

## ЗОЛОШЛАКИ: ЦЕННЫЙ РЕСУРС ДЛЯ ЭКОНОМИКИ

**A.A. Соловьев**, директор АНО «Международный научно-исследовательский институт устойчивого развития», д-р хим. наук, проф., *soloviyano@mail.ru*

Рецензент: Г.В. Козлов, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), канд. биол. наук, *kozlov\_gv@mail.ru*

*В статье проведена оценка масштабов образования золошлаковых отходов (ЗШО), являющихся следствием сжигания различных видов твердого органического топлива (угля, горючего сланца и др.) в России и в ряде зарубежных стран (Китая, Индии, США, Австралии, Японии), а также состояния дел по их полезному использованию для производства дорожных и строительных материалов, ландшафтного дизайна, общестроительных и дорожных работ, засыпки горных выработок, улучшения плодородия почв и рекультивации.*

*Проведен подробный анализ физико-химических свойств ЗШО, благодаря которым они могут быть использованы в различных отраслях экономики и служить сырьем для получения ценных металлов и других материалов.*

*Проведен анализ российской и зарубежной нормативной правовой базы, регулирующей утилизацию ЗШО.*

**Ключевые слова:** теплоэлектростанции (ТЭС), золошлаковые отходы (ЗШО), зола уноса, золошлакоотвалы, физико-химический состав ЗШО, воздействие ЗШО на окружающую среду, утилизация ЗШО за рубежом, дорожные и строительные материалы, ландшафтный дизайн, общестроительные и дорожные работы, засыпка горных выработок, улучшение плодородия почв, рекультивации, проекты по утилизации ЗШО в России.

## ASH-AND-SLAG: A VALUABLE RESOURCE FOR THE ECONOMY

**A.A. Solovyanov**, Director, ANO «International Research Institute for Sustainable Development», Ph. D., Professor, *solovyanov@mail.ru*

*The article evaluates the scale of ash-and-slag waste generation resulting from the combustion of various types of solid organic fuels (coal, oil shale, etc.) in Russia and in a number of foreign countries (China, India, USA, Australia, Japan), as well as the state of affairs regarding their useful use for the production of road and building materials, landscaping design, general construction and road works, backfilling of mine workings, improvement of soil fertility and reclamation.*

*A detailed analysis of the physic-chemical properties of ash-and-slag waste has been carried out, due to which they can be used in various sectors of the economy and serve as raw materials for the production of valuable metals and other materials.*

*The analysis of Russian and foreign normative legal base regulating ash-and-slag waste utilization is carried out.*

**Keywords:** thermal power plants (TPP), ash-and-slag waste (ASW), fly ash, ash dumps, physicochemical composition of ASW, impact of ASW on the environment, ASW waste disposal abroad, road and building materials, landscape design, general construction and road works, backfilling of mine workings, improvement of soil fertility, reclamation, ASW disposal projects in Russia.

## Введение

Золошлаковые отходы (ЗШО) – это неизбежный спутник энергетического производства, когда в качестве энергоносителя используется твердое топливо: уголь, горючий сланец, торф и др. Поскольку около 40 % энергии в мире производится с использованием угля и кардинальных изменений в мировом энергобалансе в обозримом будущем не предвидится, то и проблема с удалением или использованием ЗШО будет еще долго беспокоить энергетиков, экономистов и экологов. И будет она оставаться актуальной во всех странах, где при производстве энергии пока невозможно обойтись без ископаемого твердого топлива, как, например, в России, Австралии, Индонезии, Бангладеш, Зимбабве, Казахстане, Лаосе, Турции, Пакистане, Вьетнаме и Японии, не говоря уже о странах, где энергетика полностью базируется на угольной генерации, как, например, в Индии и Китае.

## Состав золошлаковых отходов

Золошлаковые отходы – это вид промышленных отходов, которые образуются при сжигании твердого и жидкого топлива: угля, торфа, горючего сланца, мазута и т. д. [1–3]. В зависимости от вида топлива ЗШО подразделяют [4] на антрацитовые, каменноугольные, буроугольные, сланцевые, торфяные и др. На выход ЗШО влияет прежде всего вид топлива: при сжигании каменных и бурых углей масса ЗШО составляет от 1 до 45 % массы использованного топлива, при сжигании горючих сланцев – от 50 до 80 %, при сжигании торфа – от 2 до 30 %.

При этом известно, что четкого соотношения между массой образовавшихся ЗШО и массой сожженного топлива нет [5], так как на это соотношение влияет множество факторов, среди которых, помимо вида топлива, – конструкция оборудования, в которой сжигается топливо, тип топлива и содержание в нем примесей; особенности процесса топливоподготовки; схема и технология очистки дымовых газов, подготовки угля к сжиганию и самого процесса сжигания, а также очистки образующихся дымовых газов и др.

Весь опыт развития угольной промышленности показывает, что полностью избавиться от содержащихся в угле минеральных компонентов невозможно [5], а глубокое обогащение энергетических углей нецелесообразно экономически. Этот вывод закреплен и в ряде регламентирующих документов. Так, например, в ГОСТ 32347–2013 «Угли каменные и антрациты Кузнецкого и Горловского бассейнов для энергетических целей. Технические условия» [6] допустимая зольность (содержание негорючих примесей) составляет от 13 до 40 %, а средняя – 25 %, то есть фактически устанавливается, что при сжигании тонны угля допустимо образование в среднем 250 кг золы.

В ходе технологического процесса сжигания угля он сгорает не весь, и часть угля остается в золе в виде недожога (органического компонента ЗШО). Высокая степень недожога невыгодна для энергетических объектов, но дожигать уголь тоже не получается – для зол разных видов углей нормативные показатели по недожогу составляют [6] от 2 до 24 %, причем значения 2–3 % зачастую достигаются путем предварительной подготовки золы уноса к использованию.

Недожог в ЗШО находится в виде полукокса и кокса. Соотношение между органической и неорганической (минеральной) частями зависит от способа подготовки угля к сжиганию и способа сжигания. Характерными свойствами недожога являются повышенная, по отношению к исходному углю, калорийность и практически полное отсутствие летучих составляющих. По своим характеристикам недожог является готовым сырьем для металлургической промышленности и вторичным топливом для энергетики.

В большинстве случаев ЗШО имеют вид серой или темно-серой неоднородной массы, состоящей из золы уноса (удаляется с дымовыми газами) – смеси частиц размером от 5 до 150 мкм, шлака (удаляется из котла) – смеси фрагментов разной крупности, образовавшихся при спекании продуктов сжигания, и недожога – несгоревшей части исходного топлива.

В зависимости от вида топлива, режима его горения и типа топливосжигающего оборудования доля золы уноса в ЗШО может составить 75–80 %, шлака – 10–20 % и недожига – 10–20 % [1–5]. Состав ЗШО и объем его образования зависят не только от технологии и оборудования, используемого на энергетическом объекте, но и в значительной степени от содержания в топливе минерального негорючего компонента. При этом свой вклад в ЗШО дают не только неорганические вещества, которые изначально были в составе угольной массы, но и примеси вмещающих пород, от которых не удалось освободиться при обогащении угля.

Для удаления компонентов ЗШО существуют разные технологии [4]. Сухой отбор золы дает золу уноса, мокрое удаление – золу гидроудаления. Зола уноса получается в результате очистки дымовых газов золоуловителями и представляет собой тонкодисперсный материал с очень мелкими частицами, что позволяет использовать ее без дополнительного помола. Зола мокрого отбора образуется при удалении ее с помощью воды в виде пульпы по золопроводам. Топливный шлак – это материал, скапливающийся в нижней части топочного пространства тепловых агрегатов и удаляемый в жидком или спекшемся состоянии. Собственно, совместное удаление золы и шлака на тепловых электростанциях и дает тот материал, который называется ЗШО.

Минералогический состав ЗШО непосредственно зависит [1–5, 7] от:

- минералогического состава исходного угля (или иного ископаемого топлива), а также минералогического состава вмещающих пород, которые примешаны к углю;
- способа подготовки угля к сжиганию,
- технологии сжигания угля;
- системы очистки дымовых газов от зол;
- способа транспортировки золы и шлака в золоотвалы.

С химической точки зрения ЗШО представляют собой сложную смесь веществ, среди которых доминируют [1–5, 7] оксиды и карбонаты различных металлов. Среди них 90 % по массе занимают пять соединений: оксид кремния  $\text{SiO}_2$  (45–60 %), оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15–25 %), оксид железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (5–15 %), оксид кальция  $\text{CaO}$  (1,5–4,5 %) и оксид калия  $\text{K}_2\text{O}$  (2,0–4,5 %). В значительно меньших количествах в ЗШО содержатся [2] небольшие количества минеральных примесей различной природы: биогенные (Mn, Mo), конкреционные ( $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{Al}_4[\text{Si}_{14}\text{O}_{10}]$  ( $\text{OH}$ )<sub>8</sub>), терригенные (кварц, глина, циркон), инфильтрационные (металлы платиновой группы, драгоценные, редкие и редкоземельные металлы). В качестве компонентов, которые входят в состав золошлаковых отходов и имеют перспективное значение, можно назвать редкие и цветные металлы; ферросилиций; алюмосиликатные микросферы; магнетитовые микрошарики.

Процессы, происходящие во время сгорания угля, приводят к тому, что в ЗШО помимо органической составляющей (недожига) формируются [2] еще две фазы – кристаллическая и стекловидная (аморфная).

В кристаллической фазе ЗШО можно обнаружить больше всего таких минеральных компонентов, как орто- и метасиликаты, ферриты, шпинели, алюминаты, алюмоферриты, глинистые минералы, оксиды, в т. ч. корунд, глинозем, кварц и др. Могут присутствовать в ЗШО также рудные минералы (например, станин), сульфиты (пирротин, арсенопирит), хлориды, сульфаты и фториды. При нахождении в золошлакоотвале ЗШО подвергаются гидратации и выветриванию. В результате этого в них могут появиться вторичные минералы: оксиды железа, кальцит, цеолиты и др.

Как правило, в ЗШО доминирует [2] стекловидная (аморфная) фаза, в которой присутствуют минеральные образования, состоящие из оксидов алюминия, калия, натрия, кальция и др. В материале аморфной фазы можно обнаружить хорошо выделяющиеся разноцветные стеклообразные фрагменты, чаще всего черного цвета, а также микросферы и их агрегаты. Часть микросфер имеет пустоты, образование которых происходит в результате вспучивания

силикатного расплава в момент образования частицы. Наличие большого количества пузырьков, образовавшихся при формировании микросферы, обусловливает губчатое и пористое строение зольных частиц.

Интерес к использованию ЗШО в качестве сырья для производства различной продукции, в том числе для извлечения из них ценных металлических компонентов, вызвал многочисленные детальные исследования их состава. Результаты некоторых из этих исследований приведены в табл. 1–6.

Таблица 1

**Результаты исследования химического состава ЗШО, образовавшихся на некоторых российских и зарубежных теплоэлектростанциях [4]**

Вид топлива, ТЭС, ТЭЦ, ГРЭС	Содержание оксидов, % (в пересчете на сухое вещество)							
	SiO <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Горючие сланцы Поволжья, Сызранская ГРЭС	41,5–45,1	2,5–9,4	3,4–5,9	2,1–3,5	23,9–27,4	3,8–6,7	3,2–5,2	
Бурый уголь, Ангренская ГРЭС Ангренского угольного бассейна	28,8–36,1	18,1–41,1	14,8–22,1	3,3–19,0	11,9–23,5	4,1–5,8		1,1–2,0
То же, Иркутская (Братская) ТЭЦ-6 Канско-Ачинского угольного бассейна, Ирма-Бородинский разрез	28,2–44,4	10,5–27,5	5,1–14,0	5,4–13,5	22,8–38,2	4,2–8,1		0,3–0,8
	31,6–55,2	10,3–36,0	3,9–23,0	6,4–13,0	21,2–32,4	3,8–7,2		0,8–1,6
То же, Новосибирская ТЭЦ-3 Канско-Ачинского угольного бассейна, Назаровский разрез	24,2–27,0	20,5–28,3	6,7–7,5	13,8–20,7	38,0–44,1	4,1–5,5		0,2–0,3
	23,2–41,7	16,7–32,9	6,4–13,0	10,3–19,9	24,2–44,6	4,5–5,2		0,4–2,2
Каменный уголь, Рефтинская ГРЭС Экибастузского угольного бассейна	59,69	34,2	29,1	5,1	2,52	0,94	0,11–0,8	0,4–0,7
	43,2–65,0	25,5–54,4	21,3–29,0	4,2–25,4	0,4–12,7	0,8–3,5		
То же, Чульманская ТЭС, Нерюнгинское месторождение	49,3–54,4	18,9–20,8	17,5–18,8	1,4–2,0	1,5–2,2	0,7–1,0		
Бурый уголь, Дорогобужская ТЭЦ Подмосковного угольного бассейна	49,02	45,8	33,5	12,3	3,09	0,48		
То же, Рязанская ГРЭС Подмосковного угольного бассейна	49,41	45,7	39,9	5,8	3,94	0,73		0,7–0,9
	46,3–49,7	40,8–51,8	31,8–36,6	9,0–15,2	2,6–4,0	0,3–1,1	0,1–0,2	
То же, Краснокаменская ТЭЦ Харанорского месторождения	55,52	24,6	19,8	4,8	11,28	3,38		

Окончание таблицы 1

Вид топлива, ТЭС, ТЭЦ, ГРЭС	Содержание оксидов, % (в пересчете на сухое вещество)							
	SiO <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Антрацитовый уголь, Новочеркасская ГРЭС Донецкого угольного бассейна	42,51–46,4	29,7–32,0	19,9–21,7	9,8–10,3	3,15–3,4	1,9–2,11	0,5–1,1	3,7–4,0
ТЭЦ г. Боров-Дол, Болгария	50–58	23,8–32,3	15–22	8,8–10,3	2,2–3,0	1,7–2,2	–	2,6–3,4
ТЭЦ Болгария	55–59	30,8–39,4	25–29	5,8–10,4	1,5–3,7	1,3–3,0	–	1,2–2,3
ТЭЦ г. Туров, Польша	51,01	38,3	33,7	4,6	1,68	0,52	0,39	1,66
ТЭС г. Сталёва-Воля, Польша	51,57	25,2	19,6	5,6	4,04	0,5	0,34	1,8
ТЭЦ Япония	53–63	27–34	25–28	2–6	1–7	1–2	0,8–2,4	1,8–3,2
ТЭЦ Англия	41–51	29–48	23–34	6–14	1–8	1,4–3,0	0,2–1,9	1,8–4,2
ТЭЦ Франция	29–54	15–48	10–33	5–15	1–39	1–5	0,1–9,0	0,7–6,0
ТЭЦ ФРГ	34–50	29–50	21–29	8–21	2–12	1–5	–	
ТЭЦ США	32–52	22–59	14–28	8–31	2–12	0–2	–	

Таблица 2

Содержание редких металлов в ЗШО Томской ГРЭС-2 в разных точках отбора [8]

№ п/п	Название	Обозначение	№ 1, мг/л	№ 2, мг/л	№ 3, мг/л
1	Церий	Ce	0,261	0,232	0,226
2	Диспрозий	Dy	<0,005	<0,005	<0,005
3	Эрбий	Er	0,018	0,015	0,016
4	Европий	Eu	<0,005	<0,005	<0,005
5	Гадолиний	Gd	–	–	–
6	Гольмий	Ho	–	–	–
7	Лантан	La	0,153	0,149	0,133
8	Лютесций	Lu	0,0032	0,0033	0,0036
9	Неодим	Nd	0,089	0,084	0,069
10	Празеодим	Pr	–	–	–
11	Скандий	Sc	0,037	0,035	0,035
12	Самарий	Sm	–	–	–
13	Тербий	Tb	0,0065	0,0063	0,0065
14	Тулий	Tm	–	–	–
15	Иттрий	Y	0,099	0,092	0,083
16	Иттербий	Yb	0,012	0,011	0,010

Таблица 3

**Сравнение усредненного химического состава зарубежных и российских ЗШО [9]**

Компонент	Китай	Индия	США	ЮАР	Россия
SiO <sub>2</sub>	31,40–60,00	50,20–59,70	37,80–58,50	49,92–56,29	37,00–62,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,20–55,00	14,00–32,40	19,10–28,60	27,21–31,52	17,50–34,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,50–19,30	2,70–14,40	6,80–25,50	2,58–5,91	4,50–19,00
CaO	0,80–31,00	0,60–2,60	1,40–22,40	4,80–9,47	2,00–14,50
TiO <sub>2</sub>	0,20–1,50	0,20–0,70	1,10–1,60	1,39–2,25	–
Na <sub>2</sub> O	0,20–2,40	0,50–1,20	0,30–1,80	0,03–0,81	0,10–0,50
SO <sub>3</sub>	0,10–3,50	–	0,10–2,10	0,05–4,78	0,10–0,60
MgO	0,40–4,80	0,10–2,10	0,70–4,80	1,47–2,69	0,50–2,10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,30–1,50	0,10–0,60	0,10–0,30	0,45–0,90	0,60–0,70
MnO	0,05–0,06	0,50–1,40	–	–	0,90–2,00
П.п.п.	2,40–18,30	0,50–5,00	0,20–11,00	1,54–7,81	–

