

УДК 628.477.7:662.613.1:622.33  
doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-117-127

## УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ В КОНТЕКСТЕ РЕАЛИЗАЦИИ ЦЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ: ОПЫТ РОССИИ И КИТАЯ

Данзан Бадмаевич Бембеев<sup>1</sup>✉, Алексей Андреевич Самсонов<sup>2</sup>,  
Андрей Викторович Бобров<sup>3</sup>, Александр Сергеевич Воронов<sup>4</sup>,  
Марианна Валерьевна Кудина<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; bembееv.daznan@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0001-3275-7329>

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samsonov@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4637-0399>

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; archi3@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7023-4561>;

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; voronov@spa.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0058-9217>

<sup>5</sup> Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэнь, Шэньчжэнь, Китай; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mariannakud@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3923-515X>

**Аннотация.** В статье рассматриваются золошлаковые отходы (ЗШО), образующиеся при сжигании угля на тепловых электростанциях, как перспективное техногенное сырье. Приводится сравнительный анализ подходов к их утилизации и переработке в Китае и России. Подчеркивается высокий уровень вовлечения золошлаковых отходов в производственные цепочки в Китае благодаря развитию нормативно-правовому регулированию, технологическим инновациям и интеграции с потребляющими отраслями. В российской практике, несмотря на существующие инициативы и стратегические документы, темпы переработки ЗШО остаются низкими. Обозначены ключевые барьеры, включая территориальную диспропорцию между источниками образования отходов и регионами спроса, недостаточную экономическую мотивацию и логистические сложности. Отмечается необходимость адаптации китайского опыта с учетом российской специфики.

**Ключевые слова:** зола-унос, золошлаковые отходы, переработка ЗШО, устойчивое развитие, национальные цели развития России, генезис и состав угля, циркулярная экономика, тепловые электростанции

**Для цитирования:** Бембеев Д.Б., Самсонов А.А., Бобров А.В., Воронов А.С., Кудина М.В. Утилизация и переработка золошлаковых отходов в контексте реализации целей устойчивого развития: опыт России и Китая // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 5. С. 117–127.

## UTILIZATION AND PROCESSING OF COAL ASH AND SLAG WASTE IN THE CONTEXT OF ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS: EXPERIENCE OF RUSSIA AND CHINA

Danzan B. Bembееv<sup>1</sup>✉, Alexey A. Samsonov<sup>2</sup>, Andrey V. Bobrov<sup>3</sup>,  
Alexander S. Voronov<sup>4</sup>, Marianna V. Kudina<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; bembееv.daznan@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0001-3275-7329>

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samsonov@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4637-0399>

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; archi3@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7023-4561>

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; voronov@spa.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0058-9217>

<sup>5</sup> Shenzhen MSU-BIT University, Shenzhen, China; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mariannakud@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3923-515X>

**Abstract.** The article considers coal ash and slag waste generated from coal combustion at thermal power plants as a promising technogenic resource. A comparative analysis of approaches to the utilization and processing of ash and slag waste (ASW) in China and Russia is presented. The high level of ASW integration into production chains in China is highlighted, due to well-developed regulatory frameworks, technological innovations, and integration with consuming industries. In Russian practice, despite existing initiatives and strategic documents, the ASW processing rates remain low. Key barriers are identified, including the territorial imbalance between waste generation sources and demand regions, insufficient economic incentives, and logistical difficulties. The need to adapt Chinese experience taking into account Russian specificities is noted.

**Keywords:** fly ash, ash and slag waste, ASW processing, sustainable development, national development goals of Russia, genesis and composition of coal, circular economy, thermal power plants

**For citation:** Bembeev D.B., Samsonov A.A., Bobrov A.V., Voronov A.S., Kudina M.V. Utilization and processing of coal ash and slag waste in the context of achieving sustainable development goals: experience of Russia and China. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 5: 117–127. (In Russ.).

**Введение.** Техногенное минеральное сырье, в том числе золошлаковые отходы (ЗШО), представляет собой важную категорию антропогенных объектов, обладающих высоким потенциалом вовлечения во вторичную переработку. Возрастающие темпы производства и сжигания угля, особенно в странах с активной угольной генерацией, привели к формированию масштабных золоотвалов, оказывающих длительное воздействие на геохимическую и экологическую обстановку. Особую значимость приобретают задачи разработки эффективных путей утилизации золы-уноса как одного из наиболее объемных видов ЗШО. Это может быть напрямую связано с разработкой задач, связанных с реализацией 12-й цели устойчивого развития ООН «Обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производства» [Цели..., 2025].

