

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

УДК 625.85:625.76 (476)(083.74) 691.16(088.8)

*И. И. ЛИШТВАН², Г. Д. ЛЯХЕВИЧ¹, А. Г. ЛЯХЕВИЧ¹, В. М. ДУДАРЧИК²,
В. М. КРАЙКО², С. А. ЗВОННИК¹***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ БУРЫХ УГЛЕЙ
И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ В АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЯХ***¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
²Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: nature@ecology.basnet.by; lfdi@hotmail.com; dudwm@tut.by; vvkraiko@gmail.com*

С использованием фундаментальных и специальных методов исследования изучены характеристики золы бурых углей и горючих сланцев, асфальтобетонные смеси, образцы асфальтобетона, содержащие золу. Результаты исследований показали возможность использования золы бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений Беларуси для получения строительных материалов. Новизна выполненных исследований заключается в разработке составов асфальтобетонных смесей, способов их приготовления с использованием золы бурых углей и горючих сланцев.

Ключевые слова: бурые угли, горючие сланцы, зола, активность золы, асфальтобетонная смесь, дорожно-строительные материалы.

*I. I. LISHTVAN², G. D. LJAKCHEVICH¹, A. G. LJAKCHEVICH¹, V. M. DUDARCHYK²,
V. M. KRAIKO², S. A. ZVONNIK¹***EXPERIMENTAL RESEARCH AND EFFICIENCY OF USE OF BROWN COAL ASH
AND OIL SHALE IN ASPHALT MIXES***¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
²The Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: nature@ecology.basnet.by; lfdi@hotmail.com; dudwm@tut.by; vvkraiko@gmail.com*

With the usage of fundamental and special methods of research the characteristics of brown coal ashes, asphalt concrete mixtures, asphalt concrete samples which contain these ashes have been explored. The results of the research showed the ability of use of Zhitkovichi brown coal deposit and Turov ash deposit for building materials production. The novelty of the research is to develop formulations of asphalt concrete mixtures, methods for their preparation with the use of brown coal ash and oil shale ash.

Keywords: brown coal, oil shale, ash, ash activity, asphalt-concrete mixture, road-building materials.

Введение. Во многих странах мира значительную часть электроэнергии получают благодаря сжиганию твердого топлива. Например, в России около 70% всей электроэнергии вырабатывается при сжигании твердого топлива – углей, сланцев, торфа. В результате ежегодно образуется около 50 млн т отвалов золошлаковых смесей. К концу 2013 г. в отвалах теплоэлектростанций находилось свыше 1,9 млрд т таких отходов. Уровень утилизации этих отходов в России составляет около 10%; в ряде развитых стран – около 50%, во Франции и в Германии – 70%, а в Финляндии – около 90% их текущего выхода. Там применяется в основном сухая зола и проводится

государственная политика, стимулирующая ее использование. В Польше резко повышена цена на землю под золоотвалы. В Китае зола доставляется потребителям бесплатно, а в Болгарии сама зола бесплатна. В Великобритании действуют пять региональных центров по сбыту золы [1].

Анализ отечественного и зарубежного опыта использования золы и золошлаковых материалов показал, что их можно применять, прежде всего, в дорожном строительстве при сооружении земляного полотна, для устройства укрепленных оснований, в качестве заполнителя и минерального порошка в асфальтобетонах. Потребление материальных ресурсов при строительстве автомобильных дорог чрезвычайно велико. Поэтому уменьшение потребности в дорожно-строительных материалах и повышение эффективности их использования остаются важнейшими проблемами. Одним из способов их решения является применение вторичных ресурсов – отходов промышленности, которые могут быть использованы или в качестве непосредственно дорожно-строительного материала, или как исходный продукт для его получения. К таким отходам относятся зола и шлаки – продукты сжигания на тепловых электростанциях твердого топлива: угля, торфа, сланцев и других горючих материалов. В 1976–1990 гг. разработан ряд нормативных документов, развивающих возможности использования золы и золошлаковых смесей в дорожном строительстве, что способствовало строительству автомобильных дорог с применением золы особенно в районах, испытывающих дефицит традиционных дорожно-строительных материалов.

