

Научная статья
УДК 666.952.2
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477>
EDN: UCKIEN



НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЗОЛОШЛАКА И ЗОЛЫ-УНОСА ОТ СЖИГАНИЯ ЭКИБАСТУЗСКИХ УГЛЕЙ

В.В. Сиротюк

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
sirvv@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. По данным Минприроды России, сейчас в стране образуется 22–25 млн т ЗШО в год, утилизируется до 10%. Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1557-р от 15 июня 2022 г. утвержден «Комплексный план по увеличению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности». Экибастузские угли являются самыми высокозольными топливными углями, используемыми на ТЭС в РФ. Свойства золы-уноса и золошлаков зависят от вида сжигаемого топлива – его минеральной части (пустой породы), а также других технологических особенностей процессов приготовления, сжигания, улавливания и удаления материалов. Именно поэтому свойства этих материалов следует рассматривать в увязке с конкретным топливом.

Методы и материалы. Объектом исследования послужила зола-уноса и золошлак, полученные при сжигании экибастузских углей на российских ТЭС. С помощью методов физико-химического анализа изучен химико-минералогический состав, определены физические свойства и экологические параметры этих материалов.

Результаты. В результате проведенных исследований установлены химический, минералогический и фазовый составы золы-уноса и золошлака экибастузских углей. Выявлены специфические особенности физических свойств и установлены причины, обуславливающие их формирование. Получены уточненные данные об экологических характеристиках золы-уноса и золошлака.

Заключение. Экибастузские угли характеризуются наиболее высокой зольностью среди всех топливных углей, достигающей 45%, что обуславливает необходимость активного вовлечения ЗШО в строительную индустрию страны. Для эффективного применения ЗУ и ЗШЛ, образующихся при сжигании этих углей, требуется учитывать ряд специфических свойств. Зола-уноса экибастузских углей, характеризуясь сверхкислым химическим составом, не проявляет свойств, присущих минеральным вяжущим веществам. Однако ЗУ, полученная методом сухого улавливания, обладает способностью вступать во взаимодействие с продуктами гидролиза минеральных вяжущих и вовлекаться в процессы гидратации, что указывает на её потенциальную активность в составе строительных композитов. Каолинит, доминирующий в минералогическом составе пустой породы экибастузского угля с ограниченным присутствием плавней, обуславливает необходимость высоких температур для модификации и термоактивации минеральной составляющей. Эта особенность оказывает непосредственное влияние на фазовый состав образующейся ЗУ и ЗШЛ, определяя их характеристики и свойства. Диссоциация минералов в тонкоизмельченном угле стимулирует формирование как закрытой, так и открытой микропористости в зольных частицах. Этот процесс приводит к существенному увеличению их удельной поверхности и химической активности, определяя физические свойства ЗУ и ЗШЛ. Шлаковая составляющая от сжигания экибастузских углей нагревается только до стадии спекания, но не плавления. Это предопределяет пониженную плотность и механические показатели ЗШЛ. Экибастузские угли характеризуются повышенным содержанием фюзена в органической части. Петрографические характеристики данной органической массы предопределяют повышенную устойчивость углистых остатков к агрессивным воздействиям. Радиоактивность экибастузских ЗУ и ЗШЛ не превышает допустимый предел для отнесения их к I классу опасности по удельной эффективной активности ЕРН. Экибастузским ЗШО присвоен V класс опасности для окружающей природной среды, определяющий её как практически неопасные отходы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: золошлак, зола-уноса, экибастузские угли, химический, минералогический, фазовый состав, углистые остатки, физические свойства, экологические показатели

Статья поступила в редакцию 21.04.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 16.06.2025.

© Сиротюк В.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Сиротюк В.В. некоторые особенности состава и свойств золошлака и золы-уноса от сжигания экибастузских углей // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 460-477. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477>

EDN: UCKIEN

SOME FEATURES OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF ASH SLAG AND FLY ASH FROM THE BURNING OF EKIBASTUZ COALS

Viktor V. Sirotyuk

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia
sirvv@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. According to the Russian Ministry of Natural Resources, the country currently generates 22-25 million tons of fly ash and slag waste per year, and up to 10% is disposed. By the Government Order of the Russian Federation No. 1557-p dated June 15, 2022, the "Comprehensive Plan for increasing the volume of ash and slag waste disposal of hazard class V" was approved. Ekibastuz coals are the highest ash fuel coals used at thermal power plants in the Russian Federation. The properties of fly ash and ash slags depend on the type of fuel being burned - its mineral part (overburden), as well as other technological features of the processes of preparation, combustion, capture and disposal of materials. That is why the properties of these materials should be considered in relation to a specific fuel.

Methods and materials. The object of the study was fly ash and ash slag obtained by the combustion of Ekibastuz coals at Russian thermal power plants. With the use of physical and chemical analysis methods, the chemical and mineralogical composition was studied, the physical properties and environmental parameters of these materials were determined.

Results. As a result of the conducted research, the chemical, mineralogical and phase composition of fly ash and ash slag of Ekibastuz coals have been established. The specific features of physical properties have been identified and the causes of their formation have been identified. Specified data on the environmental characteristics of fly ash and ash slag have been obtained.

Conclusion. Ekibastuz coals are characterized by the highest ash content among all fuel coals, reaching 45%, which necessitates the active involvement of ash and slag wastes in the country's construction industry. A number of specific properties must be taken into account for the effective use of fly ash and ash slag formed during the combustion of these coals. The fly ash of Ekibastuz coals, characterized by a superacid chemical composition, does not demonstrate the properties inherent in mineral binders. However, the fly ash obtained by dry capture has the ability to interact with hydrolysis products of mineral binders and be involved in hydration processes, which indicates its potential activity in building composites. Kaolinite, which dominates the mineralogical composition of the Ekibastuz coal rock with a limited presence of fluxes, necessitates high temperatures for modification and thermal activation of the mineral component. This feature has a direct effect on the phase composition of the formed fly ash and ash slag, determining their characteristics and properties. The dissociation of minerals in finely ground coal stimulates the formation of both closed and open microporosity in ash particles. This process leads to a significant increase in their specific surface area and chemical activity, determining the physical properties of fly ash and ash slag. The slag component from the burning of Ekibastuz coals is heated only to the sintering stage, but not melting. This determines the reduced density and mechanical properties of the ash slag. Ekibastuz coals are characterized by a high content of fusain in the organic part. The petrographic characteristics of this organic mass determine the increased resistance of carbonaceous residues to aggressive influences. The radioactivity of the Ekibastuz fly ash and ash slag does not exceed the permissible limit for classifying them to the 1-st hazard class according to the specific effective activity of the latter. Ekibastuz ash and slag wastes have been assigned the V-th hazard class for the environment, defining it as practically non-hazardous waste.

© Sirotyuk V.V., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

KEYWORDS: ash slag, fly ash, Ekibastuz coals, chemical, mineralogical, phase composition, carbonaceous residues, physical properties, environmental indicators

The article was submitted: April 21, 2025; approved after reviewing: May 27, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Sirotiyuk V.V. Some features of the composition and properties of ash slag and fly ash from the burning of Ekibastuz coals. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 460-477. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477>

ВВЕДЕНИЕ

По данным Минприроды России, сейчас в стране образуется 22–25 млн т ЗШО в год, утилизируется до 10% (для сравнения: в Китае около 400 млн т в год, утилизируется около 70%).

Государство, осознавая потенциал этого ресурса, закрепило стратегический курс в Распоряжении Правительства Российской Федерации № 1557-р от 15 июня 2022 г. Этот «Комплексный план по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности», рассчитанный до 2035 г., задаёт амбициозные ориентиры: к 2024 г. – 15%, а к 2035 г. – уже 50% утилизации от ежегодного объема образования ЗШО ТЭС.