Современные научные исследования в области переработки золошлаковых материалов охватывают широкий спектр направлений — от изучения фазового и химического состава до оценки пуццолановой активности, извлечения ценных компонентов (например, алюминия и редкоземельных элементов), а также адаптации ЗШО для применения в строительной индустрии. Практическая реализация таких подходов зависит от институциональной среды, логистических факторов и структуры национальной экономики.

Выбор для сопоставительного анализа Китая и России обусловлен не только их высоким объемом генерации золы-уноса, но и принципиально различными стратегиями обращения с этими отходами. Китай, будучи крупнейшим в мире потребителем угля, реализует комплексную политику по обращению с ЗШО, интегрируя принципы циркулярной экономики и инновационные технологии. В России, несмотря на масштаб накоплений и государственные инициативы, уровень повторного использования ЗШО остается ограниченным, несмотря на то, что национальные цели развития России до 2030 г. [Указ..., 2024] во многом соотносятся с целями устойчивого развития ООН [Леонтьева и др., 2024].

Настоящее исследование направлено на выявление различий в подходах к утилизации золошлаков, оценку эффективности реализуемых мер и поиск возможных направлений адаптации зарубежного опыта к российским условиям для достижения национальных целей развития. Особое внимание уделено техническим, нормативным и инфраструктурным аспектам переработки золы-уноса как перспективного вида техногенного минерального сырья в контексте реализации целей устойчивого развития.

**Образование и характеристики золошлаковых отходов.** Генезис и состав угля. Основной компонент угля — углеродосодержащий материал, образую-

щийся в результате накопления и разложения растительных остатков в морских или пресноводных условиях и болотах [Hessley, et al., 1986]. По мере накопления растительных остатков они подвергаются гумификации и преобразуются в уголь через процесс углефикации. В органической матрице основным элементом по массе является углерод, меньшие количества составляют H, O, N и S, а также попутные элементы-примеси. Количество этих элементов варьируется, но такие элементы, как B, Ge, Be, Ti и V, преимущественно ассоциированы с органическим веществом угля.

Уголь содержит обломочные минералы, осаждаемые вместе с растительным материалом, а также аутигенные минералы, образовавшиеся в процессе углефикации. Содержание минеральной части в угле значительно варьируется в зависимости от его происхождения и по данным [Valkovic, 1983] составляет от 9,05 до 32,26 мас.%. В составе угля встречаются следующие минералы: алюмосиликаты (преимущественно глинистые минералы), карбонаты (кальцит, анкерит, сидерит и доломит), сульфиды (главным образом пирит (FeS<sub>2</sub>)), хлориды и силикаты (кварц). Микроэлементы в угле, как правило, связаны с одним или несколькими из этих минералов

Распределение основных, второстепенных и микроэлементов, а также их форм варьируется в зависимости от типа угля. Миллер и Гивен [Miller, Given, 1986] исследовали ассоциации неорганических элементов в буром угле, в частности взаимодействие между органической и неорганической составляющими. Они разделили образец угля с помощью гравиметрических методов, а затем дополнительно фракционировали эти части с использованием экстракции ацетатом аммония и соляной кислотой. Их анализ показал, что Ca, Mg, Na, K, Sr, Ba и Mn присутствуют преимущественно или частично в ионообменной форме. Также было выявлено заметное количество калия (в виде иллита), бария (в виде сульфатов и карбонатов) и марганца в минеральной форме. Часть алюминия оказалась связана с органической материей. Титан, который часто встречается в осадочных породах в результате изоморфного замещения в глинах, был обнаружен в значительном количестве в органической фракции в виде кислоторастворимых и кислотонерастворимых органических хелатов. Несколько микроэлементов оказались обогащенными в угольных фракциях с наименьшей плотностью, что указывает на их преимущественную связь с органическим веществом. К таким элементам относятся Be, Sc, Cr, Y, Yb, V, Ni, Cu и Zn — подобное распределение чаще наблюдается в буром угле, чем в каменном [Miller, Given, 1986].

