорее всего спровоцируют хорошее сцепление частиц минеральных материалов с частицами битума в составе эмульсии, и, очевидно, адсорбируют на своей поверхности большее количество битума. Следовательно, топливная зола Рефтинской ГРЭС потенциально является наиболее эффективным компонентом битумной эмульсии.

4 Заключение

В результате анализа совокупности физико-механических, физико-химических и структурных особенностей установлено, что кислая топливная зола Рефтинской ГРЭС представляет собой наиболее оптимальный вариант добавки-разбавителя на этапе ведения ее в состав эмульсии для сохранения свойств вяжущего до взаимодействия с крупным заполнителем конечного композита. Учитывая строение указанной золы с большой долей вероятности можно предположить, что в результате образования пленки на поверхности щебня в составе цементаасфальтобетона ее присутствие позволит обеспечить «подшипниковый» эффект, т.е. несколько снизит жесткость материала и повысит его способность рассеивать нагрузки от движущегося транспорта, а также снизит хрупкость битумных прослоек при эксплуатации в зимний период.

5 Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента для научных школ НШ-2584.2020.8 с использованием оборудования Центра Высоких Технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измаилова Г.Г., Сивохина Е.С., Елшибаев А.О. К вопросу применения битумной эмульсии в составе ресайклированного слоя // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2018. № 2 (105). С. 182–188.
2. Шахарбаев К.А., Измаилова Г.Г., Сивохина Е.С. Опыт применения шероховатой поверхностной обработки с битумной эмульсией // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2018. № 2 (105). С. 244–251.
3. Vaitkus A., Gražulytė J., Juknevičiūtė-Žilinskienė, L. Andrejevas V. Review of Lithuanian experience in asphalt pavements cold recycling // 10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017. Enviro.2017.153. DOI: 10.3846/enviro.2017.153
4. Iwański, M., Chomicz-Kowalska, A. Application of the foamed bitumen and bitumen emulsion to the road base mixes in the deep cold recycling technology | [Vahtbituumeni ja emulsiooni kasutamine aluse segudes sügaval külmtaastamisel] // Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. Voll. 11(4). Pp. 291-301. DOI: 10.3846/bjrbe.2016.34.
5. Булдаков С.И., Сарафанов К.В. К вопросу применения битумной эмульсии в дорожном хозяйстве // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. 2014. № 5 (64). С. 72–75.

6. Духовный Г.С., Мирошниченко С.И. Исследование свойств асфальтоцементного композита с применением битумной эмульсии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. №5. С. 333 - 336.
7. Колосов А.А., Гридчин А.М., Мартыненко Л.С. Исследование свойств цементоасфальтобетона, применяемого для ремонта асфальтобетонных покрытий, в условиях повышенной влажности // Архитектурно-строительное материаловедение на рубеже веков: Материалы международной интернет-конференции. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. – С.92-94.
8. Балабанов В.Б., Николаенко В.Л. Укатываемый дорожный золасф бетон // Архитектура и строительство России. 2012. №1. С. 19–24.
9. Kukielka J., Bankowski, W. The experimental study of mineral-cement-emulsion mixtures with rubber powder addition // Construction and building materials. 2019. Vol. 226. Pp.759–766. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.276.
10. Mignini C., Cardone F., Graziani A. Experimental study of bitumen emulsion-cement mortars: mechanical behaviour and relation to mixtures // Materials and structures. 2018. Vol. 5. No. 6. 149. DOI: 10.1617/s11527-018-1276-y.
11. Строкова В.В., Маркова И.Ю., Дмитриева Т.В. Исследование вариативности физико-механических свойств техногенного сырья в виде зол-уноса ТЭС различных генотипов с точки зрения использования для модификации битума // Сборник трудов Всероссийского совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии материалов «Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика». Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 224–229.
12. Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В. Влияние зол-уноса на вязкоупругие характеристики дорожного битума // Строительные материалы. 2015. №11. С. 28–31.
13. Strokova V.V., Markova I.Y., Dmitrieva T.V., Shiman A.A. The influence of fly ashes from power plants on rheological properties of bitumen binder // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2016. Vol. 8(2S). P. 1487–1498. doi:http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v8i2s.293.
14. Лебедев М.С., Чулкова И.Л. Исследование реологических свойств битумных композиций, наполненных золами-уноса различного состава // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №11. С. 45–52.
15. Sobolev K., Ismael F., Saha R., Wasiuddin N., Saltibus N. The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous material // Fuel. 2014. Vol. 116. P. 471–477.
16. Sobolev K., Florens I., Bohler J., Faheem A., Application of fly ash in ASHphalt concrete: from Challenges to Opportunities // Covi [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.flyash.info/2013/012-Sobolev-2013.pdf>
17. Лиштван И.И., Ляхевич Г.Д., Ляхевич А.Г., Дударчик В.М., Крайко В.М., Звонник С.А. Экспериментальные исследования и эффективность использования золы бурых углей и горючих сланцев в асфальто-бетонных смесях // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2016. № 3. С. 118–124.