Научные исследования по проблеме утилизации золошлаков (ЗШЛ) ведутся в нашей стране с конца 20-х годов 20-го века^{1,2}. В США, Франции, Германии исследования зол начались с 30-х годов прошлого века, тогда же возник и термин – зола-уноса (ЗУ). В основном эти исследования были нацелены на выявление вяжущих свойств зол. Тем не менее до настоящего времени нет чётких общепринятых определений компонентов ЗШО.

Согласно ГОСТ 25818: зола-уноса – это мелкая, состоящая преимущественно из шарообразных стекловидных частиц пыль, образующаяся при сгорании мелко смолотого угля и обладающая пуццолановыми свойствами и/или гидравлической активностью.

Иное определение даёт ГОСТ Р 57789: зола (зола сухого удаления) – это тонкодисперсный материал с размером частиц менее 0,315 мм

(основную фракцию составляют частицы с размером 0,08 мм), образующийся из минеральной части твердого топлива, сжигаемого в пылевидном состоянии, и улавливаемый золоулавливающими устройствами из дымовых газов тепловых электростанций.

В соответствии с приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) № 1887 от 15.12.2016 Об утверждении информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигание отходов))» (ИТС 15–2016): зола-уноса – это несгорающий остаток с зернами мельче 0,16 мм, образующийся из минеральных примесей топлива при полном его сгорании и осаждаемый из дымовых газов золоулавливающими устройствами.

Исходя из вышеприведённых определений, следует:

- если зола не обладает пуццолановыми свойствами и/или гидравлической активностью, то это уже не ЗУ;
- зола на ТЭС не улавливается, или улавливается мокрыми золоулавливателями (например, скрубберами Вентури), то это уже не ЗУ;
- топливо сгорело не полностью, то это уже не ЗУ.

По нашему мнению, более точное определение содержится в стандартах ASTM C 618–23³ и AASHTO M 295⁴ (общепризнанных в США, Канаде, Европе, Австралии, Новой Зеландии): зола-уноса (зола) – это тонкодисперсный остаток от сгорания топлива из его мине-

¹ Суровцев В.В. Золы и шлаки как сырьё для производства стройматериалов. М., Ленинград: Госстройиздат, 1933. 62 с.

² Розенблит С.М. Строительные материалы из сланцевой золы. М., Ленинград: Гизместпром, 1939. 280 с.

³ ASTM C618–23 Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (Стандартная спецификация на угольную золу и сырой или обожжённый природный пуццолан для использования в бетоне). <https://standards.globalspec.com/std/14622241/astm-c618-23> (дата обращения 19.04.2025).

⁴ AASHTO M 295 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (Стандартная спецификация на угольную золу-уноса и сырой или обожжённый природный пуццолан для использования в бетоне). <https://standards.globalspec.com/std/13344845/aashto-m-295> (дата обращения 19.04.2025).

ральных примесей, содержащийся в дымовом газе во взвешенном состоянии. Ограничения по размерам трудноосуществимы и уместны только для рекомендаций по её использованию в том или ином направлении.

Топливный шлак – это грубодисперсный остаток от сгорания топлива из его минеральных примесей, выпадающий и агрегирующий в нижней части топочного пространства тепловых агрегатов (котлов) и удаляющийся в жидком (расплав) или твёрдом состоянии.

Золошлак (ЗШЛ, золошлаковая смесь – ЗШС) – это материал, образующийся при смешении топливного шлака и золы-уноса в произвольных пропорциях. Чаще всего это смешение происходит в багерных насосных ТЭС с образованием пульпы, перекачиваемой в золоотвал. На ТЭС встречаются системы сухого удаления и хранения ЗШО (Рефтинская ГРЭС). Как правило, ЗУ составляет не менее 80% от объёма ЗШЛ, образующегося на ТЭС.

Следует пояснить, почему данная статья посвящена результатам исследования ЗУ и ЗШЛ от сжигания топливных углей Экибастузского месторождения.

Как известно^{5, 6} [1], свойства ЗШО тесно связаны с природой сжигаемого топлива – с составом его минеральной части (пустой породы), а также с нюансами технологий подготовки, сжигания, улавливания и удаления ЗШО. Поэтому свойства ЗУ и ЗШЛ следует рассматривать в неразрывной связи с конкретным видом топлива.

Экибастузский угольный бассейн расположен в Павлодарской области Казахстана⁷. Он уникален по углеплотности (150 млн т/км²), его площадь составляет 155 км². Угли каменные, ресурсы 12 млрд т. В недрах залегает 6 пластов угля, из которых три верхних образуют сложный угольный горизонт мощностью до 200 м и максимальной глубиной залегания подошвы 690 м. Угли гумусовые, высокозольные (зольность 20–50%), труднообогатимые, малосернистые (1–5%), слабоспекающиеся,

с теплотой сгорания 14–19 МДж/кг, средних стадий метаморфизма (марка СС). Содержат повышенное количество глинозёма (Al_2O_3 до 40%). Добыча экибастузского угля производится открытым способом, роторными экскаваторами (рисунок 1) [2], что предопределяет низкую себестоимость этих углей.



Рисунок 1 – Угольный разрез «Богатырь» [2]

Figure 1 – Bogatyr coal mine [2]

На этом угле работают девять электростанций Казахстана. Около 40% добытого угля идёт в РФ на ряд мощных ТЭС, в том числе на Рефтинскую, Троицкую, Серовскую ГРЭС, Омские ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5. Потребление этого самого высокозольного угля в РФ снижается, тем не менее при его сжигании и сейчас образуется около 9 млн т ЗШО в год [2].

ЦЕЛЬ ДАННОЙ РАБОТЫ: обобщить результаты наших исследований и некоторых публикаций по составу и свойствам ЗУ и ЗШЛ от сжигания на ТЭС каменных углей Экибастузского месторождения.

ЗАДАЧИ: установить отличительные особенности состава и свойств ЗУ и ЗШЛ экибастузских углей: химико-минералогический и фазовый составы; физические и экологические свойства. Рекомендовать области возможного применения этих материалов в строительной отрасли.

⁵ Путилин Е.И. Применение золы-уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог // Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. Союздорнии. М., 2003. 61 с.

⁶ Физико-химические исследования золы-уноса из топки с псевдоожиженным слоем при сжигании фрезерного торфа / Плышевский С.В. [и др.] // Тепло и массообмен. 2014. Минск: Институт тепло и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2015. С. 30–35.

⁷ Сиротюк В.В. О гидравлической активности Экибастузской золы-уноса / В.В. Сиротюк, А.Т. Пуртова, Н.М. Зорина // Меж. вуз. сб. «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог в условиях Сибири». Новосибирск, НИСИ, 1978. С.112–115.

Таблица 1⁸
Химический состав золошлаков некоторых топливных каменных углей

Table 1⁸
Chemical composition of ash slag of some fuel coals

Угольный бассейн	Химический состав, % по массе									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO _{св}	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	п.п.п
Экибастузский	54–66	21–30	2–8	0,3–3,6	0,5–1,0	0,1–1,5	0,3–1,4	0,1–0,6	0,1–2,0	0,3–5,0
Кузнецкий	35–60	16–32	6–18	2,0–6,0	1,0–2,0	0,2–3,0	0,2–5,0	0,5–2,0	0,2–1,8	0,5–22
Донецкий	35–58	12–32	7–18	2,0–6,0	1,5–2,0	0,2–3,0	1,5–5,0	0,5–2,0	0,2–3,0	0,5–22

ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химико-минералогический состав ЗШЛ от сжигания экибастузских углей отличается от состава других топливных углей РФ (таблица 1).

Отличительной особенностью этих золошлаков является сравнительная однородность химического состава и пониженное содержание окислов – плавней: Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, значительно снижающих температурные границы фазовых превращений.