*Процесс сжигания угля и образование золы.* Сжигание измельченного угля является преобладающей

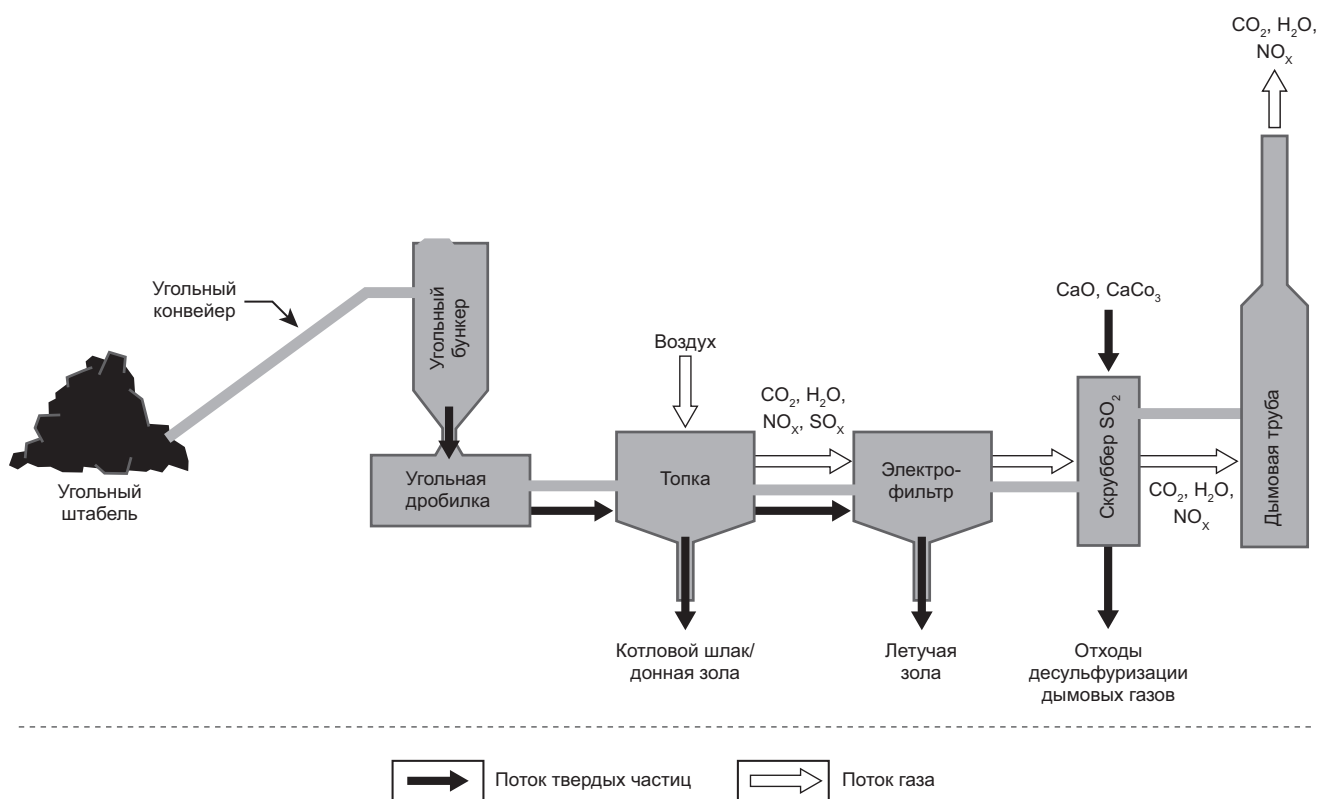


Рис. 1. Обобщенный процесс сжигания угля

технологией производства электроэнергии в мире. Этот процесс включает измельчение исходного угля до мелкодисперсного состояния и подачу его вместе с воздухом в топку (котел), где он сгорает при температурах, часто превышающих 1500 °С. Тепло, выделяющееся при сгорании, кипятит воду в трубах, расположенных вдоль стенок топки. Турбогенераторы используют пар, образующийся при кипении воды, для выработки электроэнергии. Хотя технологии сжигания угля могут значительно различаться, отходы, образующиеся на большинстве современных угольных электростанций, имеют схожий состав.

