

УДК 625.7/.8:658.567.1

**АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ
ЗОЛЫ УНОСА И ПОТЕНЦИАЛ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
С УЧЕТОМ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА**

Канд. техн. наук **С.В. Полякова**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»)

Конт. информация: polyakovasv@rosdornii.ru

Зола уноса (ЗУ) в отечественной практике отнесена к золошлаковым отходам производства, образующимся при сжигании угля на тепловых электростанциях (ТЭС). Ее ненадлежащая утилизация является проблемой для окружающей среды и ведет к растрате возобновляемых ресурсов.

В отличие от отечественной практики в зарубежной практике золу уноса (летучую золу, FA)¹ относят к побочному продукту промышленности, характеризующемуся стабильными свойствами, что значительно упрощает его практическое использование. Кроме того, данный продукт должен соответствовать действующим техническим нормам, требованиям радиационно-гигиенической и санитарно-эпидемиологической безопасности.

Применение ЗУ, как отхода производства сложной гетерогенной структуры, в широком промышленном масштабе дорожного хозяйства сдерживается рядом факторов, в том числе, связанных с недостаточно изученными особенностями ее микроструктуры и механизма структурообразования материалов с ее использованием.

В статье уделяется внимание описанию микроструктуры ЗУ, ее физико-химическим свойствам, особенностям и недостаткам применения, ее возможным технологическим преимуществам и др.

Ключевые слова: золошлаковые отходы производства, побочный продукт промышленности, зола уноса, угольная летучая зола, ценосферы, асфальтобетонные смеси, физико-механические свойства, удобоукладываемость.

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике комплексный подход к переработке и применению золошлаков, в том числе и к золе уноса (ЗУ), образующейся при сжигании твердого топлива на

¹ FA (англ. Fly Ash) – принятая терминология в зарубежных источниках.

угольных теплоэлектростанциях (ТЭС), имеет существенные различия [1].

Общая концепция производственного процесса образования золы уноса при сжигании твердого топлива на ТЭС приведена на **рис. 1**.



Рис. 1. Основные этапы производства ЗУ

В нормативных документах и практических рекомендациях золу уноса принято делить на два класса в зависимости от проявления гидравлических и пуццолановых свойств. При проявлении гидравлических свойств золу относят к основным (высококальциевым, класс С), а при проявлении пуццолановых свойств – к кислым (низкокальциевым, класс F). Часто деление зол на основные и кислые связывают с содержанием в их составе СаО, в том числе в свободном виде [2]². *Кислые золы*, как правило, представлены плотными или полыми сферическими частицами или агломератами таких частиц. На микрофотоснимках данные частицы могут выглядеть как полая сфера, наполненная более мелкими частицами. *Основные золы* обычно состоят из смеси сферических и бесформенных кристаллических частиц³.

На территории Российской Федерации ЗУ отнесена к *золошлаковым отходам производства (ЗШО)*. В соответствии с национальным стандартом ГОСТ Р 57789-2017 [3] ЗУ (зола сухого удаления) представляет собой «тонкодисперсный материал с размером частиц менее 0,315 мм (основную фракцию составляют частицы с размером 0,08 мм), образующийся из минеральной части твердого топлива, сжи-

² Путилин Е.И. Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС / Е.И. Путилин. – М., 2003. – 60 с.

³ Энтин З.Б. Зола ТЭС – сырье для цемента и бетона / З.Б. Энтин, Л.С. Нефедова, Н. Стржалковская // Цемент и его применение. – 2012. – № 2. – С. 40-46.

гаемого в пылевидном состоянии, и улавливаемый золоулавливающими устройствами из дымовых газов тепловых электростанций». Межгосударственный стандарт ГОСТ 25818-2017 [4], включающий технические требования для бетонов с использованием ЗУ, дает более широкое определение ЗУ, а именно: «мелкая, состоящая преимущественно из шарообразных стекловидных частиц пыль, образующаяся при сгорании мелко смолотого угля и обладающая пуццолановыми свойствами и/или гидравлической активностью». Рекомендации по применению ЗУ в дорожном хозяйстве изложены в отраслевом методическом документе ОДМ 218.2.031-2013 [5].

В мировой зарубежной практике летучая зола (ФА), ранее считавшаяся золошлаковым отходом производства, в настоящее время отнесена к *побочному продукту* сжигания угля (англ. Coal Combustion Products, CCPs) [6]. Переводу золы уноса из отхода производства в побочный продукт предшествовали работы, связанные с углубленным изучением неоднородности химического и минералогического составов различных по происхождению ФА, размеров ее фракций, а также с промышленным внедрением, разработкой и введением в действие стандартов, регламентирующих применение летучей золы как побочного продукта сжигания угля при производстве строительных материалов⁴.

На практике ФА широко используется при производстве традиционных материалов в транспортном строительстве. Применение ФА в производственном процессе основано на строгом контроле ее физико-химических свойств, а также анализе результатов внедрения технологий в соответствии с областью ее применения.

Так, по данным Американской ассоциации угольной золы (АСАА), в 2020 г., было переработано 59 % ФА от общего количества произведенных золошлаков [7]. На диаграмме (рис. 2) приведены обобщающие данные США по уровню производства и использования ФА за двадцатилетний период. Из данных диаграммы следует, что уровень производства ФА к 2020 г. значительно снизился, а процент ее использования увеличился и составил более 60 %.

На диаграмме (рис. 3) приведены обобщающие данные по мировому производству и потреблению ФА за период 2019 г.

⁴ Хицнар Я., Щигельски Т. Утилизация побочных продуктов сжигания угля в Польше // Материалы II научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 23–24 апреля 2009 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 37 – 40. – URL: <http://osi.ecopower.ru/ru/Documents/attachments/378rus.pdf> (дата обращения: 05.09.2023).

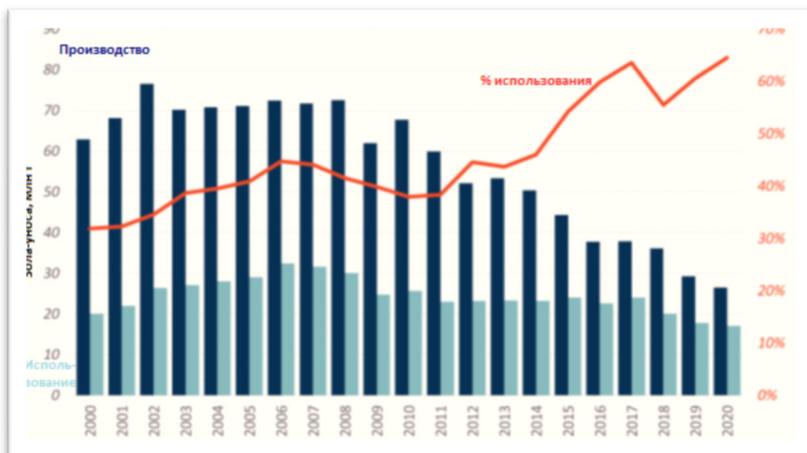


Рис. 2. Уровень производства и использования летучей золы (США)