Вопросам классификации ЗУ и ЗШЛ на основе их химического состава посвящены работы многих исследователей, среди которых следует отметить Н.А. Попова, Н.А. Иванова, Г.Н. Книгину и М.В. Балахнина, Е.А. Галибину, А.В. Волженского и В.Н. Виноградова, В.А. Мелентьева, а также научные коллективы УралВТИ и ВНИИСТРОМ. Ключевым критерием, определяющим вязущие свойства золы

и шлака, признано наличие окиси кальция, представленного как в свободном, так и в химически связанном состоянии.

Помимо этого, оценку ЗУ и ЗШЛ производят, опираясь на следующие критерии:

- модуль основности M_o , который представляет собой отношение суммы основных оксидов к сумме кислотных оксидов: $M_o = (CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / (SiO_2 + Al_2O_3)$;

- силикатный (кремнеземистый) модуль $M_c = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$;

- модуль плавкости $M_n = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / (SiO_2 + Al_2O_3)$;

- коэффициент качества K , показывающий отношение оксидов, повышающих гидравлическую активность к оксидам, снижающим ее: $K = (CaO + Al_2O_3 + MgO) / (SiO_2 + TiO_2)$.

Значения этих критериев для рассматриваемых материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2
Критерии, зависящие от химического состава золошлаков
Источник: составлено автором с учётом⁹

Table 2
Criteria depending on the chemical composition of ash slag
Source: compiled by the author taking into account⁹

Угольный бассейн	Усреднённые показатели					Средняя плавкость, °C			Модуль плавкости, M_n
	M_o	M_c	K	CaO _{общ}	CaO _{своб}	Начало деформации	Начало размягчения	Жидкое состояние	
Экибастузский	0,06	1,97	0,48	1,95	0,75	1350	1500	1750	0,11
Кузнецкий	0,15	1,32	0,64	4,00	1,50	1150	1270	1370	0,32
Донецкий	0,17	1,35	0,62	4,00	1,75	1130	1240	1350	0,36

⁸ ОСТ 34-70-542–2001 Зола-уноса тепловых электростанций. Нормативные характеристики. М., 2001. 14 с.

⁹ Там же.

Таблица 3¹⁰

Классификация топливных отходов от сжигания твёрдого топлива

Table 3¹⁰

Classification of fuel waste from solid fuel combustion

Химические свойства		Золошлаковые материалы		
		активные	скрытоактивные	инертные
Показатели качества	M _о	0,5–2,8	0,1–0,5	<0,1
	M _с	1,5–7,8	1,4–3,6	1,3–3,2
	K	1,0–3,6	0,5–1,5	0,4–0,9
Содержание форм кальция	CaO _{общ}	20–60	5–20	0,5–5
	CaO _{своб}	0–30	0–2	0–1
	CaO _{сульф}	0,5–9	0,2–2	0,1–1,6
	CaO _{карб}	15–45	5–15	0–5
Возможные области использования		Самоотвердеющий материал. Местное вяжущее, изделия на его основе, преимущественно автоклавного твердения. Дорожное строительство	Требуется интенсификация твердения. Производство изделий, твердеющих при тепловой обработке с активизаторами. Дорожное строительство	Сырьё для производства кирпича, зольного гравия. Техногенный грунт. Дорожное строительство

УралВТИ предложена классификация топливных отходов, в которой по показателям качества проводится разделение на активные, скрытоактивные и инертные разновидности (таблица 3¹¹).

На первый взгляд, экибастузская ЗУ является типичным представителем инертных материалов, лишенных пуццоланических свойств. Однако это далеко не так. Пуццоланические реакции с участием этой ЗУ сухого улавливания приводят к образованию гидросиликатов кальция (C-S-H) и гидроалюминатов кальция, а щелочная активация золы – к образованию алюмосиликатных гелей^{12,13} [3, 4, 5]. Это объясняется особенностями минералогии минеральной составляющей экибастузского угля

и формированием фазового состава этой ЗУ при термоактивации в котлоагрегатах ТЭС. Золошлаки из отвалов после гидроудаления практически лишены свойств пуццоланов.

В минералогическом составе глинистого вещества экибастузского угля содержится значительное количество каолинита $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$, имеющего повышенную температуру плавления – примерно 1750 °С, и низкое значение модуля плавкости (см. таблицу 2).

По данным рентгенофазового анализа^{14,15,16} [6], минеральная часть экибастузских углей представлена следующими компонентами (мас. %): каолинит – 53–58, кварц – 25–30, сидерит – 8–10, кальцит – 4–6, гипс – 1–2 и магнезит – 0,5–1,5.

¹⁰ Путилин Е.И. Применение золы-уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог // Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. Союздорнии. М., 2003. 61 с.

¹¹ Там же.

¹² Сиротюк В.В. О гидравлической активности Экибастузской золы-уноса ... С.112–115.

¹³ Потапов С.О., Свиридова М.Н., Танутров И.Н. Физико-химические свойства золы-уноса от сжигания экибастузских углей // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: Труды научно-практич. конф. с международным участием (3–5 июня 2015 г., Екатеринбург) / РАН, УрО, Ин-т металлургии, РАН, Ин-т металлургии им. А. А. Байкова. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2015. С. 332–335.

¹⁴ Нефедьева Л.П. Петрографический состав и условия образования угольных пластов Экибастузского каменноугольного месторождения: автореф... дис. на соиск. учен. степ. канд. геол.-минерал. наук / М-во высш. образования СССР. Ленингр. ордена Ленина и Труд. Красного Знамени горный ин-т. Ленинград, 1954. 19 с.

¹⁵ Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 5. Угольные бассейны и месторождения Казахстана. Книга 1. Бассейны и месторождения палеозойского возраста. М: Недра, 1973. 720 с.

¹⁶ Вдовенко М.И. Минеральная часть энергетических углей (физико-химическое исследование). Алма-Ата Казахской ССР: Наука, 1973. 256 с.

Таблица 4
Фазовый состав золы-уноса различных топливных углей
Источник: составлено автором.

Table 4
Phase composition of fly ash of various fuel coals
Source: compiled by the author.

Уголь, из которого получена зола	Фазовый состав ЗУ, %			
	Аморфизированное глинистое вещество	Стекло различных оттенков	Оплавленный кварц	Углистые вещества
Экибастузский	40–60	15–35	5–10	2–10
Кузнецкий	20–30	50–75	5–15	4–12
Донецкий	5–10	60–85	4–10	5–12

Глинистое вещество углей Кузнецкого и Донецкого бассейнов отличается сложным и разнообразным минеральным составом, включающим иллит, серицит, монтмориллонит, каолинит, а в редких случаях – галлуазит¹⁷. Характерной особенностью химического состава золы этих углей является повышенное содержание оксидов-плавней, что обуславливает относительно невысокие температуры размягчения и перехода золошлака в жидкоплавкое состояние, при температурах 1300–1350 °С.

Важнейшим фактором, определяющим фазовый состав ЗУ, служит процесс её термической обработки, или пироактивации. Термическое разложение глинистого вещества протекает поэтапно¹⁸:

- удаление адсорбционной воды происходит в диапазоне температур 80–160 °С;
- «коллоидная» усадка, связанная с удалением физически связанной воды, наблюдается при 200–300 °С;
- дегидратация глинистого вещества приводит к образованию метакАОлина при температурах от 450 °С и выше;
- частичное остеклование частиц происходит, начиная с 700–800 °С.

При дальнейшем повышении температуры происходит частичное или полное разрушение метакАОлина с образованием смеси кремнезёма и γ-глинозёма, а также, возможно, силлиманита ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), который при температуре более 1200 °С превращается в муллит (от $Al_6Si_2O_{13}$ до Al_4SiO_8). Следует учитывать, что

при определённых условиях, таких как соответствующий состав сопутствующей породы, температура, размеры и время пребывания зольных частиц в зоне высоких температур метакАОлин может полностью не разрушаться, а переходить непосредственно в метакАОлиновое стекло. В ядре топливных форсунок котлоагрегатов ТЭС температура газов достигает 1400–1700 °С, однако время пребывания угольной пыли в этой зоне составляет всего 2–4 сек.