На рис. 1 представлена обобщенная технологическая схема сжигания угля и образования продуктов сгорания угля. Сначала уголь подается через систему конвейеров и бункеров в дробилку. В дробилке уголь измельчается до порошкообразного состояния и затем подается в топку. При нагревании в топке частицы угля вспучиваются и становятся пористыми; степень вспучивания зависит как от типа угля, так и от условий сгорания [Wu, Chen, 1987]. Основная часть органического вещества в угле сгорает с образованием  $\text{CO}_2$ , а в остатке остаются неорганические минералы и несгоревшие органические соединения. Летучие углеводороды и связанные с ними неорганические элементы испаряются, как и высоколетучие минеральные компоненты. Приблизительно одна пятая части золы оседает на дне топки и собирается в виде более грубозернистой «донной золы» или шлака [Helmuth, 1987]. Остальные твердые частицы, называемые «летучей золой» (зола-уноса, ЗУ),

уносятся в зону с более низкой температурой (около 200 °С), где они конденсируются в мелкодисперсные сферические частицы, содержащие как кристаллические, так и аморфные фазы [Helmuth, 1987].

Минералы, разлагающиеся при температурах, равных или ниже температур сгорания (в первую очередь карбонаты и сульфиды), а также содержащие элементы, сублимирующие при этих температурах, скорее всего, переходят в газовую фазу внутри топки. Сравнение температур кипения отдельных элементов с температурой работы современных установок с кипящим слоем (800–900 °С) показывает, что такие элементы, как С, О, Н, S, N, P, Na, K, As, Cd, Pb, Hg и Se, вероятно, присутствуют в виде пара в газах топки.

Приблизительно 70–90 мас.% минеральной части угля претерпевает ту или иную термическую трансформацию в процессе сгорания. Минеральные вещества и остатки органического вещества, не перешедшие в газовую фазу, сгорают в результате гетерогенного окисления [Wu, Chen, 1987]. Скорость окисления мелких частиц (<100 мкм) определяется химической кинетикой, тогда как для более крупных частиц скорость горения ограничивается диффузией кислорода к поверхности частицы [Flagan, Friedlander, 1976]. Несмотря на то, что сжигание угля в основном представляет собой процесс окисления, при недостаточно интенсивном смешивании воздуха с горящими частицами угля внутри топки могут возникать локальные восстановительные зоны [Katrinak, Zygarlicke, 1995]. Поэтому, хотя ми-

неральные компоненты золы в основном переходят в окисленные формы, наличие восстановленных форм минералов, особенно в крупных частицах, исключать нельзя.

Силикаты и алюмосиликаты являются основными негорючими фазами, присутствующими в измельченном угле, и, за исключением кварца, полностью трансформируются при сгорании, когда температура достигает диапазона плавления (1100–1600 °С) [Hubbard, et al., 1984]. Связанная вода и фосфор, высвобождающиеся при термическом разложении алюмосиликатного минерала иллита, способствуют частичному плавлению этих частиц [Hubbard, et al., 1984]. Образующийся расплав вспенивается за счет одновременного выделения  $\text{CO}_2$  при катализируемом железом окислении углеродистой материи, в результате чего формируются полые, заполненные газом стекловидные частицы летучей золы, называемые «ценосферами». Минерал каолинит имеет очень высокую температуру спекания золы из-за отсутствия плавящихся ионов [Hubbard, et al., 1984]. Его кристаллическая решетка разрушается без плавления, образуя агрегаты летучей золы без ценосфер.

Когда отходящие газы и частицы летучей золы покидают топку, они быстро охлаждаются, что приводит к конденсации и адсорбции испарившихся элементов на поверхности частиц летучей золы, переносимых газовым потоком [Kaakinen, et al., 1975]. При высокотемпературных условиях горения некоторые элементы, включая серу (S), обогащаются на поверхности частиц [Davison, et al., 1974; Smith, 1980]. Процесс испарения-конденсации является основным механизмом, ответственным за обогащение летучих микроэлементов на поверхности частиц летучей золы, особенно в мелкодисперсной фракции [Kaakinen, et al., 1975; Smith, et al., 1979; Smith, 1980; Summers, et al., 1983; Van der Sloot, Nieuwendijk, 1985; Gieré, et al., 2003].

Исходя из приведенного выше описания процесса сжигания угля, можно сделать несколько выводов. Во-первых, тип и количество золы, накапливающейся в ходе сжигания, в значительной степени зависят от минералогии используемого угля, технологии горения и наличия систем очистки выбросов. Во-вторых, химические формы, в которых элементы присутствуют в золе, определяются параметрами процесса — такими, как температура горения и режим сжигания (пылеугольное топливо, кипящий слой, циклонная камера, колосниковая решетка и т.д.). И наконец, объем образования продуктов сжигания угля на электростанциях главным образом обусловлен наличием устройств для очистки выбросов.