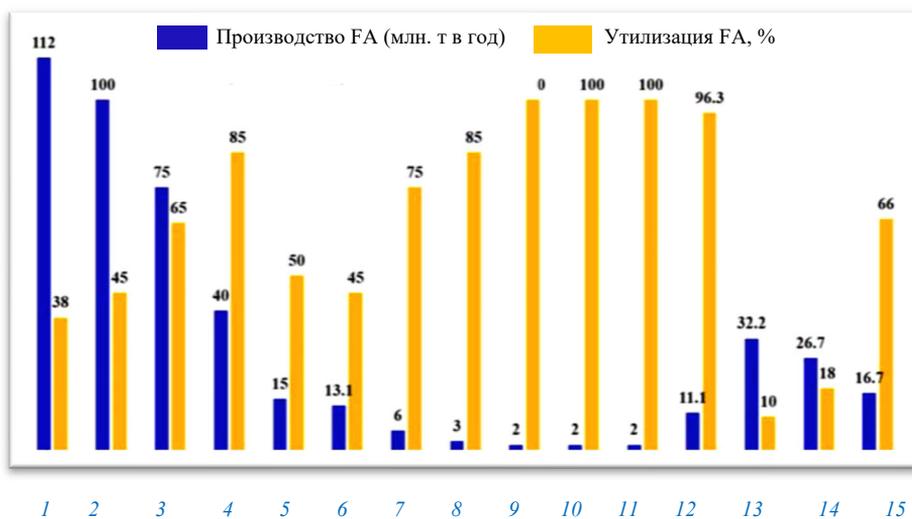


Рис. 3. Мировое производство и потребление ФА в 2019 г.⁵:

1 – Индия; 2 – Китай; 3 – США; 4 – Германия; 5 – Великобритания;
 6 – Австралия; 7 – Канада; 8 – Франция; 9 – Дания; 10 – Италия;
 11 – Нидерланды; 12 – Япония; 13 – Ближний Восток и Африка;
 14 – Российская Федерация; 15 – Другие страны Азии

В Индии, по данным за 2019 г. (рис. 3), было произведено 112 млн т зол ФА и из них утилизировано 38 %. При этом уже за период

⁵ Gollakota A.R.K., Volli V., Shu C.-M., 2019. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: a review. Sci. Total. Environ. 672 (2019), P. 951-989.

2022 г. утилизировалось около 67 % ФА (рис. 4), а максимальная доля использования производимой ФА приходилась на производство цемента – 25,6 %, для устройства нижних слоев основания применялось 10,48 % ЗУ, что существенно превысило долю ее утилизации в 2019 г.

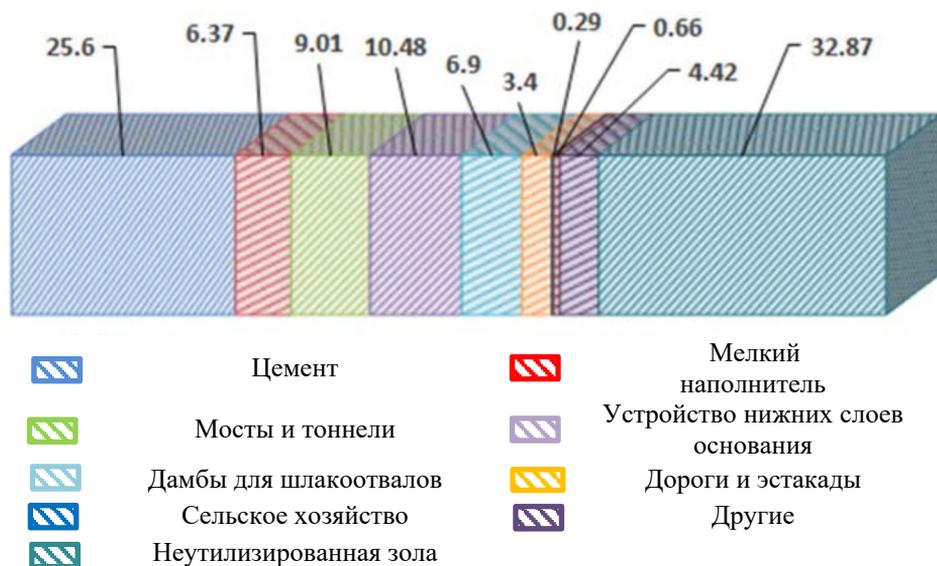


Рис. 4. Использование ФА в различных областях применения, % (Индия, 2022 г.) [8]

Следует отметить, что потенциал использования ФА чрезвычайно широк, а экологические преимущества – значительны. Кроме того, применение ФА позволяет сохранять природные ресурсы, поскольку снижается потребность в них. Однако процесс производства ФА, как готового к использованию материала с заданными характеристиками, требует значительных затрат.

В зарубежной практике, с целью получения продукта с заданными характеристиками, реализуется сложный производственный процесс сухого удаления ФА путем сбора ее тонкодисперсных частиц с помощью электрофильтров при сжигании угля. Процесс сухого отбора ФА требует дополнительного оснащения производства дорогостоящим оборудованием, а также системами складирования, обеспыливания, сортировки, упаковки и др. В табл. 1 приведены основные этапы технологического процесса ФА, включающего в себя ряд основных узлов производства получения ФА как готового к применению продукта (материала).

Таблица 1

Основные узлы производства ФА при сухом улавливании

<i>Система производства ФА</i>	<i>Общий вид системы</i>
<i>Сортировка по классам и хранение в силосах (бункерах)</i>	
<i>Система подачи (пневматический конвейер, ковшовый элеватор и др.)</i>	
<i>Пылеулавливание</i>	
<i>Аэрация бункера</i>	
<i>Выгрузка (разгрузка силоса) и загрузка в грузовой транспорт</i>	
<i>Расфасовка в мешки и др.</i>	

ФА, уловленная электрофильтрами, находится в сухом состоянии, с содержанием влаги не более 3 %, и транспортируется через систему золоудаления либо в силос для временного хранения, либо в эдуктор воды для смачивания с последующим сливом в золоотстойник. ФА, накопленная в силосе, выгружается для дальнейшего использования через специализированное оборудование либо в сухом состоянии в пневматический или бестарный транспорт (автомобильный или железнодорожный), либо увлажняется водой для захоронения и утилизации или полезного повторного использования.

Нельзя забывать, что высокая дисперсность золы уноса способствует длительному нахождению ее в воздухе производственных помещений и может вызывать раздражение слизистых оболочек глаз, верхних дыхательных путей и желудочно-кишечного тракта. Поэтому при работе с золой уноса используются индивидуальные средства защиты, а при погрузке, выгрузке и транспортировке следует обеспечивать меры, предотвращающие пыление (увлажнение, нанесение пленкообразующих материалов и др.).