Сопоставление представленных данных позволяет объяснить различия в фазовом составе рассматриваемых ЗУ (таблица 4).

Петрографический и рентгеноструктурный анализы ЗУ экибастузских углей свидетельствуют о присутствии в их составе метакАОлинита и метанакрита, чья кристаллическая решетка, хотя и подверглась искажению и аморфизации, все же сохранила свою первоначальную структуру, вызывая дифракцию рентгеновских лучей¹⁹. Данное обстоятельство представляет собой значительный интерес как в теоретическом, так и в практическом аспекте, поскольку наличие метакАОлина в золах других топливных углей остается предметом дискуссий и зачастую оспаривается²⁰.

Основываясь на проведенных исследованиях и анализе литературных данных, автором предложена уточненная классификация ЗУ в качестве компонентов вяжущих веществ, представленная в таблице 5.

¹⁷ Минеральное сырьё. Уголь. / В.А. Косинский, Е.И. Поляковская [и др.] // Справочник. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997. 63 с.

¹⁸ Эйтель В. Физическая химия силикатов. М.: Иностранная литература, 1962. 1055 с.

¹⁹ Сиротюк В.В. О гидравлической активности Экибастузской золы-уноса ... С.112–115.

²⁰ Его же. Физическая химия силикатов ... 1055 с.

Таблица 5
Классификация золы-уноса
Источник: составлено автором.

Table 5
Classification of fly ash
Source: compiled by the author.

Группа	Вид	Разновидность	Основные характеристики по химическому составу, %			
			CaO+MgO	SiO ₂ +Al ₂ O ₃	FeO+Fe ₂ O ₃ +R ₂ O	SO ₃
I	Высококальциевые	Высокосульфатные (IA)	≥20	≥60	-	≥5
		Низкосульфатные (IB)	≥20	≥60	-	<5
II	Низкокальциевые	Кислые (IIA)	<20	≤80	≥10	-
		Сверхкислые (IIB)	<10	>80	<10	-

В основу данной классификации положена система, разработанная под руководством профессора А.В. Волженского²¹, что позволяет обеспечить преемственность и научную обоснованность подхода. Разделение низкокальциевых ЗУ на кислые и сверхкислые, основанное на их химическом составе, напрямую обуславливает различия в их фазовом составе (см. таблицу 4), определяя тем самым их физико-химические свойства.

УГЛИСТЫЕ ОСТАТКИ

Содержание остатков несгоревшего топлива, неизменно присутствующих в ЗУ и ЗШЛ, варьируется в зависимости от типа угля, конструкции котлоагрегата и режимов сжигания. Количественная оценка этих остатков производится посредством определения потерь при прокаливании (п.п.п, см. таблицу 1).

Углистые остатки, формирующиеся в ЗУ после выгорания органической составляющей экибастузских углей, обладают составом и свойствами, отличными от характеристик, присущих многим другим топливным углям [7].

Всё богатство петрографической картины углей для удобства анализа, может быть сведено к двум фундаментальным группам: витреновой и фюзеновой, с существованием промежуточных форм^{22, 23}. Витренизированные микрокомпоненты представляют собой

потенциальную угрозу, проявляя агрессивность и склонность к нестабильности. Теплоэнергетическая отрасль Сибири опирается главным образом на угольные ресурсы Кузнецкого, Экибастузского и Канско-Ачинского бассейнов [8]. Угли Кузбасса демонстрируют широкий спектр петрографических характеристик, охватывающий переход от фюзеновых к витреновым типам. Канско-Ачинский бурый уголь характеризуется преобладанием витрена. Отличительной особенностью петрографического состава экибастузских углей является повышенное содержание фюзена и высокая зольность, достигающая 45%. Следовательно, принимая во внимание петрографические особенности органической массы и устойчивость углистых остатков, можно заключить, что ЗУ экибастузских углей обладают наиболее благоприятными характеристиками²⁴ [9, 10] как компоненты вяжущего и строительных смесей.

В процессе сгорания угольных частиц происходит увеличение удельной поверхности как углеродистых (коксовых) остатков, так и зольных частиц, возрастающее в 4–8 раз (рисунок 3). Данный эффект обусловлен удалением летучих органических микроэлементов из угольной структуры в ходе термического разложения. Частицы коксового остатка поризованы (рисунок 2).

²¹ Бетоны и изделия из шлаковых и зольных материалов / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, Б.Н. Виноградов, К.В. Гладких; под общ. ред. А.В. Волженского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1969. 392 с.

²² Жемчужников Ю.А. Общая геология ископаемых углей. М.: Геоиздат, 1948. 344 с.

²³ Гапеев А.А. Твёрдое горючее ископаемое. М.: Геоиздат, 1949. 298 с.

²⁴ Иванов Н.А. Лёгкие бетоны на основе зол электростанций. М.: Стройиздат, 1972. 136 с.



Рисунок 2 – Микрофотография частиц коксового остатка из золы-уноса (шлиф, ув. X 300)
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Micrography of coke residue particles from fly ash (thin section, scale 1:300)
Source: compiled by the author.



Рисунок 3 – Действительная удельная поверхность частиц (по методу БЭТ):
1 – экибастузский уголь; 2 – канско-ачинский; 3 – кузнецкий
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Actual specific surface area of particles (according to the BET method):
1 – Ekibastuz coal; 2 – Kansk-Achinsk; 3 – Kuznetsk
Source: compiled by the author

Несмотря на значительное увеличение удельной поверхности частиц после термического воздействия, содержание растворимой части в углистых (коксовых) остатках уменьшается в несколько раз (рисунок 4).

Это объясняет повышение стойкости и стабильности свойств углистого вещества в экибастузских ЗУ после термообработки.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Значительные термические воздействия на минеральную часть углей приводят к измене-

нию формы зольных частиц. Большинство из них приобретают округлые формы (рисунок 5).

Основным помольным оборудованием на ТЭС являются шаровые и молотковые мельницы. Эти агрегаты обеспечивают тонкий помол угля, при котором остаток на сите с ячейкой 008 составляет всего 5–10%. Преобладающая фракция угольных частиц, достигающая 60–80%, имеет размеры в диапазоне 10–15 мкм, что критически важно для эффективного сжигания и передачи энергии.

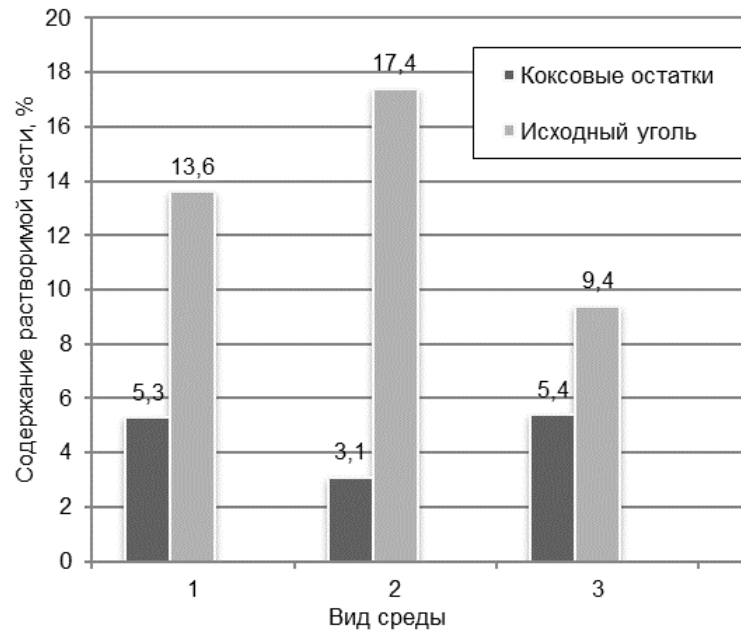


Рисунок 4 – Содержание растворимой части (экибастузский уголь):
1 – нейтральная среда; 2 – кислая; 3 – щелочная
Источник: составлено автором.