*Физико-химические свойства золы.* Помимо сходства в насыпной плотности, физические свойства летучей и донной золы существенно различаются. Диаметр частиц летучей золы, как правило, на несколько порядков меньше диаметра частиц донной

золы, что приводит к насыщенной гидравлической проводимости летучей золы на один-три порядка ниже, чем у донной. Малый диаметр частиц летучей золы обуславливает и их большую удельную поверхность.

Морфология частиц также значительно отличается. Донная зола в основном состоит из хаотичных конгломератов спеканных субугловатых частиц, с небольшими вкраплениями угловатых фрагментов неизменного кварца, полевого шпата и алюмосиликатов. Летучая зола представлена частицами, образовавшимися при охлаждении расплавленных капель спеканного материала в отходящих газах, покидающих топку. Плавление силикатных минералов приводит к формированию стекловидных сферических частиц. Большинство этих сфер делится на две группы: плеросферы — полые сферы, заполненные более мелкими сферами, и ценосферы — полые пустые сферы. Широкий диапазон истинной плотности летучей золы обусловлен именно этими уникальными полыми сферическими структурами.

Химический состав продуктов сгорания угля варьируется в зависимости от происхождения и ранга угля; однако основными элементами, входящими во все золные остатки, являются O, Si, Al, Fe и Ca, а в меньших количествах — Mg, S и C. Эти элементы остаются в золе благодаря их низкой летучести и короткому времени, которое частицы фактически проводят в топке во время горения [Helmuth, 1987]. На поверхности частиц летучей золы образуются как кристаллические, так и аморфные соединения: они формируются при реакции элементов с кислородом дымовых газов, а также путем конденсации/кристаллизации внутри расплавленных капель [Smith, 1980].

Оксиды Ca и Mg (известь, периклаз [ $\text{MgO}$ ]) могут присутствовать в виде мелких кристаллов, внедренных в стекловидную массу, либо располагаться на ее поверхности — в зависимости от температуры и условий в топке, при которых образовались минералы. Низкотемпературные минералы, такие как ангидрит ( $\text{CaSO}_4$ ), могут формироваться на поверхности зерен летучей золы после их выхода из высокотемпературных зон топки [Linton, et al., 1977; Soroczak, et al., 1987; Ainsworth, et al., 1993; Fishman, et al., 1999].

Стекло представляет собой аморфный стекловидный силикат / алюмосиликат, образующийся при быстром охлаждении расплавленного материала, когда элементы «запечатываются» в беспорядочную, некристаллическую структуру. Благодаря высокому содержанию силикатного стекла летучая зола обладает вяжущими (пуццолановыми) свойствами (в зависимости от доступного количества извести) и широко применяется в бетоне как замена мелкого заполнителя либо портландцемента [Helmuth, 1987]. И донная, и летучая зола подходят для использования в техногенных насыпях, и для их проектирования и строительства разработано руководство [ASTM..., 2003].

Летучая зола представляет собой гетерогенный материал в микрометровом, а подчас и в нанометровом масштабе [Hemmings, Berry, 1986; Qian, et al., 1988, 1989; Enders, 1995; Gieré, et al., 2003]. Химический состав и минералогический набор конкретного образца летучей золы зависят от месторождения исходного угля и условий работы котла. В состав летучей золы входит 75–90 мас.% стекла, обогащенного Si и Al, причем его состав весьма изменчив. Он определяется скоростью закалки расплава и степенью изоморфного замещения или модификации другими катионами, такими как Fe, Ca, Na, K и Mg.

Суббитумозные и бурые угли обычно содержат более высокие концентрации Ca и Mg — либо в виде Ca- и Mg-содержащих минералов (карбонаты, глинистые минералы), либо в органической фракции угля. Реакционная способность стекла летучей золы в высокощелочных растворах, например в порах бетона, зависит от степени дальнего порядка стекломатричной структуры. Катионы Ca, Mg, K и Na выступают модификаторами сетки: они сокращают протяженность дальнего порядка и повышают реакционную способность стекла, т. е. скорость его растворения [Diamond, 1984; Hemmings, Berry, 1988]. Подробный обзор процессов формирования стекла летучей золы приведен в работе Tikalsky [1989].