Характеристики золы уноса зависят от вида применяемого угля и технологических режимов производства ТЭС. Обычно химический состав золы уноса состоит из различных реакционноспособных оксидов (диоксид кремния (кварц) SiO_2 , оксид кальция CaO , оксид алюминия Al_2O_3), содержит оксид железа (гематит) Fe_2O_3 и другие соединения, имеет аморфную кристаллическую структуру. Большая часть аморфной фазы в зольных частицах представлена *микросферами*, формирование которых осуществлялось в воздушном пространстве топочной камеры и газопылевого тракта⁶.

Некоторые виды золы уноса могут проявлять пуццолановые свойства⁷ и гидравлическую активность в присутствии влаги, что позволяет применять их при производстве бетонных смесей, в том числе в качестве сырья для производства цемента. Однако не вся зола уноса пригодна для использования в качестве цемента, поскольку ее химический состав прежде всего зависит от источника угля. Так, зола уноса, полученная из каменного угля, имеет высокое содержание глинозема и кремнезема, что способствует более высокой степени стабилизации, в

⁶ Бариева Э.Р., Королев Э.А., Серазеева Е.В. Состав и строение золы уноса – ТЭЦ. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostav-i-stroenie-zoly-unosa-tets/viewer> (дата обращения: 05.09.2023).

⁷ Данные Австралийской ассоциации развития золошлаковой индустрии (Ash Development Association of Australia, ADAA). – 2013. – ADAA: сайт. – URL: <https://www.adaa.asn.au/> (дата обращения: 05.09.2023).

то время как зола, полученная из бурого угля, содержит большое количество сульфатов кальция, магния и хлоридов, что делает ее непригодной для использования при производстве цемента.

В ряде рекомендаций по применению ФА предлагается ее использовать в сочетании с портландцементом и/или известью для получения комбинированного цементного вяжущего материала или цемента для бетона. Для достижения максимальной прочности рекомендуется объединять ФА с известью в соотношении 1:2, при этом более точный состав варьируется в зависимости от химического состава ФА. В ряде случаев для достижения максимальной прочности целесообразно устанавливать содержание ФА в смеси с известью не более 5 % от объема замещаемого цементирующего материала [9].

Более половины бетона, производимого в США, включает в оптимальном количестве ФА взамен традиционного цемента. Объекты (массивные стены, балки, плотины, фундамент), построенные с использованием высокоэффективных бетонных смесей на основе ФА, характеризуются повышенной прочностью и долговечностью⁸.

Использование зол уноса в области производства бетона регламентируется рядом стандартов, в том числе действующих в отечественном производстве:

- межгосударственным стандартом ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия»;
- европейским стандартом EN CEN 450-1:2012 «Fly ash for concrete – Part 1: Definition, specifications and conformity criteria»;
- стандартом Австралии и Новой Зеландии AS/NZS 3582.1:2016 «Supplementary cementitious materials – Part 1: Fly ash»;
- международным стандартом ASTM C618-2023 «Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete» и др.

Так, в соответствии со стандартом ASTM C618-22⁹ ФА считается важным побочным продуктом промышленности, характеризующимся

⁸ About Coal Ash. What Are Coal Combustion Products? – URL: <https://aca-usa.org/about-coal-ash/what-are-ccps/> (дата обращения 05.07.2023).

⁹ ASTM C618-22. Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (Стандартные технические условия на угольную золу и сырой или кальцинированный природный пуццолан для использования в бетоне). – Normdocs: каталог стандартов: сайт. – URL: <https://catalogue.normdocs.ru/?type=card&cid=com.normdocs.astm.card.c618-22>.

стабильными свойствами и соответствующим действующим техническим нормам, требованиям радиационно-гигиенической и санитарно-эпидемиологической безопасности. FA должна сопровождаться техническим паспортом, быть доступна потребителям и иметь стабильное присутствие на рынке. Каждый вид побочных продуктов сжигания угля ССРPs, в том числе FA, подлежит обязательной сертификации, документальному подтверждению качества в соответствии с установленными нормами.

Особенности микроструктуры FA

FA представляет собой сложный *гетерогенный материал*, содержащий мелкие и аморфные частицы в подавляющем большинстве представленные микросферами, и обладает рядом полезных свойств (пуццолановый эффект, тонина, сферическая форма, легкость и др.), что способствует расширению ее возможностей и делает пригодной для использования в различных областях.

Следует отметить, что несмотря на широкое использование FA в настоящее время зарубежные исследователи уделяют пристальное внимание изучению взаимодействия гетерогенных микроструктур FA, понимание механизма и принципа работы которого позволит подобрать принципиально новый технологический подход к производству материалов, используемых в различных областях промышленности.

На **рис. 5** приведены SEM-изображения, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ; англ. scanning electron microscope, SEM) высокого разрешения, с разной кратностью увеличения различных видов FA.

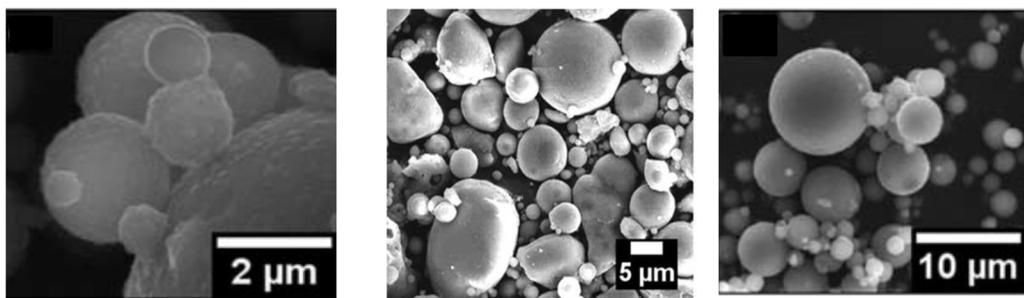


Рис. 5. SEM-изображения FA

Различают несколько основных типов микроструктур FA:

- *микросферы (microspheres)* – пустотелые стекловидные сферы, полости которых заполнены газом. Частицы имеют диаметр около 5 мкм и меньше. Хотя они могут содержать пузырьки газа, и в этом случае их можно рассматривать как ценосферы, но обычно микросферы имеют твердую форму;
- *ценосферы (cenospheres)* – легкие, инертные, полые, в основном тонкостенные стеклянные сферы (10-350 мкм), состоящие в основном из кремнезема и глинозема и заполненные воздухом и/или газами. Ценосферы – часть летучей золы, которую ранее называли «плавающей фракцией» FA, так как она находится на поверхности отстойников и собирается для полезного использования. Ценосферы, собранные с поверхности золоотстойников, обрабатываются (путем сушки, сортировки и др.) и используются как ценный продукт для повышения эффективности применения ряда продуктов (краска, покрытия, клей и др.). Кроме того, ценосферы извлекают и из сухой FA, при этом применяются запатентованные технические решения;
- *плеросферы (plerospheres)* – полости, которые заполнены микросферами, мелкими минеральными частицами, пеной или другими пористыми структурами, которые формируются из аморфного стеклообразного вещества, содержащего 50-65 % аморфного SiO₂, 20-30 % Al₂O₃, 1-8 % Fe₂O₃, а также примеси Ca, Mg, фосфатов, хлоридов, сульфатов и др. [10, 11].