Figure 4 – The content of the soluble part (Ekibastuz coal):
1 – neutral medium; 2 – acidic; 3 – alkaline
Source: compiled by the author.

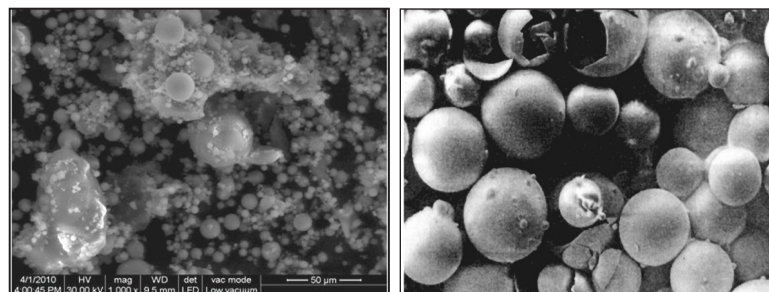


Рисунок 5 – Типичный вид золы-уноса
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Typical type of fly ash
Source: compiled by the author.

Для защиты окружающей среды и снижения воздействия на атмосферу каждая ТЭС оснащена многоступенчатой системой золоулавливания. Эти системы, включающие циклоны (сухие и мокрые скрубберы), электрофильтры и рукавные фильтры, демонстрируют высокую эффективность, улавливая до 98% золы, увлекаемой дымовыми газами. Особого внимания заслуживают многопольные электрофильтры, позволяющие осуществлять отбор сухой золы-уноса, разделенной по фракциям в зависимости от поля фильтрации. Таким об-

разом, на первом поле задерживаются более крупные частицы, а на последних – самые мелкодисперсные.

Для детального изучения зернового состава ЗУ применялся метод седиментационного анализа на весах Фигуровского, где в качестве дисперсионной среды использовался спирт. Дополнительно проводился анализ с использованием световой микроскопии (рисунок 6), что позволяло визуально оценить морфологию и размеры частиц.

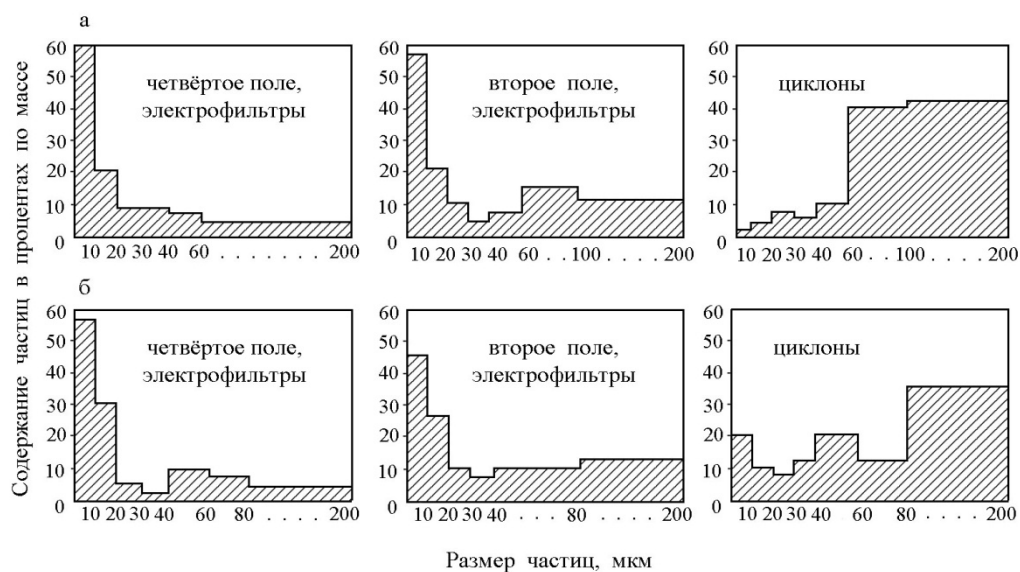


Рисунок 6 – Зерновой состав золы-уноса:
а – микроскопический анализ; б – седиментационный анализ
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Particle composition of fly ash:
a – microscopic analysis; б – sedimentation analysis
Source: compiled by the author.

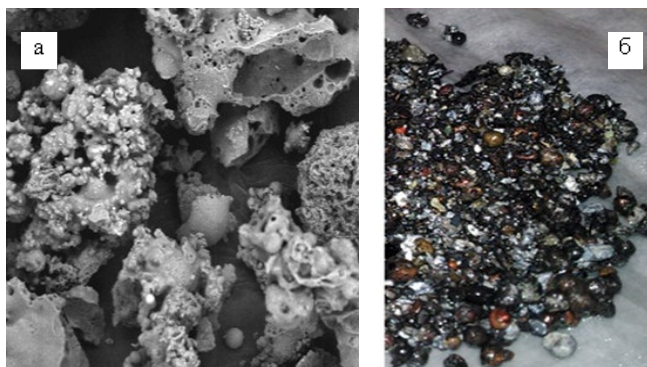


Рисунок 7 – Топливный шлак:
а – пористые спечённые агрегаты при твёрдом шлакоудалении;
б – плотный гранулированный шлак при жидком шлакоудалении
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Fuel slag:
a – porous sintered aggregates during solid slag removal;
b – dense granular slag during liquid slag removal
Source: compiled by the author.

Таблица 6

Гранулометрический состав ЗШС в золоотвалах ТЭС

Источник: составлено автором.

Table 6

Granulometric composition of ash and slag compounds in ash dumps of thermal power plants

Source: compiled by the author.

Уголь, из которого получен золошлак	Процентное содержание фракции, мм					
	>10	10,00–2,00	2,00–0,50	0,50–0,25	0,25–0,04	<0,04
Донецкий (жидкое шлакоудаление)	8–12	20–27	4–7	1–4	20–25	30–34
Экибастузский (твёрдое шлакоудаления)	2–3	3–4	2–4	5–8	65–70	17–25

Несмотря на разные методики определений, основанные на различных физических принципах, данные этих анализов неплохо согласуются. Подавляющее большинство частиц ЗУ, отобранных с электрофильтров, имеют размеры менее 20 мкм (до 85%). В циклонах отлагается более крупная зола – 60–200 мкм (до 70%). При этом следует иметь в виду, что зерновой состав ЗУ может меняться даже в течение суток в зависимости от режимов работы котлов и т.п.

Шлаковые частицы в ЗШО могут быть получены при двух разных системах образования и удаления шлака: шлак, получаемый в системе с твёрдым шлакоудалением, или в системе жидкого шлакоудаления (рисунок 7).

Первая разновидность (рисунок 7, а), как правило, имеет губчатую структуру, образованную диффузией кислорода в процессе горения как к поверхности частицы, так и внутрь частицы после образования на её поверхности стекловидной оболочки.

Шлаковые частицы из системы жидкого шлакоудаления котлоагрегата переходят в расплав, затем резко охлаждаются в воде, гранулируясь в зёрна почти без пор с гладкой стекловидной поверхностью и острыми краями (рисунок 7, б). За счёт этого материал отличается минимальным водопоглощением и имеет более высокую прочность на сжатие.

Многие современные котлоагрегаты работают при высоких температурах, обеспечивающих плавление части золы и жидкое шлакоудаление. Однако, как было указано ранее, золы-уноса экибастузских углей имеют очень высокую температуру плавления, поэтому золы-частицы спекаются в шлаковые агре-

гаты, но не плавятся полностью. Шлак имеет высокую пористость и низкую прочность, при транспортировке на километры в виде пульпы по стальным трубопроводам этот шлак дезагрегируется. Следовательно, в золоотвалах ТЭС, работающих на экибастузском угле, содержание крупной шлаковой фракции в ЗШЛ невелико (таблица 6).