Токсико-гигиеническая оценка золошлаковых отходов, образующихся при сжигании углей. Золошлаковые отходы, продукты сгорания углей – наиболее объемный вид отходов промышленного производства, хранение и переработка которых представляет ощутимую экологическую угрозу из-за наличия в их составе высокотоксичных компонентов. В связи с этим разработаны комплексная гигиеническая оценка золошлаковых отходов – продуктов сгорания бурых углей разных месторождений, методические подходы к комплексной токсико-гигиенической оценке золошлаковых отходов, позволившие установить их токсическую, мутагенную и фитотоксическую опасность [2, 3].

Определены параметры токсического и фитотоксического действия золошлаковых отходов, образующихся при сжигании бурых углей на теплокровных животных и растениях. Разработаны методики отбора, транспортировки и хранения проб золошлаковых отходов для аналитических, гигиенических исследований и токсикологических испытаний и методические подходы к оценке класса опасности промышленных отходов на основе комплексных экспериментальных токсикологических исследований. Сформулированы положения совершенствования государственного санитарно-эпидемиологического надзора за условиями образования, транспортировки и хранения золошлаковых отходов, образующихся при сжигании углей, и обоснована методология научного сопровождения предложений к региональным и отраслевым программам и проектам профилактических мероприятий. В зонах размещения золошлаковых отходов концентрации в подземных водах железа, марганца и алюминия, а в почве марганца, меди, никеля, кобальта, свинца и цинка многократно превышают предельно допустимые концентрации. На основании расчетных и экспериментальных методов с учетом состава, физико-химических свойств, токсического и фитотоксического действия золошлаковые отходы, образующиеся при сжигании углей, отнесены к промышленным отходам 3–4-го классов опасности [4–6]. Золошлаковые отходы – уникальный ресурс, который может использоваться в различных отраслях экономики с получением значительного социального и эколого-экономического эффектов. Таким образом, применение золошлаковых отходов позволит сэкономить на стоимости основных дорогостоящих материалов без ущерба качеству изделия, одновременно решив проблему их утилизации.

Цель работы – изучение возможности использования золы бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений в асфальтобетонных смесях. Задачи исследований – с помощью фундаментальных и специальных методов охарактеризовать золу бурых углей и горючих сланцев, органических вяжущих на их основе, разработать технологию приготовления асфальтобетонных смесей, их составы, изготовить образцы асфальтобетона, изучить их физико-химические и реологические характеристики.

Характеристика золы от сжигания технологических проб бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений. Зола состоит из мелких стекловидных частиц,

в основном гладкой шаровидной формы, иногда полых внутри. Ее цвет может изменяться от серого до черного в зависимости от количества несгоревшего углерода. Чем светлее зола, тем ниже содержание углерода. На ее химические свойства влияют в значительной степени вид твердого топлива, методы сжигания, обработки и хранения. Главные составляющие – оксиды кремния, алюминия, железа и кальция с переменным количеством углерода, измеряемым потерей при прокаливании (ППП). В табл. 1 дано сравнение химических компонентов золы для основных видов топлива и золы, полученной из технологических проб бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений.

Т а б л и ц а 1. Химический состав золы твердых горючих ископаемых

Оксиды и ППП	Зола, полученная из твердого топлива при сжигании, мас. %				
	промышленные условия			лабораторные условия	
	антрацит	тощий каменный уголь	БУ*Канско-Ачинского месторождения	БУ* Житковичского месторождения	ГС** Туровского месторождения
SiO ₂	20–60	40–60	15–45	64,35	56,4
Al ₂ O ₃	5–35	20–30	10–25	10,63	18,8
Fe ₂ O ₃	10–40	4–10	4–15	2,39	10,9
CaO	1–12	5–30	15–40	13,10	1,5
MgO	0–5	1–6	3–10	1,66	1,6
SO ₃	0–4	0–2	0–10	0,07	2,3
Na ₂ O	0–4	0–2	0–6	1,37	0,2
P ₂ O ₅	–	–	–	0,09	0,6
MnO	–	–	–	0,73	0,1
TiO ₂	–	–	–	1,30	1,0
K ₂ O	0–3	0–4	0–4	2,00	6,6
ППП	0–15	0–3	0–5	0,2	1,8

* БУ- бурые угли.