На **рис. 6** приведено SEM-изображение, свидетельствующее, что FA состоит из сферических твердых частиц *ценосферного* и *плеросферного* типов соответственно.

Полые ценосферы и частицы несгоревшего углерода неправильной формы характеризуются наибольшими размерами.

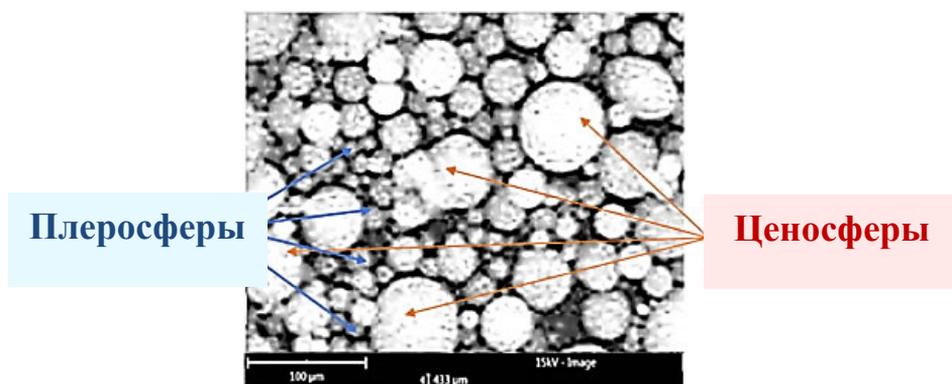


Рис. 6. Изображение SEM для FA

Конкретный вид ценосфер (состав и микроструктура) зависит от состава угля, условий сжигания в камере сгорания печи и в первую очередь от температуры сжигания угля. Самые легкие фракции алюмосиликатных ценосфер, как правило, имеют очень низкую насыпную плотность ($0,3-0,5 \text{ г/см}^3$), поэтому накапливаются на поверхности в золошлаковых отстойниках^{10,11}. Необходимо отметить, что механизм образования ценосфер является хаотичным и неуправляемым, а концентрация микросфер в нем не превышает $5 \div 8 \%$.

В ряде исследований описан процесс образования плеросфер. Предполагается, что плеросфера образуется при горении за счет захвата микросфер полый ценосферой, играющей роль контейнера (рис. 7)¹².

¹⁰ Зырянов В.В. Зола уноса. Техногенное сырье / В.В. Зырянов, Д.В. Зырянов. – М.: Маска, 2009. – 320 с.

¹¹ Drozhzhin V.S. Technical monitoring of microspheres from fly ashes of electric power stations / V.S. Drozhzhin, I.V. Piculin, M.D. Kuvaev // World of Coal Ash Conference. – 2005. – P. 113-114.

¹² F. Goodarzi, H. Sanei. Plerosphere and its role in reduction of emitted fine fly ash particles from pulverized coal-fired power plants. Elsevier. Fuel 88 (2009) 382–386.

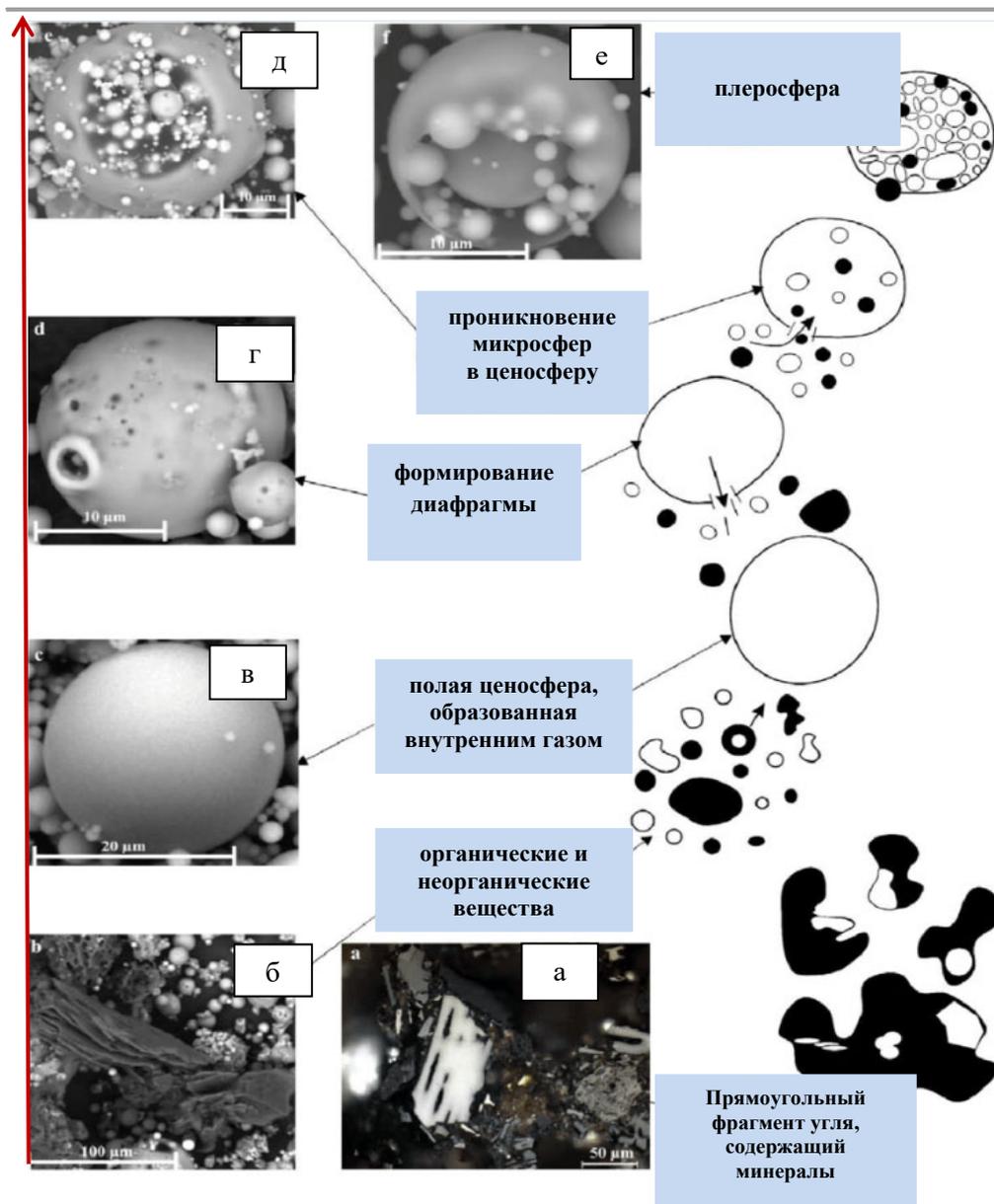


Рис. 7. Механизм образования плеросфер:
а – сырьевой уголь; б-е – летучая зола (FA)
(SEM-изображения)