Кроме того, испытания показали, что содержание шлаковых частиц по длине намыва в золоотвалах ТЭС, сжигающих экибастузский уголь, уменьшается в соответствии с зависимостью [11]:

$$\Pi = \Pi_{\text{ш}} \cdot e^{-232 \frac{l}{L}},$$

где Π – содержание шлака в точке по длине намыва, в долях от единицы; $\Pi_{\text{ш}}$ – содержание шлака в месте выпуска пульпы, в долях от единицы; e – число Эйлера; l – расстояние от выпуска пульпы до точки определения содержания шлака, м; L – расстояние от выпуска пульпы до водоприёмного колодца в отвале, м.

Наиболее крупная часть ЗШЛ откладывается на расстоянии до 100 м от выпусков пульпопроводов.

Исследования показали, что после уплотнения золошлаковой смеси, содержащей существенное количество зёрен пористого шлака в слоях земляного полотна и оснований дорожных одежд, изменяется её зерновой состав. Слабые зёрна шлака дробятся, содержание более мелких фракций увеличивается. В качестве примера на рисунке 8 приведён зерновой состав одной пробы золошлаковой смеси до и после её уплотнения.

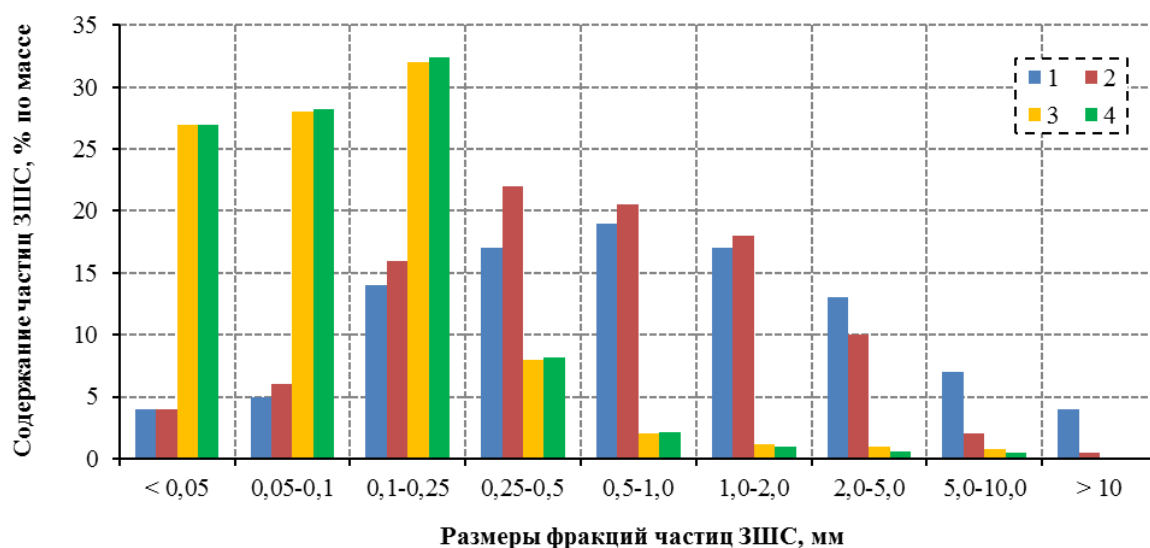


Рисунок 8 – Изменение зернового состава ЗШС после уплотнения:
1, 2 – до и после уплотнения крупнозернистой ЗШС;
3, 4 – до и после уплотнения мелкозернистой ЗШС
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Change in the particle composition of ash and slag compounds after compaction:
1, 2 – before and after compaction of coarse-grained ash and slag compounds;
3, 4 – before and after compaction of fine-grained ash and slag compounds
Source: compiled by the author.

В крупнозернистых ЗШС существенно уменьшается содержание шлаковых зёрен крупнее 0,25 мм. В мелкозернистых ЗШС зерновой состав почти не меняется. Такая особенность не характерна для ЗШС с плотным шлаком. Это следует учитывать при уплотнении ЗШС тяжёлыми катками.

На основании изложенного можно сделать вывод, что зерновой состав и все, сопряжённые с этим показателем физические и механические свойства, ЗУ и ЗШЛ существенно меняются в зависимости от многих труднопрогнозируемых факторов.

Дисперсность порошкообразных материалов часто характеризуется не только зерновым составом, но и величиной удельной поверхности, определяемой по воздухопроницаемости. Удельная поверхность образцов ЗУ, измеренная на приборах типа ПСХ, обычно варьируется в диапазоне от 2000 до 5000 см²/г в зависимости от электростанции, места отбора пробы, типа сжигаемого угля и других технологических параметров. Удельная поверхность ЗУ, образующейся при сжигании

экибастузского угля, определяемая по воздухопроницаемости, может достигать 7000 см²/г.

Однако метод воздухопроницаемости не отражает истинные значения удельной поверхности ЗУ. Это связано с физическими принципами, лежащими в основе метода, а именно с обтеканием воздуха вокруг поверхности частиц. Для более точного определения удельной поверхности частиц ЗУ, обладающих микропористой структурой, целесообразно использовать сорбционные методы (таблица 7).

Столь значительная действительная величина удельной поверхности объясняется наличием в остеклованных зольных частицах микропористости, которая объясняется газовыделениями при нагревании частиц во время сгорания топлива, когда минеральный материал частиц переходит в пиропластическое состояние. Отмеченное обстоятельство имеет практическую значимость, поскольку с ним связаны такие свойства ЗУ и ЗШЛ, как гигроскопичность, водопотребность, химическая и физическая активность, теплопроводность.

Таблица 7

Удельная поверхность золы-уноса

Источник: составлено автором.

Table 7

Specific surface area of fly ash

Source: compiled by the author.

Вид сжигаемого угля	Зольность угля, % по массе	Удельная поверхность, см ² /г	
		по воздухопроницаемости	по десорбции аргона (БЭТ)
Экибастузский	30–45	2000–7000	25000–65000
Кузнецкий	12–20	2000–5000	12000–40000
Канско-Ачинский	6–15	1500–4500	9000–13000
Портландцемент	-	3200–4000	3900–4700

Таблица 8

Значения плотности золошлаков

Источник: составлено автором.

Table 8

Ash and slag density values

Source: compiled by the author.

Граничные значения плотности ЗШС, г/см ³	Насыпная плотность	Плотность (естественного сложения)	Плотность скелета (естественного сложения)	Агрегатная плотность	Истинная плотность
	0,5–1,2	1,1–1,8	0,8–1,5	1,9–2,5	2,3–2,7

Существует мнение, что повышенная действительная удельная поверхность ЗУ и их гигроскопичность объясняется наличием углистых остатков (п.п.п.). Однако наши исследования [7] не подтверждают эту закономерность.

Плотность ЗУ и ЗШЛ обычно меньше, чем плотность природных минеральных грунтов. При этом следует различать несколько показателей: плотность, насыпную плотность, плотность скелета, агрегатную плотность, истинную плотность зольных частиц (таблица 8).

Введение двух понятий – агрегатная плотность и истинная плотность – имеет для рассматриваемых материалов определённый физический смысл, поскольку многие частицы имеют микропоры, заполненные газообразной фазой, что зачастую искажает величину истинной плотности этих материалов.

Истинная плотность топливных гранулированных шлаков обычно составляет 2,6–3,1 г/см³, насыпная плотность – 1100–1300 кг/м³, пористость – 5–15%. Пористого шлака при твёрдом шлакоудалении – 2,0–2,5 г/см³ и 850–1000 кг/м³, соответственно, пористость 30–40%. Истинная

плотность ЗУ экибастузских углей составляет 1700–2400 кг/м³, насыпная плотность – 600–700 кг/м³. Это объясняет, почему плотность ЗШЛ с гранулированным шлаком на 15–25% больше, чем со шлаком, не прошедшим стадию расплава и грануляции.