Таблица 4

**Усредненный элементный анализ ЗШО Читинской ТЭЦ-2 [10]**

Элемент	Содержание в золе уноса золошлакового озера, г/т	Элемент	Содержание в золе уноса золошлакового озера, г/т	Элемент	Содержание в золе уноса золошлакового озера, г/т
Al	91910,01	Cu	62,83	Pb	34,65
As	89,33	Fe	40855,79	S	2993,50
Ba	1392,51	K	18366,54	Zr	110,18
Be	8,43	La	41,25	Sc	3,83
Rb	5,76	Li	44,23	Sn	86,49
Ca	64117,53	Mg	15016,86	Sr	1450,67
Cd	4,41	Mn	1214,67	Ti	3046,80
Co	23,88	Mo	14,27	V	71,89
Cr	105,27	Ni	82,53	W	110,18
Y	29,40	Zn	36,87	Ce	12,02
P	601,21	Ga	4,27	Ge	172,52

Таблица 5

**Усредненный химический состав геосистемы «уголь – зола – золошлак» Читинской ТЭЦ-2 [10]**

Вещество	Уголь Харанорского месторождения, используемый на ТЭЦ-2, %	Зола с котлоагрегата № 4, %	Зола уноса с золошлакового озера, %
SiO <sub>2</sub>	53,30	50,49	51,77
CaO	9,70	14,02	12,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,30	20,58	21,89
MgO	2,80	1,87	1,77

Окончание таблицы 5

Вещество	Уголь Харанорского месторождения, используемый на ТЭЦ-2, %	Зола с котлоагрегата № 4, %	Зола уноса с золошлакового озера, %
MnO	0,03	0,02	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,10	8,53	9,13
FeO	4,58	6,99	4,57
K <sub>2</sub> O	1,90	1,34	3,34
TiO <sub>2</sub>	0,60	0,78	0,65
SO <sub>3</sub>	4,67	0,84	0,76
BaO	—	0,67	1,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,10	1,11	1,04

Таблица 6

Содержание металлов в рудах и угольной золе [2]

Элемент	Среднее содержание элементов в рудах, г/т	Ориентировочное минимальное содержание в золе, г/т
Be	BeO: 100–320 и выше	BeO: 100, Be-36
Sc	72,65 (в бокситах)	73
V	VO <sub>2</sub> : 400–1200 (в бокситах)	VO <sub>2</sub> : 400
Ga	19,08–53,78 (нефелиновые, апатит-нефелиновые руды, бокситы)	19,08–54
Zr	ZrO <sub>2</sub> : 900 (пирохлоровые)	ZrO <sub>2</sub> : 900
Nb	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 100–3700	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 100
Mo	100-штокверковые руды с попутным молибденом	100
Ag	комплексные серебросодержащие: медно-молибденовый тип – 0,2; вольфрамовый – 1,0; молибденовый – 2,9; медистые песчаники и сланцы – 10	0,2
Cs	Cs <sub>2</sub> O: апатит-нефелиновые – 0,98; слюдитовые и кварц-плагиоклазовые жилы – 386,36; среднее значение по разным типам руд – 22,58	Cs <sub>2</sub> O: 2,5–22,6
W	WO <sub>3</sub> : в россыпных месторождениях – 94 г/м <sup>3</sup> ;	WO <sub>3</sub> – 94 г/м <sup>3</sup> ;
	WO <sub>3</sub> : минерализованные зоны с попутным вольфрамом – 550	W – 35 (75 г/м <sup>3</sup> )
U	в россыпных месторождениях – 93,65 г/м <sup>3</sup>	550; W – 440
Au	в россыпных месторождениях для открытой разработки – 0,7 г/м <sup>3</sup>	40
Pt	платино-золотоносные россыпи – 0,029 г/м <sup>3</sup> ; золотоносные с содержанием платины – 0,008 г/м <sup>3</sup>	0,004–0,014 (0,008–0,029 г/м <sup>3</sup> )
Ti	в ильменит-титаномагнетитовых и россыпных – 3600–38 3000 [8]	7000–9000

Нетрудно видеть, что в ЗШО содержатся практически все элементы таблицы Менделеева, причем некоторые – в следовых количествах, а другие – в количествах, которые превращают ЗШО в настоящие руды для извлечения из полезных компонентов. В следовых количествах (иногда меньше грамма на тонну) содержатся, в зависимости от свойств сжигаемого угля, щелочные и щелочноземельные металлы, различные переходные металлы (в том числе ценные, редкие и редкоземельные) и некоторые неметаллы (например, мышьяк, бор, сера).

С другой стороны, некоторые образцы ЗШО содержат ценные металлические компоненты, например бериллий, скандий, ванадий, галлий, церий, молибден, вольфрам и некоторые другие (см. табл. 6) в таких же концентрациях, что и промышленно разрабатываемые руды.

Учитывая, что некоторые редкие металлы, такие как Sc, Ga, не имеют собственных рудных месторождений и их производство связано с переработкой руд других металлов (Pb, Zn, Cu, Al), то такие нетрадиционные источники редких металлов, как ЗШО, могут приобретать особую актуальность. Кроме того, учитывая высокие цены на металлы на мировом рынке при сравнительно невысокой себестоимости их лабораторного извлечения из ЗШО, можно предположить, что производственная себестоимость выделения металлов будет не выше традиционных методов их получения.

Таким образом, результаты химического анализа ЗШО могут быть хорошим основанием для формирования стратегии по их использованию в качестве сырья для извлечения полезных компонентов. При этом надо иметь в виду, что экономические показатели процесса по извлечению ценных компонентов из ЗШО на разных участках одного отвала могут различаться. Тем не менее даже следовые количества ценных и редких металлов могут оправдать трудоемкость процесса их извлечения.

Рассматривая ЗШО в качестве потенциального сырья для производства различных видов полезной продукции, надо также иметь представление об их физико-механических свойствах. Исследования, проведенные различными специалистами, позволили получить такие сведения об этих характеристиках [7, 11–13]. Далее перечисляются эти характеристики:

- плотность – 1,9–2,3 г/см<sup>3</sup>;
- удельная поверхность – 2400–3200 см<sup>2</sup>/г;
- насыпная плотность в уплотненном состоянии – 810–980 кг/м<sup>3</sup>;
- насыпная плотность в рыхлом состоянии – 600–720 кг/м<sup>3</sup>;
- дисперсность – в гранулометрическом составе ЗШО доминируют частицы крупностью 62 мкм;

– гидравлическая активность (активность поглощения ЗШО оксида кальция из раствора); качественная зола уноса характеризуется показателем не менее 30 мг на 1 г золы через 30 дней и 100 мг на 1 г золы через 100 дней;

– плавкость – золы уноса классифицируются следующим образом: легкоплавкие ( $T \leq 1520$  °C), среднеплавкие ( $T = 1520 \div 1720$  °C) и тугоплавкие ( $T > 1720$  °C); температура плавления растет с увеличением содержания соединений алюминия;

– кислотность и основность.

Подход к оценке кислотности и основности за рубежом и в России различен. Так, в европейских странах руководствуются нормами EN 197-1 и считают золу кислой, если в ней содержится менее 10% активного CaO по массе. Если содержание более 10% – такую золу классифицируют как основную. Американские специалисты используют собственный стандарт – ASTM C 618 – и относят золы к кислым, если сумма трех кислотных оксидов ( $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ) составляет более 70% от массы ЗШО, и к основным, если эта сумма меньше 70%, но больше 50%. В нашей стране для оценки рассматриваемых показателей зол уноса используется ГОСТ 25818–91 [14]. Согласно ему зола считается кислой, если содержание в ней CaO не превышает 10% по массе. Если содержание оксида кальция более 10% (в т.ч. свободного оксида кальция CaO не более 5%), золу считают основной.

### **Влияние золошлакоотвалов на окружающую среду**

В соответствии с последними данными [9] суммарный объем ЗШО, накопленных в золошлакоотвалах в России, приближается к 1,7 млрд тонн, а общая площадь, занимаемая этими объектами, превышает 220 км<sup>2</sup>. Причина таких масштабов накопления ЗШО очень проста: из вновь образуемых ЗШО для производства полезной продукции используется в настоящее время менее 10% ЗШО, причем преимущественно золы уноса, а оставшиеся отходы

складируются на золошлакоотвалах. Поскольку на тепловых электростанциях России объем ежегодного образования ЗШО составляет 25–30 млн тонн [5], то при нынешнем отношении к утилизации ЗШО золошлакоотвалы будут только разрастаться.

В зависимости от принятой на предприятии технологии золошлакоудаления отвал может быть намывным (в результате гидрозолоудаления) или насыпным (в результате сухого золоудаления). Строить «сухой» золоотвал дороже, но из него проще извлекать ЗШО для дальнейшей переработки, и его легче рекультивировать.

Сухой золошлакоотвал обычно строят [5] на месте выработанного карьера или других малоценных земель. С поверхности участка снимается верхний слой плодородного грунта (если он имеется), и на его место кладут фильтрационную подушку из крупнозернистого и прочного материала (шлак или щебень). Для предотвращения пыления зола увлажняется до 15 %, и эту операцию необходимо повторять регулярно.

При послойной утрамбовке золы и закрытии ее грунтом образуется массив, практически непроницаемый для вод, что исключает возможность вымывания загрязняющих веществ. Эксплуатационные затраты на такое складирование золы на 40–50 % выше, чем в случае гидрозолоудаления.

Золошлакоотвал для мокрого золоудаления включает площадку намыва свежего материала и отстойный пруд – водоем, в котором осаждаются мелкие фракции золы, а верхний слой обеззоленной воды используется для нужд тепловых электростанций (ТЭС). Золошлакоотвалы классифицируются согласно рельефу, на котором они обустраиваются (пойменные, косогорные, овражные и др.), и ограничиваются дамбами.

Все типы отвалов, кроме овражных и котлованных, делаются секционированными для более равномерного заполнения и разработки отвалов. Это также позволяет наращивать дамбы, увеличивая итоговую емкость золошлакоотвала.

В настоящее время на территории Российской Федерации размещено по крайней мере 79 крупных золошлакоотвалов [5]. Они присутствуют практически во всех федеральных округах, но больше всего их в европейской части России, на юге Сибири и на Дальнем Востоке. Именно эти регионы в наибольшей части ощущают их негативное влияние.

Проектирование золошлакоотвалов предусматривает [15–17] разработку мероприятий, которые должны минимизировать их воздействие на окружающую среду, однако полностью эту проблему решить удастся далеко не всегда. Анализ, проведенный рядом авторов [18–29], показывает, что существование золошлакоотвалов, особенно обустроенных с нарушением проектных решений, может значительно ухудшать состояние природных сред вблизи этих объектов.

Одним из наиболее распространенных видов негативного воздействия золошлакоотвалов на окружающую среду является унос с их поверхности под действием воздушных потоков частиц золы или мелкодисперсного шлака. Это явление особенно сильно может проявлять себя в сухое время или в тех случаях, когда нарушены технологические решения по складированию ЗШО или эксплуатации золошлакоотвала. Такими нарушениями могут быть плохое уплотнение отходов, отсутствие защитного покрытия свалочного тела или недостаточное смачивание его поверхности. Разные оценки [21, 26] и расчеты [29] показывают, что при высоких ветровых нагрузках скорость выноса частиц золы с поверхности золоотвала может превышать 1 кг в секунду, а за год этот объект за счет золоуноса может потерять несколько тонн золы. При постоянном пылении концентрация взвешенных частиц вблизи золошлакоотвала может приближаться [29] к ПДК, а их присутствие можно фиксировать на расстоянии нескольких километров.

Поскольку в ЗШО содержатся элементы почти всей таблицы Менделеева, в том числе относящиеся к трем первым классам опасности для человека и других живых организмов (первый класс – чрезвычайно опасные вещества: мышьяк, кадмий, ртуть, селен, свинец, цинк, фтор; второй класс – высокоопасные вещества: бор, кобальт, никель, молибден, медь,

сурьма, хром; третий класс – опасные вещества: барий, ванадий, вольфрам, марганец, стронций), то в результате разноса мелких частиц ЗШО все эти элементы могут оказаться в воздухе, почве и воде поверхностных водоемов.

Наличие взвешенных частиц, поступивших в атмосферный воздух из золошлакоотвала и содержащих химические вещества разной степени опасности, может неблагоприятно сказываться на здоровье людей, а также на состоянии растительности и фауны в зоне воздействия объекта.

Выбросы пылевидных частиц из золошлакоотвалов могут быть причиной загрязнения поверхностных водных объектов. Одним из примеров такого негативного воздействия является наличие [24, 30, 31] тяжелых металлов в донных отложениях Воронежского водохранилища, вблизи которого расположена ТЭЦ-1 города Воронежа. Из-за близкого расположения отвалов у водохранилища золошлаковая пыль попадала в этот водный объект, в связи с чем возникла гидрохимическая аномалия протяженностью около 1,5 км по латерали и 250 м в ширину, примыкающая к территории ТЭЦ-1. Вклад в эту аномалию, где доминируют такие тяжелые металлы, как железо, марганец, титан, хром, ванадий, дает не только ветровая эрозия, но и размывание отвалов дождевыми потоками и талыми водами.

Значительное влияние могут оказывать золошлакоотвалы на подземные воды. Воздействие этих объектов может заключаться [24] в подъеме уровня подземных вод, увеличении мощности водоносного горизонта и расхода подземного потока, формировании техногенных водоносных горизонтов, загрязнении подземных вод в результате их смешения с фильтрующимися на их поверхность сточными водами. Во время эксплуатации золошлакоотвала и после ее завершения возможным источником загрязнения может быть инфильтрация атмосферных осадков через золошлаковые накопления. В результате инфильтрации атмосферных осадков и поливочных вод через толщу золошлаков возможен подъем уровня грунтовых вод.

Вода, используемая в системах гидрозолоудаления ТЭЦ, вымывает из ЗШО различные минеральные компоненты и в результате становится насыщенным солевым раствором [24, 32]. В ходе эксплуатации золошлакоотвала формируется техногенный горизонт грунтовых вод, источником питания которых является загрязненный фильтрат.

Переход загрязненных вод в нижние водоносные горизонты приводит к существенному изменению гидрохимического состава природных грунтовых вод [24, 32, 33]. При этом разгрузка подземных загрязненных вод в естественные дрены может вызывать загрязнение поверхностного стока.

Результаты исследований гидрохимического состава подземных вод в районах размещения гидрозолоотвалов показывают, что их загрязнение из-за инфильтрации вод может носить достаточно серьезный характер. Так, из-за слабой защищенности первого от поверхности водоносного горизонта от вод золоотвалов города Комсомольска-на-Амуре и города Хабаровска в этот горизонт может поступать [34] вода, в которой содержатся значительные концентрации бора (до 0,37 мг/дм<sup>3</sup>), мышьяка (до 0,027 мг/дм<sup>3</sup>), бария (0,11–0,12 мг/дм<sup>3</sup>; 1,0–1,2 ПДК), ванадия (0,16 мг/дм<sup>3</sup>; 1,6 ПДК), селена (0,018 мг/дм<sup>3</sup>; 1,8 ПДК) и растворенных нефтепродуктов (до 2,1 ПДК). Для данных вод характерны повышенная минерализация (до 0,4 г/дм<sup>3</sup>) и щелочная среда (рН более 8,4).

Изучение [34] химического состава подземных вод в районе золоотвала Хабаровской ТЭЦ-1 в 2005–2006 гг. подтвердило, что вблизи золоотвала сформировались подземные воды аномального химического состава. Благодаря повышенному напорному градиенту золоотвала происходила миграция в водоносный горизонт ряда тяжелых металлов (никель, цинк, свинец, медь, ванадий), которые неоднократно фиксировались в воде, но без превышения ПДК.

По данным [35], золоотвал Архангельской ТЭЦ формирует повышенное содержание аммония (до 45 мг/дм<sup>3</sup>) и никеля (1,2 ПДК) в грунтовых водах.

Еще одной экологической проблемой систем гидроудаления является осветленная вода, которая используется в водооборотных системах на нужды ТЭЦ. Она содержит множество химических веществ в концентрациях, превышающих ПДК. Многократная циркуляция оборотной воды при ее контакте с ЗШО превращает ее в перенасыщенный раствор, который может наносить значительный вред поверхностным водоемам, если его сбрасывать без очистки.

Земли, отводимые под золошлакоотвалы, обычно безвозвратно изымаются из хозяйственного оборота. При этом они занимают площади в 3–4 раза большие, чем площади самих предприятий. Кроме того, земли, на которые в течение длительного времени выпадали частицы ЗШО с высоким содержанием оксидов различных металлов и металлоидов, соединений, существенно изменяют свои свойства и становятся менее плодородными [32–35]. Меняется pH почвенных растворов, возрастает содержание в почве кальция, железа, магния, снижается содержание органических веществ. Наиболее негативное воздействие на структуру и плодородие почв оказывают кислые золы.

Следует отметить, что риск негативного влияния золошлакоотвала на объекты окружающей среды, в том числе на фауну, остается [36] даже после его заполнения до проектных отметок и рекультивации, поскольку он становится средой обитания диких животных. Выявленные концентрации металлов в поверхностных водах, растениях и в тканях мелких млекопитающих, находящихся в зоне влияния золоотвала, превышали фоновый уровень.