** ГС – горючие сланцы.

Важнейшими физическими свойствами золошлаковых материалов являются зерновой состав, насыпная и истинная плотности, водонасыщение. Зерновой состав определяется видом топлива, его подготовкой к сжиганию, режимом сжигания, способом улавливания золы, местом отбора (табл. 2). От зернового, химического и фазового составов золы зависит ее насыпная плотность, которая может составлять от 0,6 до 1,3 г/см³. Истинная плотность золы колеблется от 1,75 до 3,5 г/см³, составляя в среднем 2,1–2,4 г/см³.

Т а б л и ц а 2. Зерновой состав золы твердых топлив

Вид топлива	Размер зерен, мм							
	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	<0,05	
	Содержание зерен, %							
БУ Житковичского месторождения*	–	–	–	0,87	29,07	69,41	0,65	
ГС Туровского месторождения*	–	–	–	0,87	29,07	69,41	0,65	
Вид топлива	Размер зерен, мм							
	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	<0,05
	Содержание зерен, %							
БУ Житковичского месторождения**	0,6	0,8	5,6	18,5	60,2	10,4	3,2	0,7
ГС Туровского месторождения**	0,3	29,6	30,2	26,2	10,8	2,4	0,5	–

* Технологические пробы золы БУ Житковичского месторождения и ГС Туровского месторождения подвергались измельчению в шаровой мельнице.

** Технологические пробы золы БУ Житковичского месторождения и ГС Туровского месторождения не подвергались измельчению в шаровой мельнице.

Физические характеристики золы, полученной при сжигании технологических проб бурого угля Житковичского и горючего сланца Туровского месторождений Беларуси, приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Физические свойства золы

Зола твердого топлива	Средняя плотность, г/см ³	Насыпная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, см ² /г
БУ Житковичского месторождения*	2,13	0,74	2918
ГС Туровского месторождения*	2,02	0,71	2854

* Технологические пробы золы БУ Житковичского месторождения и ГС Туровского месторождения подвергались измельчению в шаровой мельнице.

Определение активности золы, полученной при сжигании технологических проб бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений Беларуси. Основным критерием, определяющим способность золы и шлака к проявлению вяжущих свойств, является наличие кальция в свободном или связанном виде. Наряду с этим используются следующие критерии [4, 7–9]:

модуль основности (гидросиликатный модуль) M_o , который представляет собой отношение суммы основных оксидов к сумме кислотных оксидов:

$$M_o = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) : (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3); \quad (1)$$

силикатный (кремнеземистый) модуль M_c , означающий отношение оксида кремния, вступающего в реакцию с другими оксидами, к суммарному содержанию оксидов алюминия и железа:

$$M_c = \text{SiO}_2 : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3); \quad (2)$$

коэффициент качества K , означающий отношение оксидов, повышающих гидравлическую активность к оксидам, снижающим ее:

$$K = (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) : (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2). \quad (3)$$

Результаты расчетов величин M_o , M_c , K , показали, что зола, полученная при сжигании технологической пробы бурых углей Житковичского месторождения, является активной и может использоваться как самотвердеющий материал в вяжущих, в изделиях на их основе (преимущественно автоклавного твердения), а также в дорожном строительстве, а зола, полученная при сжигании технологической пробы горючих сланцев Туровского месторождения, относится к скрытоактивным золошлаковым материалам и поэтому требует интенсификации твердения. После активации зола также может применяться как самотвердеющий материал в вяжущих и в дорожном строительстве.