REFERENCES

1. Izmailova G.G., Sivokhina E.S., Yelshibaev A.O. K voprosu primeneniya bitumnoj emul'sii v sostave resajkirovannogo sloya [On the matter of application of bituminous emulsion in content of recycled of layer]. *Vestnik Kazahskoj akademii transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva*. 2018. No 2 (105). Pp. 182–188. (rus)
2. Shakhrarybayev K.A., Izmailova G.G., Sivokhina E.S. Opyt primeneniya sherohovatoj poverhnostnoj obrabotki s bitumnoj emul'siej [Experience for the use of rough surface treatment with bitumen emulsion]. *Vestnik Kazahskoj akademii transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva..* 2018. No 2 (105). Pp. 244–251. (rus)
3. Vaitkus A., Gražulytė J., Juknevičiūtė-Žilinskienė, L. Andrejevas V. Review of Lithuanian experience in asphalt pavements cold recycling. *10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017*. Enviro 2017.153. DOI: 10.3846 / enviro.2017.153
4. Iwański, M., Chomicz-Kowalska, A. Application of the foamed bitumen and bitumen emulsion to the road base mixes in the deep cold recycling technology [Vahtbituumeni ja emulsiooni kasutamine aluse segudes sügaval külmtaastamisel]. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Voll. 11 (4). Pp. 291-301. DOI: 10.3846 / bjrbe.2016.34.
5. Buldakov S.I., Sarafanov K.V. K voprosu primeneniya bitumnoj emul'sii v dorozhnom hozyajstve [The question of bitumen emulsion in road construction]. Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomobil'nyh dorog. Sbornik nauchnyh trudov OAO GIPRODORNII [Actual problems of road design. Collection of scientific papers of OJSC GIPRODORNII]. 2014. No. 5 (64). Pp. 72–75. (rus)
6. Dukhovnyy G.S., Miroshnichenko S.I. Issledovaniye svoystv asfal'totsementnogo kompozita s primeneniym bitumnoj emul'sii [Investigation of the properties of an asphalt-cement composite with the use of bitumen emulsion]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2003. No 5. Pp. 333 - 336. (rus)