Водные свойства представляют собой сложный комплекс характеристик, включающий водостойчивость, влагоёмкость, водоотдачу, водопроницаемость и другие физические свойства дисперсных материалов, определяемые их взаимодействием с водой. Характерные влажности для ЗШЛ представлены в таблице 9.

ЗШЛ экибастузских углей обладают значениями характерных влажностей ближе к верхней границе, указанной в таблице 9. Значительная дисперсность и микропористость ЗУ и ЗШЛ предопределяют значения характерных влажностей выше, чем у большинства порошкообразных материалов и природных грунтов. Поэтому зачастую введение ЗУ повышает нормальную густоту, водоцементное отношение, оптимальную влажность композитных материалов.

Таблица 9
Характерные значения влажности для золошлака
Источник: составлено автором.

Table 9
Typical moisture values for ash slag
Source: compiled by the author.

Гигроскопическая влажность W_r	Максимальная гигроскопическая влажность W_{mg}	Максимальная молекулярная влагоёмкость W_{mng}	Оптимальная влажность W_{opt}	Капиллярная влажность W_{kap}	Полная влагоёмкость W_{pw}
0,5–2,5	2,0–4,0	9–30	10–45	15–45	25–75

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

За рубежом вопрос о безопасности золошлаковых отходов (ЗШО) тепловых электростанций (ТЭС) давно получил однозначное разрешение. В мировой практике ЗШО повсеместно классифицируются как неопасные материалы, а термин «токсичные» в отношении них не применяется [11].

В Российской Федерации оценка опасности золошлаков для окружающей природной среды осуществляется на основании отнесения их к определённом классу опасности. Данная классификация базируется на расчётном методе, верифицированном посредством биологического тестирования и дополнительного контроля удельной эффективной активности природных радионуклидов ($A_{эфф}$, Бк/кг). Следует отметить, что удельная радиоактивность золошлаковых отходов возрастает по мере выгорания угля и уменьшения размеров частиц. Вследствие этого летучая зола, выбрасываемая через дымовые трубы, демонстрирует несколько более высокую радиоактивность по сравнению с золой, улавливаемой фильтрами электростанций [12].

Оценку свойств радиоактивности производили для образцов ЗУ и золошлака с помощью бета-гамма-спектрометрического комплекса, в соответствии с требованиями СанПиН 2.6.1.2523–09 («НРБ 99/2009») ²⁵ и СП 2.6.1.2612–10 ²⁶.

Результаты исследования экибастузских зол показали [2, 13, 14], что уровни радиоактивности значительно ниже порогового значения, необходимого для присвоения I класса опасности по удельной эффективной активности ЕРН (до 370 Бк/кг). Это свидетельствует о пригодности данного материала для использования во всех видах строительства без каких-либо ограничений.

Определение опасности для окружающей природной среды выполняли на основе биотестирования водных вытяжек из ЗУ. Присвоение класса опасности проводили на основе оценки выживаемости двух культур гидробионтов – *Paramecium caudatum* и *Ceriodaphnia affinis* при разной концентрации раствора водной вытяжки: для смесей *Daphnia magna* Straus – согласно ФР.1.39.2007.03222 ²⁷, а для *Scenedesmus quadricauda* – согласно ФР.1.39.2007.03223 ²⁸.

Оценка класса опасности ЗШО для окружающей среды выявила, что водные вытяжки из всех исследованных образцов не оказывают существенного негативного воздействия на жизнедеятельность культур гидробионтов. На основании полученных данных экибастузским золошлаковым отходам присвоен V класс опасности, что соответствует практически неопасным отходам.

²⁵ Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523–09. <https://spb-institute.ru/upload/iblock/270/270770159d23e4b414abc8cf07cbc52f.pdf> (дата обращения 19.04.2025)

²⁶ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612–10. https://stroychik.ru/wp-content/uploads/2020/04/osporb_cp2-6-1-2612-10.pdf (дата обращения 19.04.2025)

²⁷ ФР 1.39.2007.03222 Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний: Федеральный реестр. М.: АКВАРОС, 2007. 51 с.

²⁸ ФР 1.39.2007.03223 Биологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. Федеральный реестр. М.: АКВАРОС. 20 с.

ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ-УНОСА И ЗОЛОШЛАКОВ ОТ СЖИГАНИЯ ЭКИБАСТУЗСКИХ УГЛЕЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Результаты экспериментально-теоретических исследований, опытно-производственного строительства и мониторинга, отечественного и зарубежного опыта, требований нормативно-методических документов позволяют рекомендовать направления применения ЗУ и ЗШЛ от сжигания на ТЭС экибастузских углей в строительной отрасли. При этом основное внимание мы уделяем крупнотоннажному использованию этих материалов.

ЗШЛ (ЗШС) рекомендуется использовать в качестве техногенного грунта:

- для сооружения насыпей земляного полотна дорог всех технических категорий;
- для вертикальных планировок территорий и площадок;
- для строительства укрепленных оснований дорожных одежд;
- при рекультивации полигонов с отходами.

ЗШЛ (ЗШС) рекомендуется использовать в качестве минеральной гранулометрической добавки без изменения химического и минералогического состава, желательно с подготовкой путем сепарации или измельчения:

- при изготовлении тяжелых, легких, ячеистых бетонов и строительных растворов;
- при изготовлении смесей щебёночно-гравийно-песчаных и грунтов, обработанных неорганическими вяжущими материалами;
- при изготовлении керамических и силикатных кирпичей и блоков;
- в качестве сырья для производства искусственных пористых заполнителей.

ЗУ сухого улавливания рекомендуется использовать в качестве активной минеральной добавки, обладающей пуццоланической активностью:

- для производства комплексных минеральных вяжущих (КМВ);
- при изготовлении смесей щебёночно-гравийно-песчаных и грунтов, обработанных неорганическими вяжущими материалами;
- при изготовлении всех видов бетонов, растворов и сухих смесей (наибольшую эффективность ЗУ проявляет при пропаривании изделий).

При этом следует учитывать следующее обстоятельство: составы и свойства ЗШЛ меняются по простиранию и глубине золоотвалов, а ЗУ – от режимов работы котлоагрегатов и систем улавливая золы. Поэтому оптималь-

ное содержание ЗШЛ и ЗУ во всех видах смесей устанавливают в результате подбора составов на конкретных материалах при условии обеспечения требуемых показателей качества материалов, изделий и конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экибастузские угли, используемые на ТЭС Российской Федерации, характеризуются наиболее высокой зольностью среди топливных углей, достигающей 45%. В результате их сжигания образуется значительное количество ЗШО, что обуславливает необходимость их активного вовлечения в строительную индустрию страны. Для обеспечения эффективного применения ЗУ и ЗШЛ, образующейся при сжигании этих углей, требуется учитывать ряд специфических свойств, присущих этим материалам.

2. Зола-уноса экибастузских углей, характеризуясь сверхкислым химическим составом, не проявляет свойств, присущих минеральным вяжущим веществам. Однако ЗУ, полученная методом сухого улавливания, обладает способностью вступать во взаимодействие с продуктами гидролиза минеральных вяжущих и, таким образом, вовлекаться в процессы гидратации, что указывает на её потенциальную активность в составе строительных композитов.

3. Каолинит, доминирующий в минералогическом составе пустой породы экибастузского угля, в сочетании с ограниченным присутствием плавней, обуславливает необходимость высоких температур для модификации и термоактивации минеральной составляющей. Эта особенность оказывает непосредственное влияние на фазовый состав образующейся ЗУ и ЗШЛ, определяя их характеристики и свойства.

4. Диссоциация минералов в тонкоизмельченном угле стимулирует формирование как закрытой, так и открытой микропористости в зольных частицах. Этот процесс приводит к существенному увеличению их удельной поверхности и химической активности, определяя физические свойства ЗУ и ЗШЛ.