Технология приготовления, составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетонов, содержащих золу от сжигания бурых углей Житковичского месторождения. Для приготовления асфальтобетонной смеси использовали: щебень ГП «Гранит» с максимальной крупностью зерен 20 мм, плотностью 2685 г/см³, содержанием пластинчатых и игольчатых зерен 19,3%; марка щебня 1200 соответствует ГОСТ 8267; песок с модулем крупности M_k , равным 2,1, удовлетворяющим требованиям ГОСТ 8736; резиновую крошку (резина дробленая ТУ 38.108035–87), модифицированную высокомолекулярными нефтепродуктами, например, маслом ПН-6ш (ТУ 38.1011217–89); нефтяной битум марки БНД 60/90 соответствует ГОСТ 22245; золу от сжигания бурых углей Житковичского месторождения.

Технология приготовления асфальтобетонной смеси: предварительно золу активировали оксидатом отработанных минеральных масел (ООММ) при температуре 20–60 °С в течение 2–5 мин. Особенностью ООММ является значительное содержание кислородсодержащих функциональных групп, обеспечивающих повышенную адгезию оксидата к золе, что существенно влияет на водонасыщение образцов асфальтобетона и их водостойкость при длительном водонасыщении. Затем расчетное количество песка, щебня, активированной золы загружали в лопастную мешалку, нагревали до 120–160 °С и перемешивали до получения однородной массы. В мешалку подавали

резиновую крошку, модифицированную маслом ПН-6ш, нефтяной битум марки БНД 60/90. Смесь перемешивали при 120–160 °С до равномерного и полного обволакивания поверхности минеральных частиц пленкой и готовую асфальтобетонную смесь выгружали и исследовали.

В табл. 4 представлены составы асфальтобетонных смесей и физико-химические характеристики асфальтобетона. Примеры 2–4 подтверждают оптимальные составы асфальтобетонных смесей, а примеры 1,5 – запредельные составы, показывающие, что в случае отклонения от оптимальных составов качество асфальтобетона ухудшается.

Т а б л и ц а 4. Составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетона с использованием золы бурых углей

Компонент	Пример					
	1	2	3	4	5	
	Состав асфальтобетонных смесей, мас. %					
Битум	4,0	4,5	5,0	5,5	6	
Резиновая крошка, модифицированная маслом ПН-6ш	1,5	3	5	5	5,5	
Зола, активированная оксидатом отработанных минеральных масел	4	6	8	10	12	
Щебень	60	60	55	55	55	
Песок	30,5	26,5	28,0	24,5	21,5	
Показатель	Пример					
	1	2	3	4	5	ГОСТ 31015–2002*
	Физико-механические характеристики асфальтобетона					
Пористость минеральной части, %	17,9	15,8	15,5	15,2	15,6	От 15 до 19
Остаточная пористость, %	4,2	3,8	2,9	2,4	1,9	От 1,5 до 4,5
Водонасыщение, % по объему	3,4	2,0	1,7	1,5	1,2	От 1,0 до 4,0
Предел прочности при сжатии, МПа:						
при 20 °С	4,2	4,0	3,6	3,4	2,8	Не менее 2,2
при 50 °С	2,4	2,3	2,5	2,3	1,6	Не менее 0,65
Трещиностойкость – предел прочности на растяжение при расколе при 0 °С, МПа	2,8	3,9	4,7	5,1	5,4	2,5–6,0
Водостойкость при длительном водонасыщении	0,84	0,89	0,93	0,95	0,96	Не менее 0,85

* Значение показателей для дорожно-климатических зон II, III.

Как показывают результаты испытаний, асфальтобетонная смесь, содержащая золу от сжигания бурых углей Житковичского месторождения, имеет лучшие показатели водонасыщения, водостойкости при длительном водонасыщении, трещиностойкости, предела прочности при сжатии при 20 и 50 °С по сравнению с параметрами асфальтобетонной смеси (ГОСТ 31015–2002).

Технология приготовления, составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетонов, содержащих золу от сжигания горючих сланцев Туровского месторождения. Зола содержит повышенное содержание реакционноспособных соединений Na_2O и K_2O , которые при попадании воды будут активно взаимодействовать с ней с образованием гидроксидов натрия и калия, являющихся чрезвычайно агрессивными соединениями. В результате физико-механические свойства асфальтобетона существенно ухудшатся. Нами предложена новая технология приготовления асфальтобетона, содержащего золу от сжигания горючих сланцев Туровского месторождения.