Очевидно, что оценка потенциальной опасности золошлакоотвала для окружающей среды зависит от многих факторов, среди которых первостепенное значение имеют:

- состав складируемых ЗШО – доля золы уноса в ЗШО и ее дисперсность, а также химический состав ЗШО;
- конструкционные особенности и состояние золошлакоотвала – экологичность системы транспорта ЗШО в объект, площадь поверхности, высота над уровнем земли, заполненность ЗШО;
- природно-климатические особенности района расположения золошлакоотвала – среднегодовая температура, количество выпадаемых осадков, интенсивность и направление ветров;
- наличие вблизи золошлакоотвала особо уязвимых к негативному воздействию объектов жилой застройки, объектов питьевого назначения, сельскохозяйственных угодий, особо охраняемых природных территорий и др.

### Регулирование обращения с золошлаковыми отходами

В 2020 г. была утверждена новая версия Энергетической стратегии Российской Федерации [37]. В соответствии с этим документом уже в 2024 году доля утилизированных ЗШО должна была достичь 15%, а к 2025 году – 50% (табл. 7).

Таблица 7

#### Показатели, установленные Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года в области утилизации золошлаковых отходов [37]

	2018 год (базовый уровень)	2024 год	2035 год
Доля утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образованных отходов в отраслях топливно-энергетического комплекса	52,6 %	65 %	85 %
в том числе продуктов сжигания твердого топлива (золошлаков)	8,4 %	15 %	50 %

Социально значимыми эффектами от повышения уровня утилизации ЗШО должны стать [37]:

- исключение изъятия земель под строительство новых золошлакоотвалов;
- снижение потребления природных ресурсов (общераспространенных природных ископаемых);
- снижение стоимости работ по рекультивации нарушенных земель и дорожному строительству;
- снижение инвестиционной нагрузки на тарифы (на тепловую и электрическую энергию).

В последние несколько лет в России предпринимаются большие усилия для того, чтобы как можно больше материалов, веществ или изделий, утративших исходные потребительские характеристики, можно было бы превратить в полезную продукцию или использовать для производства такой продукции. Не были поэтому обойдены вниманием и ЗШО. Так, 8 июля 2022 года было выпущено постановление Правительства РФ № 1224 «Об особенностях описания отдельных видов товаров, являющихся объектом закупки для обеспечения государственных и муниципальных нужд, при закупках которых предъявляются экологические требования». В этом документе было определено, что «при описании объекта закупки, относящегося к товарам, указывается доля вторичного сырья, использованного при производстве товара». В число таких товаров были включены «твердые поверхностные покрытия и элементы благоустройства – покрытия из переработанных материалов, тротуарная плитка, бордюры, ограждения», для производства которых могли быть использованы ЗШО.

При этом Министерству промышленности и торговли Российской Федерации поручено ежегодно начиная с 2024 года, не позднее 1 сентября, предоставлять в Правительство Российской Федерации согласованные с Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации предложения о видах товаров, являющихся объектом закупки для обеспечения государственных и муниципальных нужд, при закупках которых предъявляются экологические требования, а также о минимальной доле вторичного сырья, использованного при их производстве.

Так, 15.06.2022 вышло распоряжение Правительства Российской Федерации № 1557-р «Об утверждении комплексного плана по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности». Этот План предусматривает в основном мероприятия организационного типа, в первую очередь:

- разработку новых документов по стандартизации, определяющих требования к продукции, полученной в процессе утилизации ЗШО;
- принятие в отдельных субъектах региональных программ повышения объемов утилизации ЗШО;
- определение требований к отходам или вторичному сырью, полученному путем переработки ЗШО.

Вскоре после этого в письме от 19.07.2023 № АГ-04-23/15365 «Об утилизации золошлаковых отходов V класса опасности» Роснедра сообщили, что использование золошлаковых отходов V класса опасности, отходов для ликвидации горных выработок и иных сооружений, связанных с пользованием недрами, рекультивацией земель, будет являться их утилизацией.

С 01.03.2024 вступило в силу распоряжение Правительства РФ от 02.08.2023 № 2094-р [38], в котором приведен перечень продукции (товаров), производство которых должно осуществляться с использованием определенной доли ЗШО. В этот перечень входит продукция, которую можно использовать в строительстве зданий, сооружений и дорог. Доля ЗШО в составе этой продукции варьирует в интервале 5–10 % (табл. 8).

Таблица 8

**Перечень продукции (товаров), производство которых должно осуществляться с использованием определенной доли ЗШО [38]**

№	Наименования видов продукции (товаров)	Доля вторичного сырья – минимальная доля вторичного сырья, %	Код продукции по общероссийскому классификатору ОК 034–2014 (КПЕС 2008) (ОКПД 2)	Наименование продукции по общероссийскому классификатору ОК 034–2014 (КПЕС 2008) (ОКПД 2)
1	Цементы общестроительные, производимые с использованием сланцевой золы (с использованием золошлаковых смесей (золы уноса)	6	23.51	Цемент
5	Модифицированная асфальтобетонная смесь с использованием золошлаковых смесей (золы уноса)	5	19.20.42.121 23.99.12.190 23.99.13.110 23.99.13.120	Битумы нефтяные дорожные. Изделия из асфальта или аналогичных материалов прочие. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон
10	Бетоны для всех видов строительства с использованием золошлаковых смесей (золы уноса), образующихся на тепловых электростанциях при совместном гидроудалении золы и шлака	10 (по массе вяжущего)	23.63	Бетон, готовый для заливки (товарный бетон)
11	Конструкционные и теплоизоляционные легкие бетоны с использованием золошлаковых смесей (золы уноса) тепловых электростанций	10 (по массе вяжущего)	23.63	Бетон, готовый для заливки (товарный бетон)
12	Тяжелые, легкие, ячеистые бетоны и строительные растворы, сухие строительные смеси (с использованием в качестве компонента золошлаковых смесей (золы уноса)	10 (по массе вяжущего)	23.63	Бетон, готовый для заливки (товарный бетон)
13	Укрепленные грунты в дорожном строительстве (с использованием золошлаковых смесей (золы уноса) в качестве минерального вяжущего)	5 (по массе вяжущего)	23.99.19.190	Продукция минеральная неметаллическая прочая, не включенная в другие группировки

## Окончание таблицы 8

№	Наименования видов продукции (товаров)	Доля вторичного сырья – минимальная доля вторичного сырья, %	Код продукции по общероссийскому классификатору ОК 034–2014 (КПЕС 2008) (ОКПД 2)	Наименование продукции по общероссийскому классификатору ОК 034–2014 (КПЕС 2008) (ОКПД 2)
14	Силикатный бетон плотной структуры с использованием золошлаковых смесей (золы уноса) в качестве вяжущего	10 (по массе вяжущего)	23.63	Бетон, готовый для заливки (товарный бетон)
15	Искусственные пористые заполнители – зольный и шлакозитовый гравий, глиноцемальный и глиношлаковый гравий и щебень, зольный аглопоритовый гравий и щебень, глиноцемальный и глиношлаковый песок, зольный аглопоритовый песок с использованием в качестве сырья золы уноса, шлака и золошлаковых смесей	5	08.12.13.000	Смеси шлака и аналогичных промышленных отходов без добавления или с добавлением гальки, гравия, щебня и кремниевой гальки для строительных целей
16	Техногенные грунты, полученные с использованием отходов углеобогащения смесей, применяемые для технического этапа рекультивации нарушенных земель, обратной засыпки котлованов и выемок при проведении строительных работ, рекультивации свалок и полигонов твердых коммунальных отходов, планировки естественных неровностей рельефа и т. д.	10	23.99.19.190	Продукция минеральная неметаллическая прочая, не включенная в другие группировки
17	Бетоны жаростойкие с использованием золошлаковой смеси (золы уноса)	10	23.63	Бетон, готовый для заливки (товарный бетон)
18	Шлакобетон с использованием золошлаковых смесей (золы уноса)	10	23.63	Бетон, готовый для заливки (товарный бетон)
34	Комплексные минеральные вяжущие (КМВ) с использованием шлаков доменных и электротермофосфорных гранулированных, золы уноса, белитового шлама, золошлаковой смеси и пыли уноса вращающихся печей	5	23.64	Смеси и растворы строительные
38	Кирпич известково-зольный	10	23.61.11.131	Кирпич силикатный и шлаковый

Следует отметить, что еще с середины семидесятых годов прошлого века сначала в СССР, а потом в Российской Федерации выпускались нормативные документы и методические рекомендации по применению зол и золошлаковых материалов в дорожном строительстве, которые регламентировали, в том числе, требования к объемам применения ЗШО каждого вида продукции и к качеству этой продукции. Перечень этих документов приведен далее.

Основным нормативным документом, в котором приведены и детализированы основные требования к золошлаковым материалам, используемым в дорожном строительстве, а также указания по технологии их применения, являются [4] «Технические указания по использованию зол уноса и золошлаковых смесей от сжигания различных видов твердого топлива для сооружения земляного полотна и устройства дорожных оснований и покрытий автомобильных дорог» (ВСН 185–75), принятые Министерством транспортного строительства СССР еще в 1976 году. В ВСН 185–75 отражены обобщенные результаты исследований СоюздорНИИ, ГипрородНИИ, ГосдорНИИ, Ленинградского, Среднеазиатского, Казахского, Омского филиалов СоюздорНИИ, а также учтены данные производственного опыта Эстонской ССР и других научно-исследовательских и учебных институтов. Их целью было способствовать широкому использованию в дорожном строительстве зол уноса и золошлаковых смесей для устройства различных конструктивных слоев укрепленных оснований, а в ряде случаев и покрытий автомобильных дорог. ВСН 185–75 предусматривают применение в дорожном строительстве зол уноса и золошлаковых смесей, получаемых от сжигания в котлоагрегатах тепловых электростанций (ТЭС) твердого топлива различного вида (бурого и каменного угля, торфа, горючих сланцев).

Межгосударственный стандарт ГОСТ 25818–91 «Золы уноса тепловых электростанций и бетонов» разработан Научно-исследовательским институтом железобетона Госстроя СССР и введен в действие в 1991 году. Он предусматривает применение зол уноса сухого отбора (кислых и основных) в качестве компонента для приготовления тяжелых, легких, ячеистых бетонов и строительных растворов. Кроме того, предусматривается использование этих зол в качестве тонкомолотой добавки для жаростойких бетонов и минеральных вяжущих. При этом нормируются такие основные показатели сырья, как:

- содержание оксида кальция, оксида магния, сернистых и сернокислых соединений в пересчете на  $\text{SO}_3$ , щелочных оксидов в пересчете на  $\text{Na}_2\text{O}$ ;
- потеря массы при прокаливании;
- удельная поверхность;
- влажность золы (не более 1 % по массе);
- величина суммарной удельной активности естественных радионуклидов.

В 2018 году взамен ГОСТ 25818–91 был введен в действие межгосударственный стандарт ГОСТ 25818–2017 «Золы уноса тепловых электростанций и бетонов», действие которого «распространяется на золы уноса (далее – золы) сухого отбора, образующиеся на тепловых электростанциях в результате сжигания углей или смесей углей в пылевидном состоянии и применяемые в качестве компонента для изготовления тяжелых, легких, ячеистых бетонов и строительных растворов, сухих строительных смесей, а также в качестве тонкомолотой добавки для жаростойких бетонов и минеральных вяжущих для приготовления смесей и укрепленных грунтов в дорожном строительстве».

ГОСТ 25592–91 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов», разработанный институтом НИИЖБ Госстроя СССР и введенный в действие в 1991 году, распространяется на золошлаковые смеси гидроудаления, применяемые в качестве компонента при приготовлении строительных растворов, а также тяжелых, легких и ячеистых бетонов для сборных и монолитных бетонных и железобетонных конструкций и изделий. При этом считается, что золошлаковые смеси состоят из шлакового песка (размер зерен от 0,315 до 5 мм) и шлакового щебня (размер зерен крупнее 5 мм).

При этом нормируются такие основные показатели сырья, как:

- удельная поверхность;
- потеря массы при прокаливании;
- содержание оксидов кальция и магния, сернистых и сернокислых соединений в пересчете на  $\text{SO}_3$ , щелочных оксидов в пересчете на  $\text{Na}_2\text{O}$ ;
- влажность (не выше 15% по массе);
- величина суммарной удельной активности естественных радионуклидов.

Предусматривается, что шлаковый щебень золошлаковой смеси должен обладать стойкостью против силикатного и железистого распадов, отвечать требованиям по морозостойкости.

В 2022 году взамен ГОСТ 25592–91 был введен в действие межгосударственный стандарт ГОСТ 25592–2019 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов», действие которого распространяется «на золошлаковые смеси, образующиеся на тепловых электростанциях при совместном гидроудалении золы и шлака или механическим способом (пневмотранспортом) в золоотвал в процессе сжигания углей в пылевидном состоянии и представляющие собой вторичные минеральные ресурсы (ВМР), применяемые в качестве компонентов для изготовления бетонов для всех видов строительства, строительных растворов, сухих строительных смесей, минеральных вяжущих, смесей щебеночно-гравийно-песчаных для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов и материалов, обработанных неорганическими вяжущими для дорожного и аэродромного строительства, а также для получения минерального порошка».

Межгосударственный стандарт ГОСТ 9128–97 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон», разработанный Корпорацией «Трансстрой», Государственным дорожным научно-исследовательским и проектным институтом СоюздорНИИ РФ и введенный в действие в 1999 году, распространяется на асфальтобетонные смеси и асфальтобетон, применяемые для устройства покрытий и оснований автомобильных дорог, аэродромов, городских улиц и площадей, дорог промышленных предприятий в соответствии с действующими строительными нормами. Он допускает применение золы уноса и золошлаковых смесей в качестве минеральных порошков для пористого и высокопористого асфальтобетона, а также плотного асфальтобетона марок II и III. При этом нормируются такие основные показатели сырья, как:

- зерновой состав;
- пористость;
- водостойкость образцов из смеси порошка с битумом;
- показатель битумоемкости;
- потери при прокаливании;
- содержание активных окислов кальция и магния, а также водорастворимых соединений.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 23558–94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства», разработанный институтом СоюздорНИИ Госстроя России с участием ГипрордорНИИ Госстроя России и ГосдорНИИ Минстройархитектуры Украины и введенный в действие в 1994 году, предусматривает применение в качестве вяжущего материала золу уноса с удельной поверхностью выше  $150 \text{ м}^2/\text{кг}$ , содержанием сернистых и сернокислых соединений в пересчете на  $\text{SO}_3$  не более 6% и потерями при прокаливании не более 5% по массе. Настоящий стандарт распространяется на щебеночно-гравийно-песчаные смеси и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, применяемые для устройства оснований, дополнительных слоев оснований и покрытий автомобильных дорог и аэродромов.

ГОСТ 26644–85 «Щебень и песок из шлаков тепловых электростанций для бетона» (с изменениями от 2000 года), введенный в действие в 1987 году, распространяется на

щебень и песок из шлаков, образующихся при сжигании углей на тепловых электростанциях в топках котлов с жидким и твердым шлакоудалением. Требования устанавливаются к щебню и песку из шлаков, применяемым в качестве заполнителя для тяжелых и легких бетонов сборных и монолитных бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений. При этом нормируются такие основные показатели сырья, как:

- зерновой состав;
- насыпная плотность;
- химический состав (потеря массы при прокаливании, содержание сернистых и сернокислых соединений в пересчете на  $\text{SO}_3$ , содержание свободного кальция). Щебень должен обладать стойкостью против силикатного и железистого распадов.

ГОСТ 30491–97 «Смеси органоминеральные и грунты, скрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства», разработанный СоюздорНИИ РФ и введенный в действие в 1997 году, допускает применение для дорожного и аэродромного строительства золы уноса и золошлаковые смеси.