Основные и второстепенные элементы (O, Si, Al, Fe, Ca, Mg и S) образуют в золе целый ряд минеральных фаз, выявленных методом рентгеновской дифракции во многих исследованиях [Diamond, 1984; McCarthy, 1988; Bergeson, et al., 1988; Ainsworth, et al., 1993]. К наиболее распространенным фазам, обнаруживаемым в летучей золе, относятся: кварц ( $\text{SiO}_2$ ), муллит ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ), трехкальциевый алюминат ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ , также обозначается как  $\text{C}_3\text{A}$  в цементной терминологии), алит ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ), белит ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), известь ( $\text{CaO}$ ), ангидрит ( $\text{CaSO}_4$ ),  $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{SO}_4$ , периклаз ( $\text{MgO}$ ), мелилит ( $\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Al})(\text{Al},\text{Si})_2\text{O}_7$ ), мервинит ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ ), тенардит ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

**Опыт Китая.** Китай является крупнейшим потребителем угля в мире, и уголь обеспечивает более 60 % энергобаланса страны [Peng, et al., 2018; Wang, et al., 2019]. Летучая зола — твердый отход, образующийся на угольных тепловых электростанциях при сжигании пылеугольного топлива, в настоящее время относится к числу самых масштабных видов твердых отходов в Китае [Yao, et al., 2014]. В 2018 г. объем ее образования превысил 550 млн т, а из-за недостаточного использования суммарные накопленные запасы золошлаков уже превысили 3 млрд т.

Данные о производстве и использовании золы-уноса на ключевых промышленных предприятиях согласно «Годовому докладу по предотвращению загрязнения окружающей среды твердыми отходами в крупных и средних городах Китая» [Годовой..., 2017; 2020] приведены на рис. 2. Из диаграммы видно, что в период с 2013 по 2019 г., за исключением небольшого снижения объемов в 2015 и 2016 гг.,

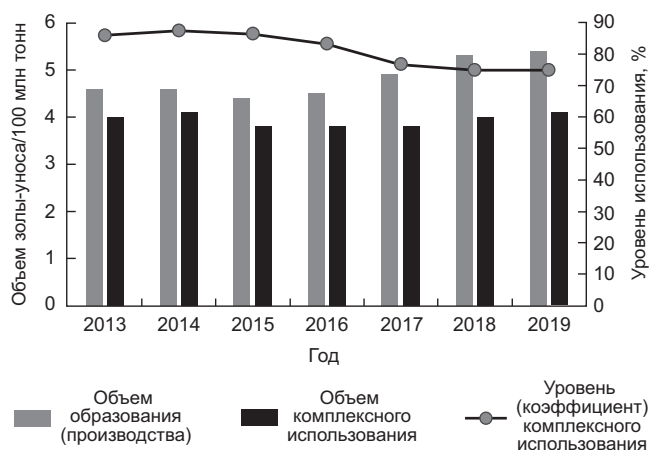


Рис. 2. Объем образования и комплексного использования золы-уноса в Китае в 2013–2019 гг. [Li Q., et al., 2023]

объемы образования золы-уноса стабильно росли. В 2018 и 2019 гг. объемы производства золы на ведущих предприятиях Китая дважды превысили отметку в 500 млн т, достигнув соответственно 530 и 540 млн т.

Основным источником золы-уноса в Китае является электроэнергетика. В период с 2017 по 2019 г. отрасли производства и снабжения электро- и теплоэнергией давали более 85 % от общего объема золообразования в стране.

Что касается утилизации, то в 2013–2019 гг. объем комплексного использования золы-уноса существенно не изменился и составлял около 400 млн тонн в год. Однако, на фоне роста общего объема образования золы, уровень ее утилизации демонстрирует тенденцию к снижению: если в 2013–2015 гг. коэффициент утилизации превышал 86 %, то в 2018–2019 гг. его значение уже менее 75 %.

В действующем законодательстве Китая установлены принципы управления твердыми отходами, включающие снижение объемов образования, ресурсосбережение и безвредную переработку. Основные законы, касающиеся экологического регулирования золы-уноса, включают:

- Закон Китайской Народной Республики об охране окружающей среды [Закон..., 2014];
- Закон КНР о предотвращении загрязнения окружающей среды твердыми отходами (сокращенно «Закон о твердых отходах») [Закон..., 2020];
- Закон КНР о содействии циркулярной экономике [Закон..., 2008];
- Закон КНР о содействии чистому производству [Закон..., 2012] и др.