Ценосферы обладают уникальными особенностями, позволяющими использовать их в современных технологиях. Установлено, что ценосферы характеризуются низкой теплопроводностью [0,1-0,2 Вт/(м·К)], высоким пределом прочности при сжатии (20-35 МПа), термической стабильностью (спекание обычно проходит в интервале 1000-1450 °С), устойчивостью к воздействию кислот, агрессивных веществ и т.д.^{13,14}. Ценосферы могут использоваться в производстве керамической композитной пены, в качестве материала огнеупорного покрытия¹⁵. Благодаря особенностям структуры и свойствам алюмосиликатных ценосфер FA открываются широкие возможности ее применения в высокотемпературных керамических и композитных материалах, а также жаростойких бетонах¹⁶. Алюмосиликатные полые ценосферы FA с размером частиц 80-100 мкм нашли применение при производстве термопластичных составов дорожной разметки, используемых на автомобильных дорогах и аэродромах с асфальтобетонным покрытием.

Следует отметить, что в настоящее время влияние микроструктуры золы уноса различных ТЭС на свойства материалов недостаточно изучено.

В настоящее время мировым сообществом ведутся обширные исследования в области изучения характерных свойств и особенностей микроструктуры FA, рассматриваются ее потенциальные возможности применения в различных областях. Особое внимание уделяется изучению формы и размеров частиц FA. Исследования крупности и формы частиц золы уноса проводятся с использованием SEM.

В рамках сравнительного подхода исследовались крупность и форма частиц минерального порошка, портландцемента и FA.

В табл. 2 приведены сравнительные данные (общий вид, SEM-микрофотографии, средний размер частиц) образцов

¹³ Саградян А.А. Изучение фазового состава новообразований в системе золыные микросферы – цементная матрица / А.А. Саградян, Г.А. Зимакова // Вестник Тюменского государственного университета. – 2012. – № 5. – С. 102-106.

¹⁴ Fenelonov V.B. The properties of cenospheres and the mechanism of their formation during high temperature coal combustion at thermal power plants / V.B. Fenelonov, M.S. Mel'gunov, V.N. Parmon // KONA Powder and Particle Journal. – 2010. – Vol. 28. – P. 189-208.

¹⁵ Пундиене И., Пранцкевичене И., Клигис М., Кайрите А., Гирскас Г. Влияние добавки ценосфер на свойства жаростойкого легковесного бетона. Новые огнеупоры. 2018;(9):52-57. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-9-52-57>.

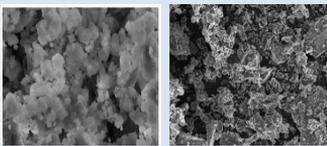
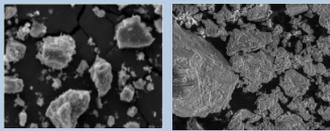
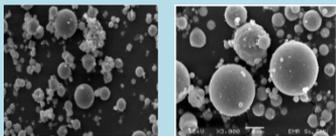
¹⁶ Yao Z.T. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / Z.T. Yao, X.S. Ji, P.K. Sarker, J.H. Tang, L.Q. Ge, M.S. Xia, Y.Q. Xi // Earth-Science Reviews. – 2015. – February. – Vol. 141. – PP. 105-121. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825214002219> (дата обращения: 14.09.2023 г.).

наполнителей, используемых, в том числе в качестве минерального порошка для асфальтобетонных смесей, а именно:

- стандартного доломитового минерального порошка;
- портландцемента;
- золы уноса.

Таблица 2

Сравнительные данные изучения наполнителей

Наполнитель	Внешний вид	SEM-изображение	Средний размер частиц наполнителя, мкм
Минеральный порошок			18 – 35
Портланд-цемент			2 – 11
Зола уноса			19

Следует отметить, что по крупности частицы золы уноса наиболее близки к размеру частиц минерального порошка и цемента, что допускает ее применение при производстве асфальтобетонных смесей.

SEM-изображение подтверждает наличие в минеральном порошке и портландцементе агломерированных частиц довольно *неправильной формы* с относительно плотной структурой [12-14]^{17,18,19}. Частицы зол

¹⁷Yao Z.T. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / Z.T. Yao, X.S. Ji, P.K. Sarker, J.H. Tang, L.Q. Ge, M.S. Xia, Y.Q. Xi // Earth-Science Reviews. – 2015. – February. – Vol. 141. – PP. 105-121. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825214002219> (дата обращения: 14.09.2023 г.).

¹⁸https://www.researchgate.net/publication/337441212_Effect_of_limestone_powder_substitution_on_mechanical_properties_and_durability_of_slender_precast_components_of_structural_mortar.

уноса могут состоять не только из смеси сферических, но и включать бесформенные кристаллические частицы [15].

Зола уноса и минеральный порошок достаточно близки по крупности частиц гранулометрического состава, при этом их качественный химический состав существенно отличается²⁰. В табл. 3 приведен сравнительный химический анализ известнякового минерального порошка, портландцемента^{21, 22} и золы уноса.

Таблица 3

Сравнительный химический анализ наполнителей

Тип наполнителя	Химический состав, %					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Известняковый порошок	68,3	2,23	-	0,32	-	1,20
Портландцемент	63-66	21-24	4-8	0,5-5	2-4	0,3-1
<i>Зола уноса</i>						
Низкокальцевая ЗУ (РФ)	0,88	61,9	28,82	0,34	2,67	<0,7
Высококальцевая ЗУ (РФ)	37,80	31,55	8,84	6,31	8,99	4,40
Низкокальцевая FA (США)	3,36	47,83	28,7	1,04	13,16	1,42
Высококальцевая FA (США)	26,63	30,03	20,68	7,60	4,67	2,01

¹⁹ Bualuang T. Influence of Asphalt Emulsion Inclusion on Fly Ash / Hydrated Lime Alkali-Activated Material / T. Bualuang, P. Jitsangiam, T. Suwan, U. Rattanasak, W. Tangchirapat, S. Thongmunee. – 2021. – Vol. 14. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/22/7017> (дата обращения: 14.09.2023 г.).

²⁰ Маркова И.Ю. Золобитумные вяжущие для асфальтобетонных смесей: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Маркова Ирина Юрьевна / URL: http://dissovnet.pguas.ru/files/212-184-01/Markova/Dissertaciya_Markova.pdf (дата обращения: 14.09.2023 г.).