5. Шлаковая составляющая от сжигания экибастузских углей нагревается только до стадии спекания, но не плавления. Это предопределяет пониженную плотность и механические показатели ЗШЛ [2].

6. Экибастузские угли, характеризующиеся повышенным содержанием фюзена, в органической части. Это предопределяют повышенную устойчивость данных углистых остатков к агрессивным воздействиям.

7. Исследования показали, что радиоактивность экибастузских ЗУ и ЗШЛ не превышает допустимый предел для отнесения их к I классу опасности по удельной эффективной активности ЕРН. Экибастузским золошлаком присвоен V класс опасности для окружающей природной среды, определяющий её как практически неопасные отходы.

8. ЗШЛ экибастузских углей могут применяться в строительной отрасли в качестве техногенного грунта и в качестве минеральной гранулометрической добавки в бетонах и растворах. ЗУ сухого улавливания рекомендуется использовать в качестве активной минеральной добавки, обладающей пуццоланической активностью, для производства комплексных минеральных вяжущих, в бетонах и растворах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федорова Н.И., Исмагилов З.Р. Характеристика химического состава золы сапропелитовых углей различных месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 3. С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-27-32>

2. Лунёв А.А., Иванов Е.В., Сиротюк В.В. Применение золошлаковых смесей тепловых электростанций для строительства земляного полотна автомобильных дорог: монография. 2-е изд., испр. и доп. Омск: СибАДИ, 2023. 1 электрон. опт. диск (CD-R).

3. Prause B. Die Reaktion von Steinkohlen-Flugasche in hydraulisch und karbonatisch aushärtenden Bindemitteln // Kurzberichte aus der Bauforschung. 1991. B. 86. P. 629–633. <https://katalog.bibliothek.kit.edu/bib/135557>

4. Капустин Ф.Л. Технологические и экологические аспекты применения золы-уноса Рефтинской ГРЭС при производстве строительных материалов // Технология бетонов. 2011. № 7-8. С. 64–65.

5. Шульце С.Е., Рикерт Й. Влияние химического состава золы-уноса на ее реакционную способность // Цемент и его применение. 2012. № 1. С. 170–176. <https://jcement.ru/magazine/vypusk-1-/vliyanie-khimicheskogo-sostava-zoly-unosa-na-ee-reaktsionnyu-sposobnost/>

6. Sharonova O.M., Fedorchak M.A., Mazurova E.V. The Composition and Structure of Ferrospheres Formed by Industrial Combustion of Ekibastuz Coal // Journal of Siberian Federal University. 2017. Chemistry 2 (10). pp. 175–185.

7. Сиротюк В.В., Троян Т.П. Влияние углистых остатков на качество золошлаков, применяемых для строительных технологий // Вестник СибАДИ. 2017. 6(58). 119–125.

8. Бирюков В.В., Метелев С.Е., Сиротюк В.В., Шевцов В.Р. Энергопроизводство и утилизация золошлаковых отходов // Вестник Российского государственного торгово-экономического университета. 2008. № 2. С. 221–229.

9. Попов Н.А., Иванов И.А. Характеристика несгоревших частиц в золах ТЭЦ // Труды Академии строительства и архитектуры СССР. Западносибирский филиал. 1961. Вып. 5. С. 18–26.

10. Фецынин Н.И. Об особенностях несгоревшего топлива в золах ТЭЦ и его влиянии на свойства золобетонов // Строительные материалы. 1963. № 4. С. 9–12.

11. Lunev A.A., Sirotyuk V.V. Influence of Granulometric Composition on the Mechanical Properties of Pond Ash // Soil Mech. Found. Eng. 2021. Vol. 58, № 4. P. 314–319.

12. Please cite this article as: Jambhulkar, H.P., Shaikh, S.M.S., Kumar, M.S., Fly ash toxicity, emerging

13. issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review, Chemosphere (2018), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.045>.

14. Овсейчук В.А., Крылов Д.А., Сидорова Г.П. Радиоактивность углей и продуктов их сжигания // Атомная стратегия. Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=Artic.=4326>. (дата обращения: 19.04.2025)

15. Алиазаров А.Х., Хайдаров Ш.Э., Хатамова Д.М. Технологические особенности использования угольной золы как эффективное решение экологической проблемы // Молодой ученый. 2014. № 8 (67). С. 366–369. URL: <https://moluch.ru/archive/67/10986/> (дата обращения: 21.04.2025).

REFERENCES

1. Fedorova N.I., Ismagilov Z.R. Characteristic of the chemical composition of sapropelite coal ash from various deposits. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020; 3: 27–32. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-27-32>

2. Lunev A.A., Ivanov E.V., Sirotyuk V.V. The use of ash and slag mixtures of thermal power plants for the construction of highways: a monograph. Omsk: SibADI, 2023. (In Russ.)

3. Prause B. Die Reaktion von Steinkohlen-Flugasche in hydraulisch und karbonatisch aushärtenden Bindemitteln. *Kurzberichte aus der Bauforschung*. 1991; B. 86: 629–633. <https://katalog.bibliothek.kit.edu/bib/135557>

4. Kapustin F.L. Technological and ecological aspects of the use of fly ash at Refinskaya GRES in the production of building materials. *Concrete Technologies*. 2011; 7-8: 64–65. (In Russ.)

5. Schulze S.E., Rickert J. The influence of the chemical composition of fly ash on its reactivity. *Cement and its Application*. 2012; 1: 170–176. (In Russ.) <https://jcement.ru/magazine/vypusk-1-/vliyanie-khimicheskogo-sostava-zoly-unosa-na-ee-reaktsionnyu-sposobnost/>

6. Sharonova O.M., Fedorchak M.A., Mazurova E.V. The Composition and Structure of Ferrospheres Formed by Industrial Combustion of Ekibastuz Coal. *Journal of Siberian Federal University*. 2017; Chemistry 2 (10): 175–185.

7. Sirotyuk V.V., Troyan T.P. The influence of carbonaceous residues on the quality of ash and slag

used for construction technologies. *Vestnik SibADI*. 2017; 6(58): 119-1125. (In Russ.)

8. Biryukov V.V., Metelev S.E., Sirotyuk V.V., Shevtsov V.R. Energy production and utilization of slag waste. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2008; 2: 221-229. (In Russ.)

9. Popov N.A., Ivanov I.A. Characteristics of unburned particles in the ashes of thermal power plants. *Proceedings of the Academy of Civil Engineering and Architecture of the USSR*. West Siberian branch. 1961; Issue 5: 18-26. (In Russ.)

10. Fedynin N.I. On the features of unburned fuel in the ashes of thermal power plants and its effect on the properties of ash-concrete. *Stroitel'nye Materialy* (Construction Materials). 1963; 4: 9-12. (In Russ.)

11. Lunev A.A., Sirotyuk V.V. Influence of Granulometric Composition on the Mechanical Properties of Pond Ash. *Soil Mech. Found. Eng.* 2021; Vol. 58, no 4: 314–319.

12. Please cite this article as: Jambhulkar, H.P., Shaikh, S.M.S., Kumar, M.S., Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review, *Chemosphere* (2018), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.045>.

13. Ovseychuk V.A., Krylov D.A., Sidorova G.P. Radioactivity of coals and their combustion products.

Atom week. (In Russ.) Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=Artic.=4326>. (access: 19.04.2025).

14. Alinazarov A.H., Khaidarov S.E., Khatamova D.M. Technological features of using coal ash as an effective solution to an environmental problem. *Young scientist*. 2014; 8 (67):366-369. Available at: <https://moluch.ru/archive/67/10986/> / (access: 21.04.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сиротюк Виктор Владимирович – проф., д-р техн. наук, главный научный сотрудник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ)

(644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>,

SPIN-код: 2583-7458,

e-mail: sirvv@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor V. Sirotyuk – Dr. of Sci., Professor, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>,

SPIN-code: 2583-7458,

e-mail: sirvv@yandex.ru