Для приготовления асфальтобетонной смеси использовали: щебень ГП «Гранит» с максимальной крупностью зерен 20 мм, плотностью 2685 г/см³, содержанием пластинчатых и игольчатых зерен 19,3%, марка щебня 1200 соответствует ГОСТ 8267; песок с модулем крупности M_k 2,1, удовлетворяющим требованиям ГОСТ 8736; резиновую крошку (резина дробленая ТУ 38.108035–87), модифицированную высокомолекулярными нефтепродуктами, например, маслом ПН-6ш

(ТУ 38.1011217–89); нефтяной битум марки БНД 60/90 соответствует ГОСТ 22245; золу сжигания горючих сланцев Туровского месторождения.

Особенность приготовления асфальтобетонной смеси – перед введением в данную смесь зола от сжигания горючих сланцев Туровского месторождения предварительно обрабатывается кислым гудроном, образующимся на предприятиях нефтехимии. В нашем случае использовался кислый гудрон от производства сульфонатных присадок со следующими параметрами: плотность при 20 °С (г/см³) 1,2792; компонентный состав (мас. %): серная кислота 6,3; вода 1,4; органическая масса (ОМ) 92,3; групповой химический состав ОМ (мас. %): смолисто-масляные 28,5, смолисто-асфальтовые 4,1, сложные кислые эфиры 3,2, карбоновые кислоты 1,7, сульфокислоты 54,8. Количество кислого гудрона, используемого для обработки золы, зависит от содержания в ней реакционноспособных соединений типа К₂О, Na₂О, а также от содержания в кислом гудроне свободной серной кислоты и сульфокислот. В нашем случае золу обрабатывали 7,5 мас. % кислого гудрона.

Приготовление асфальтобетонной смеси: расчетное количество песка, щебня, золы, предварительно обработанной кислым гудроном, загружали в лопастную мешалку, нагревали до 120–160 °С при перемешивании до получения однородной массы. Затем подавали резиновую крошку, модифицированную маслом ПН-6ш, нефтяной битум марки БНД 60/90. Массу перемешивали при 120 – 160°С до равномерного и полного обволакивания поверхности минеральных частиц пленкой и готовая асфальтобетонная смесь выгружалась и исследовалась.

Составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетона приведены в табл. 5. Примеры 2–4 подтверждают оптимальные составы асфальтобетонных смесей, а примеры 1,5 – запредельные составы, показывающие, что в случае отклонения от оптимальных составов качество асфальтобетона ухудшается.

Как показывают результаты испытаний, асфальтобетонная смесь, содержащая модифицированную золу от сжигания горючих сланцев Туровского месторождения, имеет лучшие показатели водонасыщения, водостойкости при длительном водонасыщении, трещиностойкости, предела прочности

Таблица 5. Составы асфальтобетонных смесей и физико-механические характеристики асфальтобетона с использованием золы горючих сланцев

Компонент	Пример						
	1	2	3	4	5		
	Состав асфальтобетонных смесей, мас. %						
Битум	3,0	3,5	4,5	5,0	5,5		
Резиновая крошка, модифицированная маслом ПН-6ш	2,5	4,0	6	8,5	6,5		
Зола, от сжигания ГС Туровского месторождения, предварительно обработана кислым гудроном	3	4,5	6,0	8,5	10,5		
Щебень	60	60	55	55	55		
Песок	30,5	26,5	28,0	24,5	21,5		
Показатель	Пример						
	1	2	3	4	5	ГОСТ 31015–2002*	
	Физико-механические характеристики асфальтобетона						
Пористость минеральной части, %	19,2	17,9	16,4	14,7	16,1	От 15 до 19	
Остаточная пористость, %	4,3	3,9	3,2	2,9	2,8	От 1,5 до 4,5	
Водонасыщение, % по объему	4,2	3,8	2,9	2,5	1,8	От 1,0 до 4,0	
Предел прочности при сжатии, МПа	при 20 °С	3,6	3,1	2,8	2,6	2,4	Не менее 2,2 0,65
	при 50 °С	1,8	1,9	2,0	1,7	0,9	
Трещиностойкость – предел прочности на растяжение при расколе при 0 °С, МПа	2,5	2,8	3,4	4,7	5,0	2,5–6,0	
Водостойкость при длительном водонасыщении	0,87	0,89	0,90	0,93	0,91	Не менее 0,85	

*Значение показателей для дорожно-климатических зон II, III.