²¹ Из чего делают цемент: его состав и свойства / URL: <https://udarnik.spb.ru/articles/vse-o-cemente/sostav/> (дата обращения: 14.09.2023 г.).

²² Состав портландцемента / URL: <https://helpiks.org/3-87472.html> (дата обращения: 14.09.2023 г.).

Таким образом, отмечаются существенные различия указанных наполнителей по форме и химическому составу. При сравнении SEM-изображений различных наполнителей зола уноса отличается *сферической формой* частиц от традиционного минерального порошка и портландцемента, что подтверждает потенциальное технологическое преимущество в части повышения пластичности и удобоукладываемости смесей с ее использованием. Кроме того, золы уноса отличаются значительно меньшим удельным весом и большей площадью поверхности.

Ниже рассмотрены преимущества использования *ФА в составе бетонных и асфальтобетонных смесей (зарубежная практика)*:

- ***при производстве бетонных смесей***

ФА нашла наиболее широкое применение в производстве бетонных смесей и строительных растворов. В ряде исследований указывается, что основным преимуществом применения ФА при производстве бетонных смесей является *снижение ее себестоимости при улучшении качества конечного продукта*^{23, 24}. При этом к химическому составу и физическим свойствам ФА предъявляются жесткие технические требования²⁵ по крупности, показателю активности, водопотреблению и др.

Присутствие в составе ФА мелких сферических частиц, которые действуют по подобию «подшипников», позволяет частицам заполнителя легче скользить друг относительно друга, что в свою очередь приводит к уменьшению водопотребности бетонных растворов, повышает однородность бетонных смесей, увеличивает их пластичность и *удобоукладываемость*²⁶. Наличие сферических частиц ФА в бетонной смеси способствует:

- улучшению технологичности (работоспособности). Бетонную смесь укладывают с меньшими усилиями, смесь лучше реагирует на вибрацию при уплотнении и более плотно заполняет формы;
- упрощению процесса прокачивания смеси по трубопроводу (снижение затрат на электроэнергию; увеличение дальности перекачки);

²³ Concrete Producers / URL: <https://proash.com/concrete-producers> (дата обращения: 14.09.2023 г.).

²⁴ Jozic D. The effect of fly ash on cement hydration in aqueous suspensions / D. Jozic, J. Zelic // Ceram. Silik. – 2006. – Vol. 50, № 2. – P. 98-105.

²⁵ ASTM C 618-23. Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

²⁶ Зола уноса и ее уникальные свойства / URL: <https://www.keramzit-aleksin.ru/articles/zola-unosa-i-ee-unikalnye-svoystva/> (дата обращения: 14.09.2023 г.).

- повышению когезии в бетонной смеси;
- снижению сегрегации.

К одной из особенностей применения ФА в составе цемента относят *устойчивость к агрессивным средам*. Например, цемент, в который добавлено 20 % ФА, становится более стойким при погружении в агрессивную морскую либо техническую воду. Кроме того, при замещении 20-30 % цемента ФА в составе бетона (в Чехии и Польше – до 70 %) обеспечивается снижение расхода цемента в бетонной смеси и ее себестоимость при улучшении таких свойств, как прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, кислото- и сульфатостойкость. Установлено, что сферическая форма ФА способствует снижению водопотребности, теплоты гидратации и увеличивает прочность бетона [16, 17].

- ***при производстве асфальтобетонных смесей***

Анализ научных зарубежных литературных источников подтверждает, что в отличие от традиционного минерального порошка и портландцемента независимо от технологии сжигания, частицы ФА имеют преимущественно сферическую форму. В связи с этим потенциальные возможности использования ФА в асфальтобетонных смесях достаточно перспективны при выборе определенных технологических режимов, оптимальных составов и используемых материалов:

- ФА при наличии в своем составе сферических частиц рассматривается как «расширитель» объема асфальтового вяжущего, что в свою очередь позволяет снизить количество битумного вяжущего в асфальтобетонной смеси;
- ФА улучшает обрабатываемость (удобоукладываемость) асфальтобетонной смеси и облегчает ее уплотнение на месте укладки до заданной плотности;
- ФА позволяет снизить температуру приготовления и уплотнения асфальтобетонной смеси и др.

Исследования Кабрера Ж.Г. и Зоороба С.Ф. (1994)²⁷ и др.²⁸ показали, что горячая асфальтобетонная смесь с ФА может быть перемешана и уплотнена при пониженных температурах 110 °С и 85 °С соответственно, что позволяет обеспечивать значительную экономию энергии.

²⁷ Cabrera J.G., Zoorob S.F. 1994. Design of low energy hot rolled asphalt. In Proceedings of the 1st European Symposium. University of Leeds, Leeds, UK. – PP. 289-308.

²⁸ Effect of Coal Combustion Products on High Temperature Performance of Asphalt Mastics. Emil G. Bautista, Justin Flickinger, Rajan Saha, Ismael Flores-Vivian, Ahmed F. Faheem, Konstantin Sobolev. Fuel 2014. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.07.123.

Заслуживает внимание перспектива улучшения свойств асфальтобетонной смеси путем *модификации (введение небольшого количества FA в состав минеральной части асфальтобетонной смеси) ее структуры с использованием FA*. Термин «модификация» следует понимать как видоизменение, преобразование чего-либо, не затрагивающее его сущности, но характеризующееся появлением новых свойств²⁹. В данном случае процесс модификации минеральной части смеси при использовании FA производится путем частичной замены наполнителя (минерального порошка) на FA при сохранении традиционной технологии приготовления. При оптимальном подборе смеси присутствие взамен традиционного минерального порошка FA сферической формы позволяет оптимизировать технологические режимы производства путем регулирования ее реологических свойств (например, снижение температуры приготовления, повышение удобоукладываемости) и/или физико-механических характеристик асфальтобетона.

Федеральной дорожной администрацией (Federal Highway Administration, FHWA) и Агентством по охране окружающей среды (Environmental Protection Agency, EPA) США разработано руководство относительно преимуществ и негативного воздействия определенных видов FA, используемых при строительстве автомобильных дорог. Было установлено, что FA, применяемая в качестве наполнителя в асфальтобетонной смеси, повышает ее жесткость, что, в свою очередь, снижает образование колеи на дорожном покрытии³⁰ [18].

В зарубежных источниках [19-21] фигурирует термин *ASHphalt (ash – asphalt) – асфальтобетон, включающий ЗУ*. ASHphalt позволяет улучшить эксплуатационные характеристики, в частности, повысить устойчивость дорожных покрытий при значительной экономии битума в асфальтобетонной смеси.

Исследования, проведенные специалистами Бишкекской ТЭЦ (Кыргызстан), подтвердили, что асфальтобетон с применением ЗУ в качестве минерального порошка по показателям прочности превышает показатели свойств стандартных образцов [22].