В перечень основных нормативных документов и методических рекомендаций по применению зол и золошлаковых материалов в дорожном строительстве входят также:

- СНиП 2.05.02–85 «Автомобильные дороги. Госстрой СССР», 1986 г.;
- СНиП 3.06.03–85 «Автомобильные дороги. Госстрой России», 2000 г.;
- ВСН 182–91 «Нормы на изыскания дорожно-строительных материалов, проектирование и разработку притрассовых карьеров для автодорожного строительства». Минтрансстрой, 1992 г.;
- «Методические рекомендации по осушению земляного полотна и оснований дорожных одежд в районах избыточного увлажнения и сезонного промерзания грунтов». СоюздорНИИ, 1974 г.;
- «Рекомендации по применению активных зол уноса ТЭЦ РСФСР в качестве вяжущих для укрепления грунтов в основаниях дорожных одежд». ГипрдорНИИ, 1974 г.;
- «Методические рекомендации по использованию золошлаковых смесей ТЭС для устройства укрепленных оснований и морозозащитных дорожных одежд». СоюздорНИИ, 1977 г.;
- «Методические рекомендации по укреплению грунтов и отходов промышленности вяжущими для устройства верхней части земляного полотна автомобильных дорог». СоюздорНИИ, 1979 г.;
- «Методические рекомендации по приготовлению местных шлаковых вяжущих для дорожного строительства». СоюздорНИИ, 1980 г.;
- «Методические рекомендации по использованию золошлаковых материалов для устройства оснований автомобильных дорог». СоюздорНИИ, 1981 г.;
- «Методические рекомендации по устройству щебеночных оснований, обработанных пескоцементной смесью». СоюздорНИИ, 1985 г.;
- «Методические рекомендации по определению экономически рациональной области использования отходов ТЭС и ГРЭС в дорожном строительстве». СоюздорНИИ, 1987 г.;
- «Методические рекомендации по использованию зол уноса от сжигания углей Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса для осушения верхней части земляного полотна и устройства оснований и морозозащитных слоев дорожных одежд». СоюздорНИИ, 1988 г.;
- «Методические рекомендации по разработке выемок в глинистых грунтах влажностью выше оптимальной и использование этих грунтов для возведения насыпей автомобильных дорог во II и III дорожно-климатических зонах». СоюздорНИИ, 1988 г.;
- «Методические рекомендации по устройству дорожных одежд из грунтов и материалов, обработанных сланцевыми золами уноса в зимних условиях». СоюздорНИИ, 1989 г.;
- «Методические рекомендации по технологии сооружения земляного полотна из глинистых грунтов повышенной влажности в Нечерноземной зоне РСФСР». СоюздорНИИ, 1990 г.;

- «Методические рекомендации по применению в дорожном строительстве битумоминеральных смесей, содержащих сланцевую золу сухого отбора». СоюздорНИИ, 1990 г.;
- «Руководство по подбору и приготовлению нерудных материалов и грунтов, обработанных неорганическими вяжущими для дорожного строительства». СоюздорНИИ, 1991 г.;
- «Руководство по строительству оснований и покрытий автомобильных дорог из щебеночных и гравийных материалов». СоюздорНИИ, 1999 г.;
- «Методические указания применения золошлаковых смесей в земляном полотне автомобильных дорог Иркутской области». Одобрены Министерством автомобильного транспорта и дорожного хозяйства Иркутской области 30 декабря 2022 года;
- ГОСТ Р 70196–2022 «Дороги автомобильного пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов»;
- ГОСТ Р 70197.1–2022 «Дороги автомобильного пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона. Общие технические условия»;
- ГОСТ Р 70452–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия»;
- ГОСТ Р 70455–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные, обработанные неорганическими вяжущими. Общие технические условия»;
- ГОСТ 32761–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования»;
- ГОСТ 33174–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Цемент. Технические требования»;
- ГОСТ Р 59300–2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси бетонные для устройства слоев оснований и покрытий. Технические условия»;
- ОДМ 218.2.031–2013 «Методические рекомендации по применению золы уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве».

Таким образом, имеющиеся нормативные правовые и методические документы охватывают практически все отрасли экономики, где возможно применение ЗШО.

### **Утилизация золошлаковых отходов за рубежом**

Проблемы с утилизацией ЗШО [10, 13, 39–42] существуют не только в странах, где энергетика базируется на угольной генерации, как, например, в Индии и Китае, но и вообще там, где невозможно обойтись без ископаемого твердого топлива, как, например, в Австралии, Индонезии, Бангладеш, Зимбабве, Казахстане, Лаосе, Турции, Пакистане, Вьетнаме и Японии. Уголь по-прежнему является востребованным энергетическим ресурсом [43]: в последнее десятилетие среднегодовой рост потребления угля в мире составил в среднем 2%, в период 2016–2024 гг. потребление угля в мире выросло на 1,3 млрд тонн, то есть до 8,8 млрд тонн. Несмотря на различные пессимистические прогнозы, энергетический уголь еще долго будет востребован в качестве топлива в различных регионах, и прежде всего в странах Азии.

В одном из аналитических обзоров [39] собраны данные об образовании и утилизации ЗШО в различных регионах мира в 2010 и 2016 гг. (табл. 9). Нетрудно видеть, что лидирующие позиции по образованию ЗШО занимают три страны – Китай, Индия и США, причем с большим отрывом лидирует Китай, у которого значительное увеличение объемов образования ЗШО не повлияло на способность удерживать процент утилизации ЗШО на уровне 70 %. На втором месте в мире по образованию ЗШО находится Индия, где за 6 лет объем образованных ЗШО вырос почти вдвое, но при этом их утилизация подскочила с 13,8 до 67 %. Более 100 млн тонн ЗШО образовалось в эти годы в США. Объемы угольной генерации в этой стране постепенно снижаются, хотя это и не мешает там увеличивать

объем утилизации ЗШО. Аналогичный тренд можно наблюдать в странах Европейского союза (ЕС), где три страны (Австрия, Швеция и Бельгия) уже сумели реализовать 100%-й отказ от угольной генерации, а также ряд государств публично задекларировали подобные планы.

Таблица 9

**Объемы образования и утилизации ЗШО в мире [39]**

Страна/регион	Образовано ЗШО, млн тонн		Утилизировано ЗШО, млн тонн		Доля утилизированных ЗШО, %	
	2010	2016	2010	2016	2010	2016
Австралия	13,1	12,3	6,0	5,4	45,8	43,9
Китай	395	565	265	396	67,1	70,1
Индия	105	197	14,5	132	13,8	67,0
Япония	11,1	12,3	10,7	12,3	96,4	100,0
Ближний Восток и Африка	32,2	32,2	3,4	3,4	10,6	10,6
Европейский Союз-15	52,6	40,3	47,8	38	90,9	94,3
США	118	107,4	49,7	60,1	42,1	56,0
Канада	6,8	4,8	2,3	2,6	33,8	54,2
Итого	760,4	992,6	404,4	655,6	53,2	66,0

Далее рассмотрим более подробно ситуацию с утилизацией ЗШО в Индии, Китае Японии, Австралии и США.

### Индия

Индия относится к числу стран, энергетика которых вынужденно базируется на угле, поскольку его запасы в стране составляют около 300 млрд тонн, а других значимых источников энергии страна не имеет [40]. При том интенсивном экономическом развитии, которое характерно для Индии, потребление энергии в ней увеличивалось гигантскими темпами, и, следовательно, стремительно нарастили объемы образования ЗШО. Понимая, что относительно ограниченная территории страны не сможет вместить образующиеся отходы, которые при этом сильно загрязняют атмосферный воздух, почвы, поверхностные и подземные воды, правительство Индии в 1994 году создало [40] Миссию по проблеме утилизации золы уноса, работающую под руководством Департамента науки и технологий при тесном контакте с Министерством охраны окружающей среды и лесного хозяйства, Министерством энергетики и Министерством науки и технологий. При этом в деятельности Миссии основное внимание было уделено разработке и реализации демонстрационных проектов по утилизации ЗШО, которые можно было бы внедрять в больших масштабах по всей территории страны для производства различной полезной продукции.

Технологии утилизации золы уноса были разработаны [40] для широкого спектра применений, таких как производство кирпича, блоков, плитки, легких наполнителей, бетонов, цементов, легких золоблоков, панелей из искусственной древесины, композитных материалов, покрытий, катализаторов, биодобрений, биопестицидов и т.д., для использования в сельском хозяйстве, рекультивации неудобий, заполнения шахт, строительства дорог, насыпей, дамб, использования в инфраструктурных проектах и т.д.

Была также создана сеть лабораторий и координационных центров, обеспечивавших техническое руководство и поддержку деятельности учреждений, занимавшихся по всей стране реализацией проектов по использованию технологий обращения с золой уноса. Все вместе это должно было убедить региональные власти, представителей промышленности, население, что проблема предотвращения негативного влияния ЗШО на окружающую среду имеет

вполне конкретное решение и что использование ЗШО может приносить значительный доход. Естественно, развивая эффективную и экономически оправданную технологическую базу по утилизации ЗШО, правительство Индии формировало и соответствующую законодательную и нормативную правовую базу, которая, с одной стороны, усиливала давление на все заинтересованные стороны, от которых зависело практическое решение задач в этой области, а с другой стороны, формировала различные стимулы для производителей.

Если вкратце охарактеризовать деятельность правительства Индии в сфере утилизации ЗШО, то ее основными принципами были:

- усиление надзора за всеми видами деятельности от образования ЗШО, их обработки, хранения и перемещения к потребителю до стадии утилизации, а также контроль цен в этой сфере;
- разработка и корректировка стандартов в области обращения с ЗШО;
- обеспечение внедрения мероприятий по улучшению качества золы уноса;
- обеспечение снижения транспортных расходов при перемещении ЗШО;
- информирование общественности и повышение осведомленности ключевых лиц, принимающих решения по этому вопросу.

Все ведомства и частные организации, занимающиеся прокладкой дорог, устройством дорожных и эстакадных насыпей, защитой береговой линии, производством строительных материалов для различных отраслей экономики, строительством сооружений в прибрежных районах и дамб и др. в радиусе 300 км от угольных ТЭС, должны были в обязательном порядке использовать ЗШО при условии, что:

– ЗШО будут доставлены на объект реализации проекта бесплатно и транспортные расходы будут оплачены ТЭС;

– ТЭС может взимать плату за отгрузку и транспортировку ЗШО на взаимосогласованных условиях (в случае, если ТЭС может использовать ЗШО в других проектах, то соответствующие ведомства и частные организации делают запрос на отгрузку ЗШО, и в этом случае их отгрузка и транспортировка является бесплатной, если ТЭС направляет соответствующее уведомление в строительное ведомство/организацию).

При подведении итогов деятельности Миссии было установлено (табл. 10), что за 20 лет в Индии создана разветвленная инфраструктура и производственная база для утилизации ЗШО, доля утилизируемых ЗШО выросла с 3 до 55%, было создано более 1 млн рабочих мест, и прибыль производителей продукции из ЗШО составила 3 млрд долл. США.

Если теперь подвести итоги деятельности заинтересованных лиц и организаций, которые занимаются утилизацией ЗШО, то можно привести следующие данные [42]. За 25 лет, с 1996 по 2022 год, объем образования золы на угольных ТЭС Индии увеличился почти в 4 раза – с 69 млн до 270 млн тонн, а объем утилизации – в 39 раз: с 6,6 млн до 259 млн тонн, или с 9,6 до 96% (табл. 11).

Таблица 10

**Результат деятельности законодательных органов и правительства Индии по решению проблем утилизации ЗШО с 1994 по 2013 гг. [40]**

Показатель	1994 (год учреждения Миссии)	2013 год
Утилизация золы уноса	1,0 млн т/год (3% из 40 млн тонн произведенной золы уноса)	130 млн т/год (55% из 235 млн тонн золы уноса, произведенной 120 муниципальными энергокомпаниями и около 80 ТЭС общей мощностью около 140 ГВт)
Количество центров (учреждений), работающих по проблеме золы уноса	Менее 10	Сотни

Окончание таблицы 10

Показатель	1994 (год учреждения Миссии)	2013 год
Число людей, работающих в области НИОКР по проблеме золы уноса	Десятки	Тысячи
Взаимосвязи между лабораториями и пользователями	Практически отсутствовали	Стал распространенным явлением обмен данными и опытом
Доверие к технологиям применения золы уноса	Отсутствовало	Широкое доверие
Статус коммерциализации технологий	Практически отсутствовали усилия по коммерциализации технологий или масштабное использование золы уноса	Прибыль более 3 млрд долл. США, более 1 млн новых рабочих мест, снижение выбросов CO <sub>2</sub> в объеме более 75 млн т/год
Статус стандартов и протоколов (критично для устойчивого использования)	Устаревшие и непригодные для многих применений	Более 50 стандартов откорректировано и подготовлено

Таблица 11

**Показатели деятельности угольных теплоэлектростанций Индии в 2022 году [41]**

Показатель на 2022 год	Значение
Количество угольных ТЭС	200
Установленная мощность, млн кВт	213,6
Потребление угля, млн тонн	759
Образование золы уноса, млн тонн	270
Утилизация золы уноса, млн тонн	259 (96 %)
Объем ЗШО, накопленных на отвалах, млрд тонн	1,7

Существенная часть ЗШО в Индии утилизируется [39] за счет их использования в строительной отрасли. На производство строительных материалов (кирпичей, цемента, плитки) в 2018 году пришлось 51 % утилизированных ЗШО. На сегодняшний день химический состав золы уноса позволяет заменить 35 % массы цемента в бетонных смесях. На замену песку и гравию в дорожных насыпях и строительстве автомобильных дорог в 2018 году приходилось 10 и 5 % утилизированных ЗШО соответственно.

В сельском хозяйстве зола уноса используется [39] в основном для мелиорации земель, находящихся близко к уровню моря. В Индии в большей степени, чем в других странах, распространена проблема засоления почв. Для рекультивации таких земель требуются гидротехнические и агрохимические мелиорации. Поскольку зола уноса отличается сильными сорбирующими свойствами, она является эффективным средством для восстановления таких почв.

**Китай**

Серьезные изменения в области регулирования использования ЗШО произошли в Китае в 2010–2011 гг. Были одобрены [41] основные подходы к решению проблемы утилизации ЗШО, в перечень которых входило:

- формирование и распространение руководящих принципов в области комплексного использования золы уноса;

- оказание технической поддержки соответствующим ведомствам в разработке политики в области комплексной утилизации золы уноса;
- организация технического обмена и сотрудничества по организации комплексного использования золы уноса в стране и за рубежом;
- продвижение новых технологий комплексной утилизации золы уноса и продукции, полученной в ходе их реализации;
- организация оказания консультаций, услуг и обучения, связанных с комплексным использованием золы уноса;
- информирование о состоянии вопроса комплексного использования золы уноса, а также о предложениях и требованиях членов Управляющего комитета.

В 2010 году были утверждены руководящие принципы по утилизации золы уноса и введен ряд сопутствующих мер, таких как финансирование или налоговые льготы для проектов, использующих золу уноса. Затем был принят Двенадцатый пятилетний план Китая (2011–2015 гг.), в котором были предусмотрены мероприятия по комплексному использованию твердых промышленных твердых отходов, и который содержал целевой показатель по уровню использования образованной золы уноса (70 % от годового объема образования). В 2015 году правительство КНР отчиталось об успешном выполнении этого показателя.

В 2011 году Государственная налоговая администрация и Министерство финансов Китая ввели налоговые льготы (снижение или отмена НДС) для предприятий, которые перерабатывают ЗШО, образовавшиеся в процессе сжигания твердого топлива на ТЭС.

Bank of China начал выдавать кредиты на льготных условиях на покрытие капитальных затрат предприятий, производящих продукцию из ЗШО. В технопарках вблизи угольных ТЭС Китая, где разрабатывались технологии по утилизации ЗШО, был введен для резидентов особый налоговый режим.

Наибольшая доля ЗШО в Китае (около 90 %) утилизируется в строительной отрасли. В частности, ЗШО используются в производстве цемента, бетона и других строительных материалов. При этом использование ЗШО в качестве добавки в цемент и бетон в Китае практикуется с 1950-х годов с целью замещения некоторых глинистых материалов, кремнезема или глиноземсодержащих материалов. Добавление ЗШО в смесь для производства газобетонных блоков получило широкое распространение в связи с экономией энергии на термическую обработку материалов при реализации данной технологии.

Одним из перспективных направлений использования ЗШО в Китае сегодня является извлечение из них глинозема (оксида алюминия). Содержание оксида алюминия в золах углей, добываемых на месторождениях в провинциях Восточная Монголия и Шаньси, составляет от 40 до 50 % от их общей массы, что делает их полноценным заменителем бокситов (наиболее распространенного источника глинозема в мире).

С 2011 года зола с высоким содержанием оксида алюминия включена в перечень приоритетного сырья для промышленного производства. На сегодняшний день в Китае уже функционирует более 10 зольно-глиноземных заводов. Самый большой из них расположен в алюминиевом технопарке при крупнейшей угольной станции в мире – ТЭС Тогто (провинция Внутренняя Монголия, мощность 6,7 ГВт). В год завод способен производить до 5 млн тонн глинозема из 15 млн тонн ЗШО, что в перспективе должно исключить импорт бокситов в Китай, который сейчас находится на уровне 12 млн тонн в год.

Основные направления использования золы уноса, помимо уже упомянутого производства строительных материалов, перечислены в табл. 12. Как следует из этих данных, достаточно много золы уноса используется для засыпки шахт. Относительно применения ЗШО в сельском хозяйстве сведения цитируемых источников расходятся, но, вероятно, более надежной является информация из работы [42], среди авторов которой присутствуют китайские специалисты.

Таблица 12

**Различные направления утилизации золы уноса в Китае в 2022 г.**

№	Направления использования	Использование, %	
		[42]	[41]
1	Производство строительных материалов (многокомпонентные вяжущие и материалы, добавки в цемент, кирпич, керамзит, газозолобетон и др.)	35	77,3
2	Дорожное строительство (битумные добавки для производства бетонов, материалы для покрытий, боковые насыпи и др.)	20	5,2
3	Строительство зданий/сооружений		10,3
4	Сельскохозяйственные цели (производство удобрений, улучшение качества земель и т.д.)	15	1
5	Закладка шахт или инженерная засыпка	15	6,2
6	Добавки в бетоны и строительные растворы	10	
7	Другие применения, например извлечение алюминия и др.	5	1

Китай неуклонно стремится [42] к повышению уровня утилизации ЗШО, чтобы выйти на 100 %-ное их использование, однако это пока труднодостижимый показатель из-за значительного различия в экономической развитости отдельных регионов Китая, а также в географии самих источников образования и потребления золы уноса.