при сжатии при 20 и 50 °С, чем асфальтобетонная смесь по ГОСТ 31015–2002. В то же время при сравнении образцов асфальтобетон, содержащий золу из бурых углей, имеет более высокие физико-механические свойства, чем асфальтобетон, содержащий золу из горючих сланцев.

Заключение. Золошлаковые материалы можно использовать, прежде всего, в дорожном строительстве в качестве заполнителя и минерального порошка в асфальтобетонах, самостоятельного вяжущего, активной добавки к неорганическим и органическим вяжущим веществам, а также при укреплении грунтов различного состава.

На основании расчетов модуля основности (гидросиликатный модуль), силикатного (кремнеземистый) модуля, коэффициента качества установлено, что зола, полученная при сжигании технологической пробы бурых углей Житковичского месторождения, является активной и может применяться в дорожном строительстве, а зола, полученная при сжигании технологической пробы горючих сланцев Туровского месторождения, относится к скрытоактивным золошлаковым материалам и поэтому требует интенсификации твердения. После активации она также может использоваться в дорожном строительстве и как самотвердеющий материал в вяжущих, изделиях на их основе.

В экспериментальных условиях отработана технология приготовления асфальтобетонных смесей, содержащих золу от сжигания бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений, испытаны составы асфальтобетонных смесей, включающие в себя битум, золу, термопластичный полимер, щебень и песок. На основании результатов проведенных исследований можно отметить, что появилась возможность использования золы, полученной при сжигании технологических проб бурых углей Житковичского и горючих сланцев Туровского месторождений Беларуси, в асфальтобетонных смесях.

Список использованной литературы

1. *Малинина, Л. А.* Экологические и технологические аспекты развития строительства и производства строительных материалов в мире. / Л. А. Малинина, Ю. С. Волков, Я. А. Рекитар. – М.: БИНТИ, 2001. – № 5. – С. 15–18.
2. Методические рекомендации по определению класса опасности отходов / Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Рос. Федерации. – М., 1996.
3. *Русаков, Н. В.* Эколого-гигиенические проблемы опасности отходов производства и потребления; 2-й междунар. конгресс по управлению отходами / Н. В. Русаков. – М., 2001. – С. 95–97.
4. *Галибина, Е. А.* Классификация пылевидных зол в зависимости от вещественного состава, обеспечивающего их рациональное направление использования для производства строительных материалов / Е. А. Галибина // Исследования по строительству. Строительная теплофизика. Долговечность конструкций. – НИИ строительства Госстроя ЭССР – Таллин: Вулгас, 1981. – С. 121–129.
5. Методические рекомендации по использованию золы уноса Канско-Ачинских углей для осушения и укрепления грунтов земляного полотна и устройства оснований и морозозащитных слоев дорожных одежд. – М.: Союздорнии, 1986.
6. Методические рекомендации по укреплению грунтов и отходов промышленности вяжущими для устройства верхней части земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Союздорнии, 1979.
7. *Волженский, А. В.* Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. / А. В. Волженский, И. А. Иванов, Б. Н. Виноградов. – М.: Стройиздат, 1984.
8. *Гулячков, И. Л.* Исследования по уточнению требований к золам уноса, применяемым в качестве самостоятельного вяжущего при укреплении несвязных грунтов / И. Л. Гулячков // Тр. Союздорнии. – М., 1975. – Вып. 82. – С. 87–92.
9. *Гончарова, Л. В.* Дисперсность и химико-минералогический состав зол уноса и пути их активации / Л. В. Гончарова, В. И. Баранова, М. П. Панюкова // Тр. Союздорнии. – М., 1975. – Вып. 82. – С. 102–108.

Поступила в редакцию 05.02.2015