Таким образом, FA нашла широкое применение при производстве бетонных смесей, но в меньшей степени используется в качестве минерального порошка при приготовлении асфальтобетонной смеси.

²⁹Значение слова модификация / URL: <https://sanstv.ru/dict/%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F> (дата обращения: 14.09.2023 г.).

³⁰Capp J.P., Spencer J.P. 1970 «Fly Ash Utilization: A Summary of Applications and Technology». U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, Information Circular 8483.

ВЫВОДЫ

- Зола уноса обладает уникальными свойствами (сферическая форма, самоцементирующиеся или пуццолановые свойства, легкий вес и др.).
- В настоящее время влияние микроструктуры зол уноса различных ТЭС на свойства материалов изучено недостаточно, но имеется практическое подтверждение ее перспективного применения в различных областях производства. Наиболее широко золы уноса используют при приготовлении бетонных смесей и строительных растворов.
- Применение зол уноса сложной гетерогенной структуры в широком промышленном масштабе сдерживается рядом факторов, в том числе связанных со сложностью ее сухого удаления и недостаточно изученным механизмом воздействия ее микроструктуры на свойства производимого материала.
- На современном этапе существует острая потребность в разработке новых технологий по применению различных видов угольной золы уноса с учетом особенностей ее микроструктуры и процессов структурирования материалов с ее применением.
- Сферическая форма и уникальная микроструктура золы уноса при условии выбора наиболее благоприятного технологического режима производства и оптимального состава смеси позволяют расширить потенциальные возможности ее использования в дорожном хозяйстве (например, улучшить обрабатываемость (удобоукладываемость) смеси, облегчить ее уплотнение, снизить температуру приготовления и уплотнения).
- Использование золы уноса взамен традиционных материалов природного происхождения или наряду с ними является актуальным. В свою очередь в области дорожного хозяйства созданы условия, допускающие ее применение при условии стабильного качества и соответствии требованиям действующих нормативно-технических документов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подход к применению золошлаков в дорожном хозяйстве. С.В. Полякова, И.В. Чанцев // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2023. – № 49(1). – С. 301-328.
2. Герк С.А. Исследование состава и структуры отходов топливно-энергетического комплекса с применением электронно-микроскопического и элементного анализов / С.А. Герк, В.А. Смолий // Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2013. – № 4. – С. 18-21.
3. ГОСТ Р 57789-2017. Зо́лы, шлаки и золошлаковые смеси ТЭС для производства искусственных пористых заполнителей. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 11 с.
4. ГОСТ 25818-2017. Зо́лы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 23 с.
5. ОДМ 218.2.031-2013. Методические рекомендации по применению золы-уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200098294> (дата обращения: 05.09.2023).
6. Coal Combustion Products (CCPs). Characteristics, Utilization and Beneficiation. 1st Edition. – April 29, 2017. Authors: Tom Robl, Anne Oberlink, Rod Jones.
7. Coal Ash Recycling Rate Increases in 2020, Reversing Declines in Previous Two Years / American Coal Ash Association. – URL: <https://concreteproducts.com/index.php/2022/01/13/coal-ash-recycling-rate-increases-in-2020-reversing-previous-years-declines/> (дата обращения: 05.09.2023).
8. Handbook of Fly Ash. Kamal K. Kar. Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, India. – 2021. – 1762 P.
9. Guide to Pavement Technology Part 4E: Recycled Materials / Sydney: Austroads, 2022. – 87 P.
10. Зырянов В.В. Зола уноса – техногенное сырье / В.В. Зырянов, Д.В. Зырянов. – М.: ООО «ИПЦ «Маска», 2009. – 319 с.
11. Пундиене И. Влияние добавки ценосфер на свойства жаростойкого легковесного бетона / И. Пундиене, М. Клизис, А. Каўрите, Г. Гирскас, Д.А. Провоторов // Новые огнеупоры. – 2018. – № 9. – С. 52-57.
12. Blissett R.S. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash / R.S. Blissett, N.A. Rowson. – Fuel. – 2012. – 97. – 1-23 с. – doi:10.1016/j.fuel.2012.03.024.

13. Assi A. *Review of the Reuse Possibilities Concerning Ash Residues from Thermal Process in a Medium-Sized Urban System in Northern Italy* / A. Assi, F. Bilo, A. Zanoletti, J. Ponti, A. Valsesia, R.L. Spina, E. Bontempi // *Sustainability*. – 2020. – № 12(10). – 4193. – URL: <https://doi.org/10.3390/su12104193> (дата обращения: 05.09.2023).
14. Бажуков Н.М. Физико-механические свойства кубовидного минерального порошка и особенности его применения в составе асфальтобетонной смеси / Н.М. Бажуков, Л.С. Щепетева. // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2016. – № 4. – С. 15-25.
15. Энтин З.Б. Зола ТЭС – сырье для цемента и бетона / З.Б. Энтин, Л.С. Нефедова, Н. Стржалковская // *Цемент и его применение*. – 2012. – № 2. – С. 40-46.
16. Barbare N. *Uptake and loss of water in a cenosphere – concrete composite material* / N. Barbare, A. Shukla, A. Bose // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33. – P. 1681-1686.
17. Tiwari V. *Acoustic properties of cenosphere reinforced cement and asphalt concrete* / V. Tiwari, A. Shukla, A. Bose // *Appl. Acoustics*. – 2004. – Vol. 65, № 3. – P. 263-275.
18. *Using Coal Ash in Highway Construction – a Guide to Benefits and Impacts* / Environmental Protection Agency (EPA); Federal Highway Administration (FHWA). – 2005. – Report NR EPA-530-K-002:ID:151.
19. Covi A. *ASHphalt Paving: Better Performance Using Fly Ash – Amended Binders in Asphaltic Concrete* / American Coal Ash Association // *Ash at Work*. – 2013. – Issue 1. – P. 22-25.
20. Tapkın S. *Improved asphalt aggregate mix properties by Portland cement modification*. – M.Sc. thesis, Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey. – 1998.
21. Ramme B.W. *Fly Ash – An Important Ingredient for use in Hot-Mix ASHphalt Concrete* / B.W. Ramme, A. Covi, A. Faheem, K. Sobolev: *proceedings of Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4)*. – Las Vegas, USA, August 7-11, 2016. – 1-9 p. – URL: <http://www.claisse.info/2016%20papers/S246.pdf> (дата обращения: 08.09.2023).
22. Маданбеков Н.Ж. Применение в асфальтобетонных смесях минерального порошка из золы уноса ТЭЦ г. Бишкек / Н.Ж. Маданбеков, Б.Ж. Осмонова // *Вестник КГУСТА*. – 2016. – № 1(51). – С. 99-103.