Например, в таких развитых районах, как Янцзы и Бохай, показатель утилизации золы уноса может доходить и до 100 %, а в неразвитой части Китая уровень использования золы достигает всего 30 %, хотя там иногда и наблюдается ее дефицит. При этом дефицит распространяется лишь на высококачественные золы, а низкокачественную золу практически никто не использует. Это также является [42] одной из основных проблем повышения уровня применения золы уноса. В целом максимальный показатель утилизации золы уноса достигается в тех районах, где наблюдается наибольшая концентрация строительных предприятий.

Как было отмечено ранее, выполнение Двенадцатого пятилетнего плана позволило достичь в Китае к 2015 году уровня утилизации ЗШО выше 70 %. Этот уровень удалось удержать почти до 2020 года (табл. 13), но затем эпидемия ковида замедлила деятельность по утилизации ЗШО, хотя не остановила рост энергопроизводства.

В период с 1990 по 2022 год объем производства электроэнергии на угольных ТЭС Китая увеличился в 12,2 раза: с 441 млрд кВт·час до 5398 млрд кВт·час – и в 2022 г. составил 61 % общего объема производства электроэнергии энергосистемы страны [41]. За 22 года объем образования золы на угольных ТЭС Китая увеличился в 4,8 раза – с 138 млн до 660 млн тонн, а объем утилизации – в 4,4 раза, с 83 млн до 366 млн тонн (табл. 13), то есть он уменьшился до 55,5 %.

Таблица 13

**Динамика утилизации золы уноса в Китае в 2016–2022 гг. [41]**

Показатель	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Образовано ЗШО, млн тонн	500	519	550	585	597	651	660
Утилизировано ЗШО, млн тонн	360	374	391	404	413	409	366
Доля утилизированных ЗШО, %	72	72	71,1	69,1	69,2	62,8	55,5

## Япония

В Японии проблема утилизации ЗШО, имея в виду ее весьма небольшую территорию при достаточно большом населении, стала актуальной еще в 80-е годы прошлого столетия. Япония является одним из крупнейших импортеров угля в мире, и для обеспечения энергобезопасности особое внимание было уделено развитию атомной энергетики. Таким образом, ожидалось существенное сокращение угольной генерации. Однако авария на АЭС Фукусима-1 в 2011 году стала причиной приостановки развития атомной энергетики и наращивания объемов угольной генерации. На сегодняшний день доля угольной энергии в общем объеме генерации составляет около 40 % [39].

Годовой объем образования ЗШО в Японии составляет [39] порядка 12–13 млн тонн. При этом Япония сумела достичнуть уровня утилизации ЗШО более 96 % еще к 2010 году, а в 2016 году этот показатель достиг 100 % [10, 39]. Большая часть вовлекаемых в хозяйственный оборот ЗШО приходится на строительную отрасль (85 %). Центр угольной энергетики Японии (Japan Coal Energy Center – JCOAL) регулярно актуализирует стратегию использования ЗШО в хозяйственной деятельности Японии. 80 % угольных ТЭС в Японии располагаются в прибрежных зонах, что позволяет доставлять ЗШО морским транспортом, существенно снижая себестоимость транспортировки.

Япония является одной из немногих стран, экспортирующих ЗШО в значительных объемах. В среднем за год из Японии вывозилось в Южную Корею до 1,3 млн тонн ЗШО. Поскольку расстояние между ближайшими портами Японии (Фукуока) и Кореи (Пусан) составляет 210 км, это весьма упрощало поставки. Еще несколько лет назад для перевозки ЗШО в год осуществлялось до 400 рейсов. Однако в 2019 году было объявлено, что объемы импорта золы уноса в Южную Корею придется сократить в связи с учащением случаев поставок ЗШО с высоким содержанием радионуклидов и тяжелых металлов.

## Австралия

В 2018 году в Австралии для производства различной продукции и в иных целях было использовано [39] 5,94 млн тонн ЗШО, или 47 % от годового объема их образования. Этот уровень утилизации ЗШО был несколько выше (44–46 %), чем в предыдущие годы. При этом в Австралии наблюдается тренд на снижение спроса на уголь в качестве топлива для электростанций как результат проводимой правительством политики по увеличению доли возобновляемых источников энергии и реализации программы приватизации правительством субъектов электроэнергетики. В то же время, согласно данным Ассоциации развития золошлаковой индустрии Австралии (Ash Development Association of Australia – ADAA), спрос на производственные мощности для использования золы уноса с каждым годом растет.

На сегодняшний день в Австралии спрос на ЗШО значительно зависит от географического фактора. Вблизи крупных городов спрос на ЗШО достаточно велик и продолжает расти, что по большей части связано с необходимостью использования ЗШО для развития инфраструктуры городской застройки. В связи с этим особенно актуален вопрос оптимизации системы поставок ЗШО, от которой неизбежно зависит себестоимость утилизации. Актуальной является также проблема развития систем хранения ЗШО.

В 2018 году лишь чуть более 30 % утилизируемых ЗШО были использованы в производстве строительных материалов. Основная часть использованных ЗШО, или около 3,93 млн тонн (66 %), приходилась на обратную засыпку горных выработок и формирование насыпей, причем большая часть (60 %) размещалась в горных выработках. При этом значительная часть вовлеченных в утилизацию ЗШО состояла из сухой золы уноса, доля которой в образованных ЗШО достигала 88 %.

## США

На сегодняшний день в США, несмотря на активное внедрение «зеленой» генерации, треть электроэнергии вырабатывается угольными электростанциями, на которых образуются

достаточно большие объемы ЗШО [39]. С 1968 года (American Coal Ash Association – АСАА) осуществляет мониторинг объемов образования и практик утилизации всех видов ЗШО.

Еще в 1983 году в США были приняты нормы об обязательном применении ЗШО в дорожном строительстве. Массовое использование ЗШО в строительстве дорог началось с 1986 года. Сейчас, чтобы стимулировать более широкое применение ЗШО, Федеральное агентство по охране окружающей среды, Министерство энергетики, Федеральное управление автомобильных дорог, а также Американская золошлаковая ассоциация и Группа по утилизации твердых коммунальных отходов совместно спонсируют «Партнерство использования продуктов сжигания угля». Проект предназначен для того, чтобы помочь строительным организациям и энергетическим компаниям оценить экологические преимущества и экономические последствия применения ЗШО в различных направлениях, а также стимулировать их утилизацию [44].

Совокупный экономический эффект в дорожном строительстве в США от использования ЗШО оценивается [39] в 5,2 млрд долл. ежегодно. Крупные фракции ЗШО часто используются в строительной отрасли в качестве наполнителя, заменяя гравий и песок. Котловой шлак, извлеченный из котлов старого поколения, имеет высокий спрос на предмет его использования в качестве пескоструйного очистителя и кровельных гранул. Но основным направлением применения ЗШО в США по-прежнему остается обратная засыпка шахт.

Для строительства в США используют как золу уноса, так и золу гидроудаления. Зола уноса используется в качестве замены портландцемента в бетоне и цементном растворе, в качестве заполнителя для дорожных оснований и насыпей. Использование ЗШО позволяет улучшить некоторые характеристики бетонов, в том числе повысить их прочность и увеличить долговечность готового бетонного изделия. Зола гидроудаления утилизируется в качестве заполнителя для бетона и холодных типов асфальтобетонов, а также в качестве структурного наполнителя для насыпей и цементных оснований для строительства дорог.

Очистка дымовых газов ТЭС от диоксида серы дает побочные продукты, одним из которых является гипс. Этот продукт не является золой, однако в США обращение с ним регулируется как с продуктом сжигания твердого топлива. Образующийся гипс широко применяется при производстве стен и перекрытий. Более половины гипсокартонных плит, произведенных в США, используют гипс от угольных электростанций. Помимо этого, гипс используется в сельском хозяйстве в качестве удобрения.

### **Использование золошлаковых отходов в России**

Сведения, которые были приведены ранее, являются свидетельством того, что ЗШО и их компоненты, то есть зола уноса и золошлаковые смеси находят за рубежом широкое и самое различное применение – в дорожном строительстве, для производства строительных материалов, для выделения ценных металлических компонентов, для повышения плодородия почв, для ландшафтного дизайна, для ликвидации шахтных выработок и др. Хорошей рекламой достоинств ЗШО как компонентов строительных материалов является то, что многие известные высотные здания мира были построены [45, 46] с использованием бетона, произведенного с добавлением ЗШО, например:

- башня Бурдж Халифа высотой 830 метров (г. Дубай, ОАЭ), бетонный фундамент которой на 20 % состоит из золы уноса;
- башня The Shard высотой 305 метров (г. Лондон, Великобритания), где 50 % цемента было заменено золой уноса с высоким содержанием кальция;
- башня Пикассо высотой 170 метров (г. Мадрид, Испания).

Удивительно, но, имея почти неограниченные возможности использовать ЗШО, российские компании, производящие строительные материалы, осуществляющие строительные, дорожные и горные работы, практически не обращают внимания на это сырье. В развитых госу-

дарствах за рубежом, даже в тех случаях, когда объем образования ЗШО намного выше, чем объем образования ЗШО в России, уровень полезного использования ЗШО, как правило, превышает 50%, а может достигать и 100%. В России же уровень утилизации ЗШО составляет всего 8,4% [37], и в последние двадцать лет не было никаких намеков, что он может вырасти.

При этом следует отметить, что в России уже давно созданы условия, которые необходимы для широкомасштабного использования ЗШО. Во-первых, в стране проведено громадное число исследований по составу ЗШО, образующихся в разных регионах и на разных ТЭС, лабораторных, пилотных и полупромышленных испытаний по применению ЗШО в различных отраслях экономики, в том числе в дорожном строительстве, производстве строительных материалов, ландшафтном дизайне и др. Отдельные публикации, рассмотренные в этой главе [1–5, 7–13, 20, 47–57], дают лишь слабое представление о том огромном массиве научно-технической и инженерной информации, которая накоплена в нашей стране и которую можно достаточно быстро превратить в технологические решения и производственные комплексы. По некоторым оценкам [54], в результате этих исследований в Российской Федерации разработано более 300 технологий утилизации и переработки ЗШО, которые могут быть применены на разных предприятиях.

Во-вторых, сформирован большой массив нормативных правовых и методических документов, регулирующих различные применения ЗШО и устанавливающих требования к продукции, которую можно производить на основе ЗШО. Для разработки этих документов во многих случаях использован опыт Советского Союза, в котором ЗШО использовались в больших масштабах. В разделе «Регулирование обращения с золошлаковыми отходами» дан перечень основных документов этой категории и описание наиболее важных из них. В табл. 14 для примера показано, какими документами регламентируется производство некоторых изделий на базе ЗШО (преимущественно бетонов) и какими свойствами в этом случае должна обладать производимая продукция.

Таблица 14

**Использование ЗШО для производства бетонов, силикатных изделий, строительных растворов, асфальтобетонных смесей [5]**

Вид сырья, направление использования	Нормативный документ	Основные показатели качества получаемой продукции
Золошлаковая смесь ТЭС Заполнитель для тяжелых и легких бетонов, материал для изготовления силикатного кирпича	ГОСТ 25592–91 [58] ГОСТ 379–95 [59]	Характеризуется зерновым составом, насыпной плотностью, химическим составом, влажностью, устойчивостью структуры зерен шлака; лимитируется: содержание и размер зерен шлака, зерновой состав, удельная поверхность, влажность, насыпная плотность, химический состав, засоряющие примеси
Шлаки ТЭС Заполнители для бетонов (щебень и песок из шлаков), материал для изготовления силикатного кирпича (песок шлаковый), материал для приготовления строительных растворов (щебень и песок шлаковые)	ГОСТ 26644–85 [60] ГОСТ 379–95 [59] ГОСТ 28013–89 [61]	Шлаки разделяют по виду сжигаемых углей и плотности; щебень и песок из шлака характеризуются зерновым составом; ограничиваются: насыпная плотность, химический состав, устойчивость структуры, морозостойкость, наличие посторонних примесей

## Окончание таблицы 14

Вид сырья, направление использования	Нормативный документ	Основные показатели качества получаемой продукции
Зола уноса ТЭС сухого отбора Компонент для изготовления бетонов и строительных растворов, материал для изготовления силикатного кирпича	ГОСТ 25818–91 [58] ГОСТ 379–95 [59]	Применяют антрацитовые, каменноугольные, буроугольные кислые золы (содержание CaO до 10%) и буроугольные основные золы (содержание CaO свыше 10%); ограничиваются: влажность, удельная эффективная активность естественных радионуклидов; золы должны обеспечивать в смеси с цементом равномерность изменения объема
Зола ТЭС гидроудаления Компонент для изготовления тяжелых и легких бетонов и строительных растворов	ГОСТ 28013–89 [61] ГОСТ 25592–91 [62]	Содержание зерен шлака не более 10%, размер зерен шлака не более 5 мм, влажность не более 40%, насыпная плотность в сухом состоянии не более 1300 кг/м <sup>3</sup> , содержание SO <sub>3</sub> не более 1%, CaO+MgO в золе не более 10%, в шлаке не более 1%
Зола уноса ТЭС Кремнеземистый компонент для ячеистых бетонов	ГОСТ 25485–89 [63] ОСТ 21–60–84 [64]	SiO <sub>2</sub> не менее 45%, CaO не более 10%, R <sub>2</sub> O не более 3%, SO <sub>3</sub> не более 3%; обычно пригодны золы каменных углей и антрацита
Зола ТЭС (высокоосновная) Вяжущие для ячеистых бетонов	ГОСТ 25485–89 [63] ОСТ 21–60–84 [64]	CaO не менее 40%, в т. ч. свободной CaO не менее 16%, SO <sub>3</sub> не более 6%, R <sub>2</sub> O не более 3,5%; обычно пригодны золы горючих сланцев и бурых углей
Зола уноса, золошлаковые смеси ТЭС Минеральный порошок в асфальтобетонные смеси	ГОСТ 9128–84 [65]	Лимитируются: зерновой состав, пористость, коэффициент водостойкости смеси порошка с битумом, показатель битумности, содержание водорастворимых соединений, свободной CaO, влажность
Золошлаковые отходы ТЭС Строительство автодорог, оснований аэродромов, укрепление обочин	ГОСТ 8267–93 [66] ГОСТ 25607–94 [67]	Щебень регламентируется: по зерновому составу, прочности, морозостойкости, содержанию зерен пластинчатой и игловатой формы, содержанию пылевидных и глинистых частиц, глины в комках и содержанию дробленых зерен в щебне из гравия, устойчивости структуры против распада

Наконец, следует иметь в виду, что хотя в больших масштабах многие из разработанных в последние десятилетия технологий применения пока не нашли, однако процесс утилизации ЗШО все-таки идет, поскольку золошлакоотвалы являются значительной экономической и экологической обузой для энергогенерирующих предприятий. Причем нередко используются технологии и производства, созданные еще в СССР. Далее приведены некоторые примеры, когда ЗШО используются вполне успешно, и это дает надежду, что ситуацию с применением этого сырья удастся переломить в лучшую сторону.

Так, с конца восьмидесятых годов в стране функционирует [68] Рефтинский завод газозолобетонных изделий, который был построен в 1989 году как непрофильное подразделение Рефтинской ГРЭС с целью переработки образующейся на предприятии золы уноса. Проектная мощность производства составила 145 тыс. м<sup>3</sup> твинтблоков (ячеистого бетона) в год. В 2005 году предприятие было реорганизовано в ООО «Производственно-Строительное Объединение «ТЕПЛИТ». Производственные мощности объединения расположены в Свердловской области: в поселке Рефтинский и городе Березовский. Оба завода специализируются на выпуске мелких стеновых блоков из автоклавного газобетона широкой номенклатуры, используя современные методы производства. Общая производственная мощность заводов составляет 520 тыс. м<sup>3</sup> изделий в год.

За период 1990–2014 гг. заводами ООО «ПСО «Теплит» было переработано 1,02 млрд тонн золы уноса Рефтинской ГРЭС, а с 2015 по 2022 год – еще 1,26 млн тонн золы уноса. С применением строительных материалов ООО «ПСО «Теплит» в г. Екатеринбурге построены следующие объекты:

- ЖК «Аквамарин», «Чемпион Парк», «Бриз», «Дегенин», «Орденоносцев»;
- район загородных квартир «Ливерпуль»;
- перинатальный центр Свердловской области;
- арбитражный суд Свердловской области; и др.

АО «Ангарский цементно-горный комбинат» («Ангарскцемент») был построен в 1950 году. Изначально он был запроектирован под использование золошлаков в различных технологических процессах. В настоящее время «Ангарскцемент» перерабатывает ЗШО ТЭЦ-1 ПАО «Иркутскэнерго» [69]. С применением цемента «Ангарскцемент» были построены:

- Братская, Усть-Илимская, Вилюйская гидроэлектростанции (ГЭС);
- Северомуйский тоннель протяженностью 16 км (Республика Бурятия);
- взлетно-посадочная полоса аэропорта города Читы, рассчитанная на посадку пассажирских и тяжелых грузовых «Боингов»;
- автомобильные мосты на трассе Москва – Владивосток;
- железнодорожные мосты Байкало-Амурской магистрали;
- 3-й мост через Ангару в Иркутске;
- строительные объекты городов Ангарска, Братска, Шелехова, Мирного, Усть-Илимска.