7. Kolosov A.A., Gridchin A.M., Martynenko L.S. Issledovaniye svoystv tsementoasfal'tobetona, primenyayemogo dlya remonta asfal'tobetonnykh pokrytiy, v usloviyakh povyshennoy vlazhnosti [Investigation of the properties of cement-asphalt concrete used for the repair of asphalt concrete pavements in conditions of high humidity]. *Arkhitekturno-stroitel'noye materialovedeniye na rubezhe vekov: Proc. Int. Conf.* – Belgorod: Izd-vo BelGTASM, 2002. – Pp.92-94. (rus)
8. Balabanov V.B., Nikolaenko V.L. Ukatyvaemyj dorozhnyj zolasf beton [Rolled road ash concrete]. *Arhitektura i stroitel'stvo Rossii*. 2012. No 1. Pp. 19-24. (rus)
9. Kukielka J., Bankowski, W. The experimental study of mineral-cement-emulsion mixtures with rubber powder addition. *Construction and building materials*. 2019. Vol. 226. Pp. 759-766. DOI: 10.1016 / j.conbuildmat.2019.07.276.
10. Mignini C., Cardone F., Graziani A. Experimental study of bitumen emulsion-cement mortars: mechanical behavior and relation to mixtures. *Materials and structures*. 2018. Vol. 5. No. 6. 149. DOI: 10.1617 / s11527-018-1276-y.
11. Strokova V.V., Markova I.Yu., Dmitrieva T.V. Issledovanie variativnosti fiziko-mekhanicheskikh svoystv tekhnogenogo syr'ya v vide zol-unosa TES razlichnykh genotipov s točki zreniya ispol'zovaniya dlya modifikatsii bituma [Investigation of the variability of the physico-mechanical properties of technogenic raw materials in the form of fly ashes of heat and power stations of various genotypes from the point of view of application for bitumen modification]. *Sbornik trudov Vserossijskogo soveshchaniya zaveduyushchih kafedrami materialovedeniya i tekhnologii materialov «Mezhdisciplinarnye podhody v materialovedenii i tekhnologii. Teoriya i praktika»* [Proceedings of the All-Russian meeting of the heads of the departments of materials science and materials technology "Interdisciplinary approaches in materials science and technology. Theory and practice"]. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2015. Pp. 224–229. (rus)
12. Markova I.Yu., Strokova V.V., Dmitrieva T.V. Vliyanie zol-unosa na vyazkouprugie harakteristiki dorozhnogo bituma [The influence of fly ash on the viscoelastic characteristics of road bitumen]. *Stroitel'nye Materialy*. 2015. No.11. Pp. 28–31. (rus)
13. Strokova V.V., Markova I.Y., Dmitrieva T.V., Shiman A.A. The influence of fly ashes from power plants on rheological properties of bitumen binder. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2016. Vol. 8 (2S). P. 1487–1498. doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v8i2s.293>.
14. Lebedev M.S., Chulkova I.L. Issledovanie reologicheskikh svoystv bitumnykh kompozitsiy, napolnennykh zolami-unosa razlichnogo sostava [Study of rheological characteristics of bitumen composites filled with different fly ashes]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnolo-gicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2016. No. 11. Pp. 45-52. (rus)
15. Sobolev K., Ismael F., Saha R., Wasiuddin N., Saltibus N. The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous material. *Fuel*. 2014. Vol. 116. Pp. 471-477.
16. Sobolev K., Florens I., Bohler J., Faheem A., Application of fly ash in ASHphalt concrete: from Challenges to Opportunities. *Covi* [Electronic resource]. Access mode: <http://www.flyash.info/2013/012-Sobolev-2013.pdf>
17. Lishtvan I.I., Lyakhevich G.D., Lyakhevich A.G., Dudarchik V.M., Kraiko V.M., Zvonnik S.A. Eksperimental'nye issledovaniya i effektivnost' ispol'zovaniya zoly buryh uglej i goryuchih slancev v asfal'to-betonnykh smesyah [Experimental research and efficiency of use brown coal ash and oil shale in asphalt mixes] *Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Serie]. 2016. No. 3. Pp. 118–124. (rus)

Информация об авторах

Марков Андрей Юрьевич

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия, аспирант кафедры материаловедения и технологий материалов.

E-mail: markovandrey11@gmail.com

Строкова Валерия Валерьевна

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия, доктор технических наук, профессор.

E-mail: vvstrokova@gmail.com

Безродных Андрей Александрович

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия, аспирант кафедры материаловедения и технологий материалов.

E-mail: andron93@list.ru

Степаненко Маргарита Андреевна

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия, магистрант кафедры материаловедения и технологий материалов.

E-mail: stepanencko.rita2017@yandex.ru

Information about the authors

Markov, Andrew Y.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, postgraduate student.

E-mail: markovandrey11@gmail.com

Strokova, Valeria V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov., Belgorod, Russia, dsc, Professor.

E-mail: vvstrokova@gmail.com

Bezrodnykh, Andrew A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, postgraduate student.

E-mail: andron93@list.ru

Stepanenko, Margarita A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, bachelor student.

E-mail: stepanencko.rita2017@yandex.ru