L I T E R A T U R A

1. *Podhod k primeneniyu zoloshlakov v dorozhnom hozyajstve.* S.V. Polyakova, I.V. Chancev // *DOROGI I MOSTY.* – 2023. – № 49(1). – S. 301-328.
2. *Gerk S.A. Issledovanie sostava i struktury othodov top-livnoenergeticheskogo kompleksa s primeneniem elektronno-mikroskopicheskogo i elementnogo analizov / S.A. Gerk, V.A. Smolij // Izvestiya VUZov. Severo-kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki.* – 2013. – № 4. – S. 18-21.
3. *GOST R 57789-2017. Zoly, shlaki i zoloshlakovyie smesi TES dlya proizvodstva iskusstvennyh poristyh zapolnitelej. Tekhnicheskie usloviya.* – M.: Standartinform, 2017. – 11 s.
4. *GOST 25818-2017. Zoly-unosa teplovyh elektrostancij dlya betonov. Tekhnicheskie usloviya.* – M.: Standartinform, 2017. – 23 s.
5. *ODM 218.2.031-2013. Metodicheskie rekomendacii po primeneniyu zoly-unosa i zoloshlakovyh smesey ot szhiganiya uglya na teplovyh elektrostanciyah v dorozhnom stroitel'stve.* – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200098294> (data obrashcheniya: 05.09.2023).
6. *Coal Combustion Products (CCPs). Characteristics, Utilization and Beneficiation. 1st Edition.* – April 29, 2017. Authors: Tom Robl, Anne Oberlink, Rod Jones.
7. *Coal Ash Recycling Rate Increases in 2020, Reversing Declines in Previous Two Years / American Coal Ash Association.* – URL: <https://concreteproducts.com/index.php/2022/01/13/coal-ash-recycling-rate-increases-in-2020-reversing-previous-years-declines/> (data obrashcheniya: 05.09.2023).
8. *Handbook of Fly Ash.* Kamal K. Kar. Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, India. – 2021. – 1762 P.
9. *Guide to Pavement Technology Part 4E: Recycled Materials / Sydney: Austroads, 2022.* – 87 P.
10. *Zyryanov V.V. Zola unosa – tekhnogennoe syr'e / V.V. Zyryanov, D.V. Zyryanov.* – M.: OOO «IPC «Maska», 2009. – 319 c.
11. *Pundiene I. Vliyanie dobavki cenosfer na svojstva zharostojkogo legkovesnogo betona / I. Pundiene, M. Kligis, A. Kajrite, G. Girskas, D.A. Provotorov // Novye ogneupory.* – 2018. – № 9. – С. 52-57.
12. *Blissett R.S. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash / R.S. Blissett, N.A. Rowson.* – *Fuel.* – 2012. – 97. – 1-23 c. – doi:10.1016/j.fuel.2012.03.024.

13. Assi A. *Review of the Reuse Possibilities Concerning Ash Residues from Thermal Process in a Medium-Sized Urban System in Northern Italy* / A. Assi, F. Bilo, A. Zanoletti, J. Ponti, A. Valsesia, R.L. Spina, E. Bon-tempi // *Sustainability*. – 2020. – № 12(10). – 4193. – URL: <https://doi.org/10.3390/su12104193> (data obrashcheniya: 05.09.2023).
14. Bazhukov N.M. *Fiziko-mekhanicheskie svojstva kubovidnogo mineral'nogo poroshka i osobennosti ego primeneniya v sostave asfal'tobetonnoj smesi* / N.M. Bazhukov, L.S. Shchepeteva. // *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. – 2016.– № 4. – С. 15-25.
15. Entin Z.B. *Zoly TES – syr'e dlya cementa i betona* / Z.B. Entin, L.S. Nefedova, N. Strzhalkovskaya // *Cement i ego primenenie*. – 2012. – № 2. – С. 40-46.
16. Barbare N. *Uptake and loss of water in a cenosphere – concrete composite material* / N. Barbare, A. Shukla, A. Bose // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33. – P. 1681-1686.
17. Tiwari V. *Acoustic properties of cenosphere reinforced cement and asphalt concrete* / V. Tiwari, A. Shukla, A. Bose // *Appl. Acoustics*. – 2004. – Vol. 65, № 3. – P. 263-275.
18. *Using Coal Ash in Highway Construction – a Guide to Benefits and Impacts* / Environmental Protection Agency (EPA); Federal Highway Administration (FHWA). – 2005. – Report NR EPA-530-K-002:ID:151.
19. Covi A. *ASHphalt Paving: Better Performance Using Fly Ash – Amended Binders in Asphaltic Concrete* / American Coal Ash Association // *Ash at Work*. – 2013. – Issue 1. – P. 22-25.
20. Tapkın S. *Improved asphalt aggregate mix properties by Portland cement modification*. – M.Sc. thesis, Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey. – 1998.
21. Ramme B.W. *Fly Ash – An Important Ingredient for use in Hot-Mix ASHphalt Concrete* / B.W. Ramme, A. Covi, A. Faheem, K. Sobolev: *proceedings of Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4)*. – Las Vegas, USA, August 7-11, 2016. – 1-9 p. – URL: <http://www.claisse.info/2016%20papers/S246.pdf>. (data obrashcheniya:08.09.2023).
22. Madanbekov N.Zh. *Primenenie v asfal'tobetonnyh smesyah mineral'nogo poroshka iz zoly unosa TEC g. Bishkek* / N.Zh. Madanbekov, B.Zh. Osmonova // *Vestnik KGUSTA*. – 2016. – № 1(51). – С. 99-103.

.....
**ANALYSIS OF FLY ASH MICROSTRUCTURE PECULIARITIES AND
ITS UTILIZATION POTENTIAL USING FOREIGN EXPERIENCE**

*Ph. D. (Tech.) S.V. Polyakova,
(FAI «ROSDORNII»)*

Contact information: polyakovasv@rosdornii.ru

In domestic practice fly ash (FA) is classified as ash and slag waste generated by burning coal at thermal power plants (TPPs). Its improper disposal is a problem for the environment and leads to depletion of renewable resources.

In contrast to domestic practice, in foreign practice fly ash (fly ash, FA) is considered as an industrial by-product, characterized by stable properties, which greatly simplifies its practical use. In addition, this product must comply with the current technical standards, radiation hygiene and sanitary and epidemiological safety requirements.

Application of ash and slag, as a waste product of complex heterogeneous structure, in wide industrial scale of road economy is restrained by a number of factors, including those related to insufficiently studied peculiarities of its microstructure and mechanism of structure formation of materials with its use.

The paper pays attention to the description of the microstructure of FA, its physical and chemical properties, peculiarities and disadvantages of its application, its possible technological advantages, etc.

Key words: *ash and slag wastes, industrial by-product, fly ash, coal fly ash, cenospheres, asphalt concrete mixtures, physical and mechanical properties, workability.*

Рецензент: канд. техн. наук А.В. Бобков (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 05.09.2023 г.