В 2016 году ОАО «Стройтрансгаз» с использованием ЗШО Каширской ГРЭС построил [70] транспортную развязку и надземный путепровод в районе железнодорожной станции Жилево, 87-й километр железнодорожного перегона Михнево – Жилево в подмосковном Ступинском районе. Построенный объект представляет собой шестиполосное дорожное полотно (по три полосы в каждую сторону) длиной 105,7 метра, с максимальной высотой насыпи 14 метров. Вместе со съездами и участком главного хода автомобильной дороги общая протяженность строительства составила 3–4 км. Особенность объекта в том, что рядом проходят железнодорожные пути, то есть транспортная развязка постоянно повергается динамической вибрационной нагрузке. Тем не менее сооружение до сих отвечает всем нормативным характеристикам.

В 2018 году был сдан в эксплуатацию [71] второй в новейшей истории России объект дорожного строительства, возведенный с использованием ЗШО, – транспортная развязка на пересечении Лыткаринского шоссе и магистрали М-5 «Урал» в Люберецком районе Московской области. Строительство этого объекта также осуществил ОАО «Стройтрансгаз», использовав для сооружения земельного полотна ЗШО с золошлакоотвала ТЭЦ-22 Мосэнерго. Особенность объекта в том, что часть съездов с развязки проходит по бывшей свалке ТКО, а в одном месте есть заболоченный участок с переувлажненным основанием.

ООО «Алексинский керамзитовый завод» (АКЗ) с 2015 года начал [72] переработку ЗШО с золошлакоотвала Алексинской ТЭЦ, основная эксплуатация которого была завершена

в 1968 году и составляет: площадь отвала 30 га, мощность слоя ЗШО 12 метров. В настоящее время АКЗ производит 4 основных вида продукции:

- МикроSil 40;
- МикроSil 80;
- МикроSil 630;
- концентрат магнетитовый.

Компаниями ГК «Росатом» совместно с Томским политехническим университетом и при поддержке Администрации Томской области разработана [73] технология переработки ЗШО, извлеченных из золошлакоотвалов Северской ТЭЦ, в строительные материалы, а также в материалы для дорожного строительства. В настоящее время ООО «Тэфра» из ЗШО Северской ТЭЦ производит 6 основных продуктов:

- минеральный порошок (зольная составляющая);
- полнотелые алюмосиликатные микросфера;
- концентрат угольного недожога;
- концентрат магнитной фракции (магнетит);
- шлаковый песок;
- шлаковый щебень.

ООО «Сибирская генерирующая компания» (СГК) использует ЗШО из принадлежащих ей гидрозолоотвалов для рекультивации нарушенных земель в Красноярском крае и Кемеровской области. В настоящее время СГК реализует [74] четыре проекта по рекультивации:

- отработанного опытно-промышленного участка «Ачинский» угольного разреза «Назаровский» в г. Назарове (Красноярский край);
- горных отвалов ликвидированной шахты «Байдаевская» (г. Новокузнецк, Кемеровская область);
- неэксплуатируемого золоотвала № 1 Ново-Кемеровской ТЭЦ (г. Кемерово, Кемеровская область);
- нарушенных земель в г. Минусинске (Красноярский край).

В результате на территории Красноярского края и Кемеровской области СГК было в сумме утилизировано более 7 млн тонн ЗШО:

- 1,33 млн тонн при рекультивации объекта в г. Назарове;
- 1,92 млн тонн при рекультивации объекта в г. Новокузнецке;
- 3,6 млн тонн при рекультивации объекта в г. Кемерово;
- 0,3 млн тонн при рекультивации объекта в г. Минусинске.

ООО «Сибирская генерирующая компания» (СГК) в 2017 году на двух участках в Новосибирской области осуществила [75] капитальный ремонт федеральной трассы Р-254 «Иртыш» (Челябинск – Курган – Омск – Новосибирск) с использованием ЗШО золошлакоотвалов Барабинской ТЭЦ (г. Куйбышев). В рамках проекта выполнено уширение земляного полотна с подъемом обочин и выполнение откосов.

Предприятия ГК «Основа Холдинг» перерабатывают в год около 230 тыс. тонн золы уноса, или 15 % от ежегодного объема образования ЗШО в Омской области. В Омске из кирпичей ООО «Сибирский эффективный кирпич» построены [75] торговые комплексы «Фестиваль» и «Флагман», жилые микрорайоны «Изумрудный берег», «Ласточкино», «Авангард» и др.

Производственное подразделение «Специальные материалы» (ПП «Специальные материалы») специализируется [76] на переработке ЗШО (золы уноса Беловской ГРЭС) в алюмосиликатные микросфера. Получаемый материал отличается низкой теплопроводностью, высокой жаропрочностью, и износостойкостью. Он находит применение в качестве минеральных наполнителей в нефтегазовой, химической, металлургической, строительной, автомобильной и других отраслях. При производстве алюмосиликатных микросфер в объеме

16 тыс. т в год на ПП «Специальные материалы» перерабатывается порядка 22 тыс. тонн легкой фракции золы уноса Беловской ГРЭС.

Компания «Технофлекс» в настоящее время перерабатывает [77] более 40 тыс. тонн золы уноса в год. Всего за время работы с 2007 года завод переработал 400 тыс. тонн золы уноса. Заводом «Технофлекс» за сутки отгружается потребителям до 120 большегрузных автомобилей с продукцией, а за год предприятие производит более 23 млн м<sup>2</sup> рулонных материалов с использованием золы уноса. Продукция предприятия поставляется по всей Сибири, на Дальний Восток, а также экспортится в Казахстан, Монголию и Китай.

### **Заключение**

Ежегодно в мире образуется около 1,4 млрд тонн ЗШО, среди лидеров – США (около 100 млн тонн), Индия (около 300 млн тонн) и Китай (около 700 млн тонн). Россия занимает, вероятно, «почетное» четвертое место с объемом образования около 25 млн тонн. Однако, когда речь идет об уровне утилизации ЗШО, то здесь Россия далеко отстает от развитых и развивающихся стран. По уровню полезного использования ЗШО лидирует Япония (100 %), в странах Европейского союза этот показатель в среднем составляет около 95 %, Индия и Китай утилизируют до 70 % образовавшихся ЗШО, уровень утилизации ЗШО в США, Австралии, Канаде составляет 45–55 %. При этом, несмотря на увеличение объемов образования ЗШО, уровень их утилизации почти повсеместно растет. На этом фоне Россия выглядит достаточно непрятительно – в ее экономике используется лишь 8,4 % образовавшихся ЗШО, причем никаких особых сдвигов в этой области пока не наблюдается.

В результате в настоящее время суммарный объем ЗШО, накопленных в золошлакоотвалах в России, составляет около 1,7 млрд тонн, а общая площадь, занимаемая этими объектами, превышает 220 км<sup>2</sup>. Поскольку на тепловых электростанциях России объем ежегодного образования ЗШО составляет около 25 млн тонн, то при нынешнем отношении к утилизации ЗШО золошлакоотвалы будут только разрастаться.

Неуклонный рост объемов ЗШО в золошлакоотвалах чреват значительными экономическими и экологическими рисками. Воздействие полигонов с ЗШО на окружающую среду весьма ощутимо – они загрязняют атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды, почвы и земли, оказывают негативное влияние на животных и растительность. Поскольку многие золошлакоотвалы находятся либо в населенных пунктах, либо в непосредственной близости от них, то их присутствие оказывается и на здоровье населения. С другой стороны, предприятия, в чьем ведении находятся золошлакоотвалы, несут существенные экономические расходы по их содержанию и вынуждены платить значительные суммы за негативное воздействие этих объектов на окружающую среду.

Но есть еще одно обстоятельство, почему размещение ЗШО на полигонах и многолетнее их хранение граничит с экономическим абсурдом. Большой мировой и еще относительно ограниченный российский опыт показывает, что ЗШО может использоваться [78] в самых различных отраслях экономики. Во-первых, ЗШО и отдельно зола уноса и шлаки пригодны для производства различных строительных материалов. Зола уноса может быть использована:

- для изготовления керамических материалов (тротуарной и облицовочной плитки, кирпича, дренажных труб, изделий из керамзита, гончарных изделий и др.);
- для изготовления различных сортов цемента;
- в качестве заполнителя бетона;
- в качестве добавки в клинкер;
- при производстве ячеистого бетона;
- при производстве пористых заполнителей (безобжиговый гравий, азерит, зольный гравий и др.);
- при производстве силикатного кирпича;
- как наполнитель полимерных материалов.

Шлаки могут быть использованы:

- при производстве ячеистого бетона;
- при производстве пористых заполнителей (азерит и др.);
- при производстве минеральной ваты;
- при производстве шлаковой пемзы;
- в каменном литье;
- при производстве ситаллов.

Кроме того, различные компоненты ЗШО могут быть использованы:

- для ландшафтного дизайна, общестроительных работ, устройства насыпей и дамб, засыпки горных выработок, рекультивации неудобий и др.;
- в дорожном строительстве для устройства дорожных оснований и одежд;
- взамен минерального порошка и частично песка при приготовлении асфальтобетона;
- в качестве изолирующего материала на полигонах по размещению ТКО и промышленных отходов;
- для улучшения качества почв.

ЗШО может также содержать редкоземельные металлы, включая гафний, ниобий, скандий, теллур, галлий, германий, стронций, ванадий, цирконий, которые являются сырьем при производстве микроэлектроники, лазеров, оптических преобразователей, высокотемпературных сверхпроводников и др. В Китае и Польше из ЗШО извлекают глинозем, а в Канаде – уран.

Анализируя ситуацию с использованием ЗШО в России, можно сделать однозначный вывод, что в стране нет эффективных административных и экономических механизмов, которые могли бы заставить и производителей ЗШО и их потенциальных потребителей активно включиться в решение этой долговременной болезненной проблемы. Обращаясь к опыту зарубежных стран, можно предложить пустить в ход следующие административные и экономические рычаги:

- обязать предприятия, использующие в качестве энергоносителя твердое топливо, использовать преимущественно систему сухого золошлакоудаления, поскольку образующиеся в этом случае отходы намного легче использовать в качестве сырья для производства различной продукции;
- значительно увеличить плату за размещение ЗШО;
- обязать предприятия, которые могут использовать для строительных и иных работ ЗШО, и которые находятся в относительной близости (например, в пределах 100 км) от генерирующих мощностей, использовать в качестве сырья преимущественно ЗШО при условии бесплатной поставки им этого сырья;
- создать льготный налоговый режим или иные экономические преференции для производителей, которые используют на своих предприятиях ЗШО.

### ***Список литературы***

1. Мелентьев В.А. Золошлаковые материалы. М.: Энергия, 1978. 255 с.
2. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р., Добронравов А.Д., Шамсутдинов Э.В. Комплексное использование золошлаковых отходов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 26–36.
3. Черепанов А.А., Кардаш В.Т. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ (результаты лабораторных и полупромышленных испытаний) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 2. С. 98–115.
4. Путилин Е.И., Цветков В.С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог: обзорная информация // Гос. служба дор. хоз-ва Мин-ва транспорта РФ. Информационный центр по автомобильным дорогам. М. 2003. 60 с.
5. Шубов Л.Я., Скобелев К.Д., Загорская Д.А. Вторичные ресурсы, образующиеся в сфере теплоэнергетики. С. 649–669 // Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / под ред. Д.О. Скобелева, ФГАУ «НИИ «ЦЭПП». М.; СПб.: Реноме, 2019. 824 с.

6. ГОСТ 32347–2013. Угли каменные и антрациты Кузнецкого и Горловского бассейнов для энергетических целей. Технические условия.
7. Мальчик А.Г., Литовкин С.В., Родионов П.В. Исследование технологии переработки золошлаковых отходов ТЭС при производстве строительных материалов // Современные научноемкие технологии. 2016. № 3–1. С. 60–64.
8. Карманова А.М. Исследование золошлаковых отходов Томской ГРЭС-2 как материала для утилизации // XXI Международная научная конференция «Современные техника и технологии». Секция 1: Устойчивая энергетика. 2015. С. 75–77.
9. Бижанов А.М., Макавецкас А.Р. Рудоуглеродные брикеты на основе продуктов переработки // Кокс и химия. 2024. № 4. С. 43–49.
10. Размахнин К.К., Хатькова А.Н., Шумилова Л.В., Номоконова Т.С. Технология переработки и обогащения золошлаковых отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 10. С. 122–135.
11. Парфенова Л.М., Бозылев В.В., Шведов А.П., Высоцкая М.Н. Режимы и способы активации золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2016. № 8. С. 57–60.
12. Лебедев В.В., Рубан В.А., Шпирт М.Я. Комплексное использование углей. М.: Недра, 1980. 239 с.
13. Таскин А.В. Химико-технологические решения комплексной переработки золошлаковых отходов промышленности / Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. хим. наук. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет». Владивосток, 2018. 208 с.
14. ГОСТ 25818–91. Межгосударственный стандарт. Золы уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. Дата введения: 1991-07-01.
15. Руководство по проектированию золоотвалов тепловых электрических станций. Л.: Энергия, 1974. 134 с.
16. Сысоев Ю.М., Кузнецов Г.И. Проектирование и строительство золоотвалов. М.: Наука, 1982. 243 с.
17. РД 153-34.0-02.106–98. Методика расчетной оценки ветровой эрозии и пыления золоотвала ТЭС. Екатеринбург: ОАО «УралОРГРЭС», 1998.
18. Кучеров Ю.Н. Основные проблемы и направления развития электроэнергетики России // Экология энергетики 2000: мат-лы международной науч.-практ. конф. М.: МЭИ, 2000. С. 14–21.
19. Черенцова А.А. К вопросу об оценке воздействия золоотвала Хабаровской ТЭЦ-3 на почвенный покров // Экономика и экологический менеджмент (электронный научный журнал). Вып. № 2 (сентябрь). 2011. С. 6.
20. Черенцова А.А., Майорова Л.П. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов. Хабаровск: ТОГУ, 2013. 111 с.
21. Черенцова А.А., Майорова Л.П. Влияние полигонов захоронения золошлаковых отходов теплоэлектростанций на окружающую среду (на примере Хабаровской ТЭЦ-3) // Вестник Тихоокеанского гос. ун-та. 2015. № 3. С. 49–58.
22. Черенцова А.А. Оценка влияния золоотвала Хабаровской ТЭЦ-3 на компоненты окружающей среды // Ученые заметки. ТОГУ. 2012. Т. 3. № 1. С. 29–42.
23. Ларионова Н.А. Оценка влияния золоотвалов на загрязнение окружающей среды // Мат-лы 9-й Международной науч.-практ. конф. Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире («Геориск-2015»). С. 297–302.
24. Бочаров В.Л., Крамарев П.Н., Строгонова Л.Н. Геоэкологические аспекты прогноза изменения окружающей среды в районах полигонов захоронения золошлаковых отходов электростанций // Вестник Воронежского гос. ун-та. Серия: геология. 2005. № 1. С. 233–239.

25. Шайхутдинова А.А., Мещеряков А.Г., Немерешина О.Н. Экологические проблемы хранения отходов теплоэлектростанций, работающих на твердом топливе // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2011. № 2. С. 252–255.
26. Боричев К.П., Орлов А.В., Путилов В.Я., Путилова И.В. Влияние золошлакоотвалов на окружающую среду // Мат-лы конф. «Экология энергетики 2000». М.: МЭИ, 2000. С. 193–197.
27. Радомский С.М., Миронюк А.Ф., Радомская В.И., Лукичев А.А. Экологические проблемы золошлакоотвала Благовещенской ТЭЦ // Экология и промышленность России. Март, 2004. С. 28–31.
28. Футорянский Л.Д. Геоэкологические критерии оптимального размещения золошлакоотвалов ТЭС в природных условиях среднего Урала / Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. геол.-минер. наук. Екатеринбург, 2008. 26 сс.
29. Оценка воздействия проектируемого золоотвала Железногорской ТЭЦ на атмосферный воздух. URL: <https://works.doklad.ru/view/mfmm0mNc7Cw.html> (дата обращения: 22.04.2025).
30. Курдов А.Г., Дмитриева В.А. Воронежское водохранилище: 30 лет спустя // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Географ. и геоэкол. 2002. № 1. С. 124–127.
31. Смирнова А.Я., Бочаров В.Л. Водные экосистемы промышленно-городских агломераций бассейна Верхнего Дона // Вестник Воронеж. ун-та. Сер.: Геология. 1997. № 3. С. 102–105.
32. Радомская В.И., Радомский С.М. Характер влияния Благовещенской ТЭЦ на окружающий ландшафт // Проблемы безопасности жизнедеятельности в техносфере // Мат-лы межрегиональной конф. молодых ученых. 2004. С. 116–117.
33. Иваныкина О.В., Журавлева Н.В. Изучение распределения тяжелых металлов в системе отходы – вода – почва для золошлаковых отвалов Кемеровской области // Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе: сб. докладов Международной науч.-практ. конф. 2008. С. 151–157.
34. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Хабаровского края в 2010 г. (под ред. В.М. Шихалева). Хабаровск, 2011. 267 с.
35. Душкова Д.О., Евсеев А.В. Анализ техногенного воздействия на геосистемы Европейского Севера России // Арктика и Север: электронное периодическое издание. 2011. № 4 (ноябрь). С. 162–195.
36. Bradley E. Sample, Glenn W. Suterr. Screening Evaluation of the Ecological Risks to Terrestrial Wildlife Associated with a Coal Ash Disposal Site. Human & Ecological Risk Assessment. 2002. Vol. 8. Issue 4. P. 637.
37. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р (ред. от 28.02.2024) «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».
38. Распоряжение Правительства РФ от 02.08.2023 № 2094-р «Об утверждении перечня видов продукции (товаров), производство которых осуществляется с использованием определенной доли вторичного сырья в их составе и в отношении которых осуществляется стимулирование деятельности по их производству, и перечня видов работ, услуг, выполнение и оказание которых осуществляется с использованием определенной доли вторичного сырья в их составе и в отношении которых осуществляется стимулирование деятельности по их выполнению».
39. Золотова И.Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС // Инновации и инвестиции. 2020. № 7. С. 123–128.
40. Кумар В., Дж. Г.К. Анализ законодательства Индии в области обращения с золошлаками энергетики // Мат-лы V конф. «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование». Москва, 24–25 апреля 2014 г. М.: Полиграфический центр МЭИ, 2014. С. 22–26.
41. Путилова . Опыт реализации проектов с использованием золошлаков ТЭС в России и за рубежом // Альтернативная энергетика и экология. 2023. № 3. С. 49–68.
42. Лесовик Г.А. О перспективах использования зол уноса в газобетоне // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. Т. 7. № 10.

43. О прогнозе развития мировой угольной промышленности. URL: [https://vk.com/wall-220176382\\_88](https://vk.com/wall-220176382_88) (дата обращения: 22.04.2025).
44. Lindon K.A. Properties and use of coal fly ash: Use of fly ash for road construction, runways and similar projects. London, 2015. 132 p.
45. Aldred J. Burj Khalifa – a new high for high-performance concrete // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. Thomas Telford Ltd, 2010. Т. 163. № 2. Р. 66–73. 5. Urban T. et al.
46. Experimental investigations on punching shear of lightweight aggregate concrete flat slabs // Engineering Structures, 2019. Т. 197. Р. 109371
47. Иванов К.С., Иванов Н.К. Использование шлаков и зол при получении газобетона // Известия вузов. Строительство. 2004. № 9 (549). С. 26–30.
48. Крашенинников О.Н., Пак А.А., Баstryгина С.В. Использование золоотходов для получения бетонов // Экология промышленного производства. 2007. № 2. С. 48–56.
49. Соловьев Л.П., Пронин В.А., Пронин С.В., Тузовская Ф.Ф. Извлечение ферромагнитных материалов из золошлаковых отходов Кузнецкой ТЭЦ // Экология и промышленность России. 2009. С. 34–35.
50. Путилов В.Я., Путилова И.В. Проблемы обращения с золошлаками ТЭС в России: барьеры, возможности и пути решения // Теплоэнергетика. 2010. № 4. С. 63–66.
51. Коваль Т.В., Айзенберг И.И. Использование в строительстве золошлаковых материалов, попутно получаемых в котлах источников системы теплоснабжения // Вестник ИрГТУ. 2010. № 5 (45). С. 94–102.
52. Ахмедов М.М., Валиев Б.С., Кадырова Г.А., Гейдаров А.А. Извлечение ванадия из золы от сжигания мазута // Химическая промышленность. 2011. № 2. С. 18–24.
53. Салихов В.А. Геолого-экономическая и экономическая (стоимостная) оценка цветных и редких металлов, содержащихся в углях и золошлаковых отходах углей // Вестник Томского гос. ун-та. Экономика. 2014. № 1 (25). С. 123–138.
54. Косарев А.С., Смолий В.А., Скориков. Оценка возможности использования золошлаковых отходов теплоэнергетики при производстве гранулированного пористого заполнителя для легких бетонов и теплоизоляционных засыпок // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 4. С. 111–117.
55. Зверева Э.Р., Плотникова В.П., Бурганова Ф.И. и др. Комплексный метод утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций // Вестник Казанского гос. энергетич. ун-та. 2019. № 2. С. 1527.
56. Сниккарс П.Н., Золотова И.Ю., Осокин Н.А. Утилизация золошлаков ТЭС как новая кросс-отраслевая задача // Энергетическая политика. 2020. № 7 (149). С. 34–45.
57. Слободчикова Н.А., Плюта К.В. Исследование возможностей применения золошлаковых материалов для строительства земляного полотна автомобильных дорог на примере Иркутской области // Сборник: Дороги и мосты. 2023. Т. 49. № 1. С. 223–237.
58. ГОСТ 25818–91. Золы уноса тепловых электростанций и бетонов. Технические условия.
59. ГОСТ 379–95. Кирпич и камни силикатные. Технические условия.
60. ГОСТ 26644–85. Щебень и песок из шлаков тепловых электростанций для бетона. Технические условия.
61. ГОСТ 28013–89. Растворы строительные. Общие технические условия.
62. ГОСТ 25592–91. Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов. Технические условия.
63. ГОСТ 25485–89. Бетоны ячеистые. Технические условия.
64. ГОСТ 21–60–84. Зола-унос для производства изделий из ячеистого бетона. Технические условия.
65. ГОСТ 9128–84. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия.

66. ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
67. ГОСТ 25607–94. Смеси щебеноочно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия.
68. Сайт компании. URL: <https://arvis.online/materials/cases/reftinskij-zavod-gazozolobetonnyh-izdelij-utiliziruet-zolu-unosa-reftinskoy-gres> (дата обращения: 22.04.2025). Производство цемента с использованием золошлаков в Иркутской области. URL: <https://arvis.online/materials/cases/optyt-ao-angarsk-cement-po-utilizaczi-zoloshlakov-tes-oao-irkutskenergo> (дата обращения: 22.04.2025).
69. Строительство транспортной развязки и надземного путепровода в Московской области с использованием золошлаковых материалов. URL: <https://arvis.online/materials/cases/utilizacziya-zoloshlakov-kashirskoy-gres> (дата обращения: 22.04.2025).
70. Строительство автодорожной развязки в Московской области с использованием золошлаковых материалов. URL: <https://arvis.online/materials/cases/utilizacziya-zoloshlakov-tecz-22-mosenergo> (дата обращения: 22.04.2025).
71. Производство минеральных добавок в строительные материалы из золошлаков в Тульской области. URL: <https://arvis.online/materials/cases/utilizacziya-psst-zsho-s-zolootvala-aleksinskoj-tecz> (дата обращения: 22.04.2025).
72. Высокотехнологичная установка по переработке золошлаков Северской ТЭЦ в Томской области. URL: <https://arvis.online/materials/presentation> (дата обращения: 22.04.2025).
73. Рекультивация нарушенных земель с применением золошлаков в Красноярском крае и Кемеровской области. URL: <https://arvis.online/materials/cases/rekultivacziya-narushennyh-zemel-s-primeneniem-zoloshlakov-optyt-sibirskoj-generiruyushhej-kompanii> (дата обращения: 22.04.2025).
74. Ремонт автомобильной дороги с использованием золошлаковых материалов в Новосибирской области. URL: <https://arvis.online/materials/cases/remont-dorogi-s-primeneniem-zoloshlakov-barabinskoy-tecz-sibirskaya-generiruyushhaya-kompaniya> (дата обращения: 22.04.2025).
75. Производство строительных материалов с использованием золы уноса в Омской области. URL: <https://arvis.online/materials/publications> (дата обращения: 22.04.2025).
76. Изготовление алюмосиликатных микросфер из золошлаков в Кемеровской области. URL: <https://arvis.online/materials/cases/izgotovlenie-alyumosilikatnyh-mikrosfer-iz-zoloshlakov-belovskoj-gres> (дата обращения: 22.04.2025).
77. Производство рулонных гидроизоляционных материалов с использованием золы уноса в Кемеровской области. URL: <https://arvis.online/materials/cases/zavod-tehnofleks-ispolzuet-zolu-unosa-v-proizvodstve-rulonnyh-gidroizolyaczionnyh-materialov> (дата обращения: 22.04.2025).
78. Отходов угольных электростанций к производству строительных материалов. URL: <https://energopolis.ru/ot-othodov-ugolnyh-elektrostancij-k-proizvodstvu-stroitelnyh-materialov/ugol/2021/14/28/?ysclid=m6zg0bcnqr766128983> (дата обращения: 22.04.2025).

## References

1. Melentyev V.A. (1978) *Zoloshlakovye materialy* [Ash and slag materials. V.A. Melentyev] *Energiya* [Energy]. Moscow. 255 P.
2. Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R., Dobronravov A.D., Shamsutdinov E.V. (2015) *Kompleksnoe ispol'zovanie zoloshlakovoykh otkhodov* [Complex use of ash and slag waste] *Izv. vuzov. Problemy energetiki* [News of Universities. Problems of Energy]. No. 7–8. P. 26–36.
3. Cherepanov A.A., Kardash V.T. (2009) *Kompleksnaya pererabotka zoloshlakovoykh otkhodov TETs (rezul'taty laboratornykh i polupromyshlennykh ispytaniy)* [Complex processing of ash and slag waste of thermal power plants (results of laboratory and pilot tests)] *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana* [Geology and useful minerals of the World Ocean]. No. 2. P. 98–115.
4. Putilin E.I., Tsvetkov V.S. (2003) *Primenenie zol unosa i zoloshlakovoykh smesey pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog: obzornaya informatsiya* [Information on the use of fly ash and ash-slag mixtures in the construction of highways: overview information] *Gos. sluzhba dor. khoz-va Min-va transporta RF* [State road service of the Ministry of Transport of the Russian Federation. Information center for highways]. Moscow. 60 P.

5. Shubov L.Ya., Skobelev K.D., Zagorskaya D.A. (2019) *Vtorichnye resursy, obrazuyushchiesya v sfere teploenergetiki* [Secondary resources generated in the field of thermal power engineering] *Entsiklopediya tekhnologiy. Evolyutsiya i srovnitel'nyy analiz resursnoy effektivnosti promyshlennykh tekhnologiy, pod red. D.O. Skobeleva, FGAU «NII «TsEP» Renome* [In the Encyclopedia of technologies. Evolution and comparative analysis of resource efficiency of industrial technologies. Ed. by D.O. Skobelev, FGAU «Research Institute» «Renome»]. P. 649–669 of 824 p.
6. GOST 32347–2013. *Ugli kamennye i antratsity Kuznetskogo i Gorlovskogo basseynov dlya energeticheskikh tseley. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 32347-2013 «Hard coals and anthracites of the Kuznetsk and Gorlovsky basins for energy purposes. Technical conditions»].
7. Mal'chik A.G., Litovkin S.V., Radionov P.V. (2016) *Issledovanie tekhnologii pererabotki zoloshlakovykh otkhodov TES pri proizvodstve stroitel'nykh materialov* [Study of the technology of processing ash and slag waste of thermal power plants in the production of building materials] *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies]. No. 3–1. P. 60–64.
8. Karmanova A.M. (2015) *Issledovanie zoloshlakovykh otkhodov Tomskoy GRES-2 kak materiala dlya utilizatsii* [Study of ash and slag waste of Tomsk GRES-2 as a material for disposal] *XXI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Sovremennye tekhnika i tekhnologii». Sektsiya 1: Ustoychivaya energetika* [XXI International Scientific Conference «Modern Engineering and Technology». Section 1: Sustainable Energy]. P. 75–77.
9. Bizhanov A.M., Makavetzkas A.R. (2024) *Rudougleodnye brikety na osnove produktov pererabotki* [Ore-carbon briquettes based on processed products] *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry]. No. 4. P. 43–49.
10. Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Shumilova L.V., Nomokonova T.S. (2023) *Tekhnologiya pererabotki i obogashcheniya zoloshlakovykh otkhodov* [Technology of processing and enrichment of ash and slag waste] *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. No. 10. P. 122–135.
11. Parfenova L.M., Bozylev V.V., Shvedov A.P., Vysotskaya M.N. (2016) *Rezhimy i sposoby aktivatsii zoloshlakovykh otkhodov teploelektrostantsiy* [Modes and methods of activating ash and slag waste from thermal power plants] *Vestnik Polotskogo gos. un-ta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series F: Construction. Applied Sciences]. No. 8. P. 57–60
12. Lebedev V.V., Ruban V.A., Shpirt M.Ya. (1980) *Kompleksnoe ispol'zovanie ugley* [Complex use of coals] *Nedra* [Nedra]. Moscow. 239 P.
13. Taskin A.V. (2018) *Khimiko-tehnologicheskie resheniya kompleksnoy pererabotki zoloshlakovykh otkhodov promyshlennosti* [Chemical-technological solutions for the complex processing of ash and slag waste from industry] *Avtoref. dis. na soiskanie uch. st. kand. khim. nauk. Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet»* [Abstract of the dissertation for the degree of candidate of chemical sciences. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Far Eastern Federal University»]. Vladivostok. 208 P.
14. GOST 25818–91. *Mezhgosudarstvennyy standart. Zoly unosa teplovykh elektrostantsiy dlya betonov. Tekhnicheskie usloviya. Data vvedeniya: 1991-07-01* [GOST 25818-91. Interstate standard. Fly ash from thermal power plants for concrete. Technical conditions (date of access 01-07-1991)].
15. *Rukovodstvo po proektirovaniyu zoloootvalov teplovykh elektricheskikh stantsii* [Guide to the design of ash dumps of thermal power plants] *Energiya* [Energy]. 1974. 134 P.
16. Sysoev Yu.M., Kuznetsov G.I. (1982) *Proektirovaniye i stroitel'stvo zoloootvalov* [Design and construction of ash dumps] *Nauka* [Nauka]. 243 P.
17. RD 153-34.0-02.106–98. *Metodika raschetnoy otsenki vetrovoy erozii i pyleniya zoloootvala TES. OAO «UralORGRES»* [RD 153-34.0-02.106-98. Methodology for calculating the assessment of wind erosion and dusting of ash dumps of thermal power plants. JSC UralORGRES]. Ekaterinburg. 1998.
18. Kucherov Yu.N. (2000) *Osnovnye problemy i napravleniya razvitiya elektroenergetiki Rossii* [The main problems and directions of development of the electric power industry of Russia] *Ekologiya energetiki 2000: mat-ly mezdunarodnoy nauch.-prakt. konf. MEI* [Ecology of Energy 2000: materials of the international. scientific and practical conference MPEI]. Moscow. P. 14–21.
19. Cherentsova A.A. (2011) *K voprosu ob otsenke vozdeystviya zoloootvala Khabarovskoy TETs-3 na pochvennyy pokrov* [On the assessment of the impact of the ash dump of Khabarovsk CHPP-3 on the soil cover] *Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment (elektronnyy nauchnyy zhurnal)* [Economy and environmental management (electronic scientific journal)]. Issue. No. 2 (September). 2011. P. 6.

20. Cherentsova A.A., Mayorova L.P. (2013) *Problemy i perspektivy utilizatsii zoloshlakovykh otkhodov* [Problems and prospects of ash and slag waste utilization]. Khabarovsk. TOGU. 111 P.
21. Cherentsova A.A., Mayorova L.P. (2015) *Vliyanie poligonov zakhoroneniya zoloshlakovykh otkhodov teploelektrostantsiy na okruzhayushchuyu sredu (na primere Khabarovskoy TETs-3)* [Impact of ash and slag waste disposal sites of thermal power plants on the environment (on the example of Khabarovsk CHPP-3)] *Vestnik Tikhookeanskogo gos. un-ta* [Bulletin of the Pacific State University]. No. 3. P. 49–58.
22. Cherentsova A.A. (2012) *Otsenka vliyaniya zolootvala Khabarovskoy TETs-3 na komponenty okruzhayushchey sredy* [Assessment of the impact of the ash dump of Khabarovsk TPP-3 on environmental components] *Uchenye zametki. TOGU* [Scientific notes. TOGU]. V. 3. No. 1. P. 29–42
23. Larionova N.A. (2015) *Otsenka vliyaniya zolootvalov na zagryaznenie okruzhayushchey sredy* [Assessment of the impact of ash dumps on environmental pollution] *Mat-ly 9-y Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Analiz, progonz i upravlenie prirodnymi riskami v sovremennom mire («Georisk-2015»)* [Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference. Analysis, Forecast and Management of Natural Risks in the Modern World (Georisk-2015)]. P. 297–302
24. Bocharov V.L., Kramarev P.N., Strogonova L.N. (2005) *Geoekologicheskie aspekty prognoza izmeneniya okruzhayushchey sredy v rayonakh poligonov zakhoroneniya zoloshlakovykh otkhodov elektrostantsiy* [Geoecological aspects of forecasting environmental changes in the areas of ash and slag waste disposal sites of power plants] *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Seriya: geologiya* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology]. No. 1. P. 233–239.
25. Shaikhutdinova A.A., Meshcheryakov A.G., Nemereshina O.N. (2011) *Ekologicheskie problemy khraneniya otkhodov teploelektrostantsiy, rabotayushchikh na tverdom toplive* [Environmental problems of storing waste from thermal power plants operating on solid fuel] *Intellekt. Innovatsii Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. No. 2. P. 252–255.
26. Borichev K.P., Orlov A.V., Putilov V.Ya., Putilova I.V. (2000) *Vliyanie zoloshlakootvalov na okruzhayushchuyu sredu* [Impact of ash dumps on the environment Proceedings] *Mat-ly konf. «Ekologiya energetiki 2000»* [Conference «Ecology of Energy 2000】 MEI [MEI]. Moscow. P. 193–197.
27. Radomsky S.M., Mironyuk A.F., Radomskaya V.I., Lukichev A.A. (2004) *Ekologicheskie problemy zoloshlakootvala Blagoveshchenskoy TETs* [Environmental problems of the ash dump of the Blagoveshchenskaya TPP] *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. March 2004. P. 28–31.
28. Futoryansky, L.D. (2008) *Geoekologicheskie kriterii optimal'nogo razmeshcheniya zoloshlakootvalov TES v prirodnnykh usloviyakh srednego Urala* [Geoecological criteria for the optimal placement of ash dumps of TPPs in the natural conditions of the Middle Ural] *Avtoref. dis. na soiskanie uch. st. kand. geol.-miner. nauk* [Abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Geological and Mineral Sciences]. Ekaterinburg. 26 P.
29. *Otsenka vozdeystviya proektiruemogo zolootvala Zheleznogorskoy TETs na atmosfernyy vozdukh* [Assessment of the impact of the designed ash disposal site of Zheleznogorsk TPP on the atmospheric air]. Available at: <https://works.doklad.ru/view/mfmm0mNc7Cw.html>.
30. Kurdov A.G., Dmitrieva V.A. (2002) *Voronezhskoe vodokhranilishche: 30 let spustya* [Voronezh Reservoir: 30 years later] *Vestnik Voronezh. gos. un-ta. Ser.: Geograf. i geoekol.* [Bulletin of Voronezh state University. Series: Geogr. and Geoecol.]. No. 1. P. 124–127.
31. Smirnova A.Ya., Bocharov V.L. (1997) *Vodnye ekosistemy promyshlenno-gorodskikh aglomeratsiy basseyna Verkhnego Dona* [Aquatic ecosystems of industrial and urban agglomerations of the Upper Don basin] *Vestnik Voronezh. un-ta. Ser.: Geologiya* [Bulletin of Voronezh. University. Series: Geology]. No. 3. P. 102–105.
32. Radomskaya V.I., Radomsky S.M. (2004) *Kharakter vliyaniya Blagoveshchenskoy TETs na okruzhayushchiy landshaft* [The nature of the influence of the Blagoveshchenskaya TPP on the surrounding landscape] *Problemy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti v tekhnosfere. Mat-ly mezhregional'noy konf. molodykh uchenykh* [Problems of life safety in the technosphere: materials of the interregional conference of young scientists]. P. 116–117.
33. Ivanykina O.V., Zhuravleva N.V. (2008) *Izuchenie raspredeleniya tyazhelykh metallov v sisteme otkhody–voda–pochva dlya zoloshlakovykh otvalov Kemerovskoy oblasti* [Study of the distribution of heavy metals in the waste-water-soil system for ash and slag dumps of the Kemerovo region] *Upravlenie otkhodami – osnova vosstanovleniya ekologicheskogo ravnovesiya v Kuzbasse: sb. dokladov Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf.* [Waste management – the basis for restoring the ecological balance in Kuzbass: collection of reports of the International scientific and practical conference]. P. 151–157.

34. *Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Khabarovskogo kraya v 2010 g. (pod red. V.M. Shikhaleva)* [State report on the state and protection of the environment of Khabarovsk Krai in 2010 (ed. V.M. Shikhalev)]. Khabarovsk. 2011. 267 P.
35. Dushkova D.O., Evseev A.V. (2011) *Analiz tekhnogennogo vozdeystviya na geosistemy Evropeyskogo Severa Rossii* [Analysis of technogenic impact on geosystems of the European North of Russia] *Arktika i Sever: elektronnoe periodicheskoe izdanie* [Arctic and North: electronic periodical publication]. No. 4 (November). P. 162–195.
36. Bradley E. Sample, Glenn W. Suterr (2002) Screening Evaluation of the Ecological Risks to Terrestrial Wildlife Associated with a Coal Ash Disposal Site. *Human & Ecological Risk Assessment*. Vol. 8. Issue 4. P. 637.
37. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 09.06.2020 No. 1523-r (red. ot 28.02.2024) «Ob utverzhdenii Energeticheskoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda»* [Order of the Government of the Russian Federation of 09.06.2020 No. 1523-r (as amended on 28.02.2024) «On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035»].
38. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 02.08.2023 No. 2094-r «Ob utverzhdenii perechnya vidov produktov (tovarov), proizvodstvo kotorikh osushchestvlyaetsya s ispol'zovaniem opredelennoy doli vtorichnogo syr'ya v ikh sostave i v otnoshenii kotorikh osushchestvlyaetsya stimulirovaniye deyatel'nosti po ikh proizvodstvu, i perechnya vidov rabot, uslug, vypolnenie i okazanie kotorikh osushchestvlyaetsya s ispol'zovaniem opredelennoy doli vtorichnogo syr'ya v ikh sostave i v otnoshenii kotorikh osushchestvlyaetsya stimulirovaniye deyatel'nosti po ikh vypolneniyu»* [Order of the Government of the Russian Federation of 02.08.2023 No. 2094-r «On approval of the list of types of products (goods), the production of which is carried out using a certain share of secondary raw materials in their composition and in relation to which incentives are provided for their production, and the list of types of works, services, the performance and provision of which is carried out using a certain share of secondary raw materials in their composition and in relation to which incentives are provided for their performance»].
39. Zolotova I.Yu. (2020) *Benchmarking zarubezhnogo opyta utilizatsii produktov szhiganiya tverdogo topliva ugol'nykh TES* [Benchmarking of foreign experience in the disposal of solid fuel combustion products of coal-fired thermal power plants] *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments]. No. 7. P. 123–128.
40. Kumar V., Jha G.K. (2014) *Analiz zakonodatel'stva Indii v oblasti obrashcheniya s zoloshlakami energetiki* [Analysis of Indian legislation in the field of energy ash and slag handling] *Mat-ly V konf. «Zoloshlaki TES: udalenie, transport, pererabotka, skladirovaniye»*. Moskva, 24–25 aprelya 2014 g. *Poligraficheskiy tsentr MEI* [Proceedings of the V conference «TPP ash and slag: removal, transportation, processing, storage». Moscow. April 24–25, 2014. MPEI Printing Center]. Moscow. P. 22–26.
41. Putilova I.V. (2023) *Opyt realizatsii proektor s ispol'zovaniem zoloshlakov TES v Rossii i za rubezhom* [Experience in implementing projects using TPP ash and slag in Russia and abroad] *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy and ecology]. No. 3. P. 49–68.
42. Lesovik G.A., Lesovik R.V., Klyuev S.V., Wenxiu Xiao, Xuan Zhang (2022) *O perspektivakh ispol'zovaniya zol-unosa v gazobetone* [On the Prospects of Using Fly Ash in Aerated Concrete] *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. Vol. 7. No. 10.
43. *O prognoze razvitiya mirovoy ugol'noy promyshlennosti* [On the Forecast of the Development of the Global Coal Industry]. Available at: [https://vk.com/wall-220176382\\_88](https://vk.com/wall-220176382_88).
44. Lindon K.A. (2015) Properties and use of coal fly ash: Use of fly ash for road construction, runways and similar projects. London. 132 p.
45. Aldred J. (2010) Burj Khalifa – a new high for high-performance concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*. Thomas Telford Ltd. Vol. 163. No. 2. P. 66–73. 5. Urban T. et al.
46. Experimental investigations on punching shear of lightweight aggregate concrete flat slabs. *Engineering Structures*, 2019. Vol. 197. P. 109371.
47. Ivanov K.S., Ivanov N.K. (2004) *Ispol'zovanie shlakov i zol pri poluchenii gazobetona* [Use of slags and ashes in the production of aerated concrete] *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Construction]. No. 9 (549). P. 26–30.

48. Krasheninnikov O.N., Pak A.A., Bastrygina S.V. (2007) *Ispol'zovanie zolootkhodov dlya polucheniya betonov* [Use of ash waste for the production of concrete] *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of industrial production]. No. 2. P. 48–56.
49. Soloviev L.P., Pronin V.A., Pronin S.V., Tuzovskaya F.F. (2009) *Izvlechenie ferromagnitnykh materialov iz zoloshlakovykh otkhodov Kuznetskoy TETs* [Extraction of ferromagnetic materials from ash and slag waste of the Kuznetsk CHPP] *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia]. P. 34–35.
50. Putilov V.Ya., Putilova I.V. (2010) *Problemy obrashcheniya s zoloshlakami TES v Rossii: bar'ery, vozmozhnosti i puti resheniya* [Problems of handling ash and slag from thermal power plants in Russia: barriers, opportunities and solutions] *Teploenergetika* [Thermal power engineering]. No. 4. P. 63–66.
51. Koval T.V., Aizenberg I.I. (2010) *Ispol'zovanie v stroitel'stve zoloshlakovykh materialov, poputno poluchаемых в котлах источников системы теплоснабжения* [Use in construction of ash and slag materials produced in boilers of heat supply system sources] *Vestnik IrGTU* [Bulletin of IrSTU]. No. 5(45). P. 94–102.
52. Akhmedov M.M., Valiev B.S., Kadyrova G.A., Geydarov A.A. (2011) *Izvlechenie vanadiya iz zoly ot szhiganiya mazuta* [Extraction of vanadium from ash from fuel oil combustion] *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry]. No. 2. P. 18–24.
53. Salikhov V.A. (2014) *Geologo-ekonomiceskaya i ekonomiceskaya (stoimostnaya) otsenka tsvetnykh i redkikh metallov, soderzhashchikhся v uglyakh i zoloshlakovykh otkhodakh ugley* [Geological, economic and economic (cost) assessment of non-ferrous and rare metals contained in coals and coal ash and slag waste] *Vestnik Tomskogo gos. un-ta* [Ekonomika Bulletin of Tomsk State University. Economics]. No. 1 (25). P. 123–138.
54. Kosarev A.S., Smoliv V.A., Skorikov (2018) *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya zoloshlakovykh otkhodov teploenergetiki pri proizvodstve granulirovannogo poristogo zapolnitelya dlya legkikh betonov i teploizolyatsionnykh zasypok* [Assessment of the possibility of using ash and slag waste of thermal power engineering in the production of granulated porous filler for lightweight concrete and thermal insulation backfill] *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of universities. North Caucasus region. Technical sciences]. No. 4. P. 111–117.
55. Zvereva E.R., Plotnikova V.P., Burganova F.I., et al. (2019) *Kompleksnyy metod utilizatsii zoloshlakovykh otkhodov teplovykh elektrostantsiy* [Integrated method for recycling ash and slag waste of thermal power plants] *Vestnik Kazanskogo gos. energetich. un-ta* [Bulletin of Kazan State Power Engineering University]. No. 2. P. 1527.
56. Snikkars P.N., Zolotova I.Yu., Osokin N.A. (2020) *Utilizatsiya zoloshlakov TES kak novaya krossotraslevaya zadacha* [Utilization of ash and slag from thermal power plants as a new cross-sectoral task] *Energeticheskaya politika* [Energy policy]. No. 7 (149). P. 34–45.
57. Slobodchikova N.A., Plyuta K.V. (2023) *Issledovanie vozmozhnostey primeneniya zoloshlakovykh materialov dlya stroitel'stva zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog na primere Irkutskoy oblasti* [Study of the possibilities of using ash and slag materials for the construction of roadbeds on the example of the Irkutsk region] *Sbornik: Dorogi i mosty* [Collection «Roads and Bridges»]. Vol. 49. No. 1. P. 223–237.
58. GOST 25818–91. *Zoly unosa teplovykh elektrostantsiy i betonov. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 25818-91. Fly ash from thermal power plants and concrete. Specifications].
59. GOST 379–95. *Kirpich i kamni silikatnye. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 379–95. Sand-lime bricks and stones. Specifications].
60. GOST 26644–85. *Shcheben' i pesok iz shlakov teplovykh elektrostantsiy dlya betona. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 26644–85. Crushed stone and sand from slags of thermal power plants for concrete. Specifications].
61. GOST 28013–89. *Rastvory stroitel'nye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST 28013–89. Building mortars. General specifications].
62. GOST 25592–91. *Smesi zoloshlakovye teplovykh elektrostantsiy dlya betonov. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 25592-91. Ash and slag mixtures of thermal power plants for concrete. Specifications].
63. GOST 25485–89. *Betony yacheistye. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 25485–89. Cellular concretes. Specifications].
64. GOST 21–60–84. *Zola-unos dlya proizvodstva izdeliy iz yacheistogo betona. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 21–60–84. Fly ash for the production of cellular concrete products. Specifications].

65. *GOST 9128–84. Smesi asfal'tobetonne dorozhnye, aerodromnye i asfal'tobeton. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 9128–84. Asphalt concrete mixtures for roads, airfields and asphalt concrete. Specifications].
66. *GOST 8267–93. Shcheben' i graviy iz plotnykh gornykh porod dlya stroitel'nykh rabot. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 8267–93. Crushed stone and gravel from dense rocks for construction work. Technical conditions].
67. *GOST 25607–94. Smesi shchebenochno-graviyno-peschanye dlya pokrytiy i osnovaniy avtomobil'nykh dorog i aerodromov. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 25607–94. Crushed stone-gravel-sand mixtures for pavements and bases of highways and airfields. Technical conditions].
68. *Sayt kompanii* [Company website]. *Proizvodstvo tsementa s ispol'zovaniem zoloshlakov v Irkutskoy oblasti* [Cement production using ash and slag in the Irkutsk region]. Available at: <https://arvis.online/materials/cases/opyt-ao-angarskcement-po-utilizaczii-zoloshlakov-tes-oao-irkutskenergo>.
69. *Stroitel'stvo transportnoy razvyazki i nadzemnogo puteprovoda v Moskovskoy oblasti s ispol'zovaniem zoloshlakovykh materialov* [Construction of a transport interchange and an overpass in the Moscow region using ash and slag materials]. Available at: <https://arvis.online/materials/cases/utilizacziya-zoloshlakov-kashirskoj-gres>.
70. *Stroitel'stvo avtodorozhnoy razvyazki v Moskovskoy oblasti s ispol'zovaniem zoloshlakovykh materialov* [Construction of a road junction in the Moscow region using ash and slag materials]. Available at: <https://arvis.online/materials/cases/utilizacziya-zoloshlakov-tecz-22-mosenergo>.
71. *Proizvodstvo mineral'nykh dobavok v stroitel'nye materialy iz zoloshlakov v Tul'skoy oblasti* [Production of mineral additives in building materials from ash and slag in the Tula region]. Available at: <https://arvis.online/materials/cases/utilizacziya-psst-zsho-s-zoloootvala-aleksinskoj-tecz>.
72. *Vysokotekhnologichnaya ustanovka po pererabotke zoloshlakov Severskoy TETs v Tomskoy oblasti* [High-tech installation for processing ash and slag of the Severskaya TPP in the Tomsk region]. Available at: <https://arvis.online/materials/presentations>.
73. *Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' s primeneniem zoloshlakov v Krasnoyarskoy krae i Kemerovskoy oblasti* [Reclamation of disturbed lands using ash and slag in the Krasnoyarsk region and the Kemerovo region]. Available at: <https://arvis.online/materials/cases/rekultivacziya-narushennyh-zemel-s-primeneniem-zoloshlakov-opyt-sibirskoj-generiruyushhej-kompanii>.
74. *Remont avtomobil'noy dorogi s ispol'zovaniem zoloshlakovykh materialov v Novosibirskoy oblasti* [Road repair using ash and slag materials in Novosibirsk region]. Available at: <https://arvis.online/materials/cases/remont-dorogi-s-primeneniem-zoloshlakov-barabinskoy-tecz-sibirskaya-generiruyushhaya-kompaniya>.
75. *Proizvodstvo stroitel'nykh materialov s ispol'zovaniem zolyunosa v Omskoy oblasti* [Production of building materials using fly ash in Omsk region]. Available at: <https://arvis.online/materials/publications>.
76. *Izgotovlenie alyumosilikatnykh mikrosfer iz zoloshlakov v Kemerovskoy oblasti* [Production of aluminosilicate microspheres from ash and slag in Kemerovo region]. Available at: <https://arvis.online/materials/cases/izgotovlenie-alyumosilikatnyh-mikrosfer-iz-zoloshlakov-belovskoj-gres>.
77. *Proizvodstvo rulonnykh gidroizolyatsionnykh materialov s ispol'zovaniem zoly-unosa v Kemerovskoy oblasti* [Production of rolled waterproofing materials using fly ash in the Kemerovo region]. Available at: <https://arvis.online/materials/cases/zavod-tehnofleks-ispolzuet-zolu-unosa-v-proizvodstve-rulonnyh-gidroizolyaczionnyh-materialov>.
78. *Ot otkhodov ugel'nykh elektrostantsiy k proizvodstvu stroitel'nykh materialov* [From coal power plant waste to the production of building materials]. Available at: <https://energopolis.ru/ot-othodov-ugolnyh-elektrostancij-k-proizvodstvu-stroitelnyh-materialov/ugol/2021/14/28/?ysclid=m6zg0bcnqr766128983>.