Хотя Госсовет КНР не издал специальных административных актов, непосредственно регулирующих обращение с золой-уносом, еще в 1990-х годах ряд министерств совместно разработали и выпустили «Положение о комплексном использовании золы-уноса», которое впоследствии неоднократно пересматривалось в соответствии с изменениями ситуации.

Кроме того, Министерство промышленности и информационных технологий совместно с бывшим Министерством охраны окружающей среды также выпускали документы, направленные на стимулирование комплексного использования золы и совершенствование ее экологического управления.

*Закон Китайской Народной Республики об охране окружающей среды*, принятый в 1989 г. и пересмотренный в 2014 г., является основополагающим и комплексным экологическим законом Китая. Он устанавливает основные принципы и систему охраны окружающей среды, подчеркивая приоритет защиты, превентивный подход, комплексное управление, участие общественности и ответственность загрязнителя [Su, Fang, 2016; Zang, Wang, 2018].

*Закон о предотвращении загрязнения окружающей среды твердыми отходами* (сокращенно «Закон о твердых отходах») представляет собой специализированный закон в области управления отходами. Он содержит систему надзора, меры по предотвращению загрязнения, механизмы обеспечения исполнения, юридическую ответственность. Закон закрепляет принципы сокращения образования отходов, ресурсосбережения и безвредной переработки, а также принцип ответственности за загрязнение. Он предусматривает такие ключевые институты, как:

- система ответственности за предотвращение загрязнения;
- регистрация и декларирование промышленных отходов;
- поощрение передовых технологий и выведение устаревших;
- система экологического надзора.

Также закон четко регулирует управление на всех этапах обращения с отходами: от образования, сбора, хранения, транспортировки и использования до окончательной утилизации, включая требования к объектам и оборудованию. Он определяет обязанности производителей отходов, сборщиков, хранителей, перевозчиков, утилизаторов, переработчиков и управляющих организаций.

Кроме этого, существуют дополнительные нормативные акты в сфере экологии.

*Закон КНР о содействии циркулярной экономике*, в котором приоритет отдается сокращению отходов, безопасному повторному использованию и переработке, а также определены обязанности производителей, переработчиков, продавцов и органов надзора, включая меры поддержки развития циркулярной экономики.

*Закон КНР о содействии чистому производству*, ориентированный на сокращение загрязнения на источнике и повышение эффективности использования ресурсов. Он определяет обязанности всех участников (производителей, переработчиков, продавцов, оценщиков и органов надзора) и продвигает подход к сокращению загрязнения на всех этапах жизненного цикла продукции, что способствует

устойчивому социально-экономическому развитию и улучшению окружающей среды

Для регулирования и стимулирования комплексного использования золы-уноса и содействия ее устойчивому развитию, в 1994 г. бывший Государственный комитет по экономике и торговле КНР совместно с еще пятью министерствами опубликовал «Положение о комплексном использовании золы-уноса». В 2013 г. Государственный комитет по развитию и реформам КНР вместе с девятью другими ведомствами выпустил пересмотренный вариант этого положения в форме совместного приказа [Порядок..., 2013], где уточняются понятия «зола-унос» и ее «комплексное использование», устанавливается принцип «кто производит — тот и отвечает, кто использует — тот и получает выгоду», определяются требования к комплексному управлению и направлению государственной поддержки, закрепляются обязанности соответствующих регулирующих органов.

В мае 2018 г. с целью продвижения ресурсосберегающего использования промышленных твердых отходов и содействия зеленому развитию промышленности, Министерство промышленности и информационных технологий КНР опубликовало два документа: «Временный порядок оценки комплексного использования ресурсов промышленных твердых отходов», и «Каталог продукции из промышленных твердых отходов, допущенной к комплексному использованию» [Объявление..., 2018].

Первый документ направлен на создание научной и стандартизированной системы оценки такого использования и побуждает предприятия активно участвовать в этом процессе. Второй документ включает 6 видов промышленных твердых отходов (включая угольные отходы, хвосты, шлаки, золу-унос, доменные шлаки и др., за исключением опасных отходов), а также: определяет перечень продукции, получаемой из них (в том числе 15 видов продукции из золы-уноса); устанавливает требования к техническим условиям и стандартам; указывает, что при отсутствии государственных или отраслевых стандартов следует использовать местные или корпоративные стандарты.

Кроме того, в 2017 г. бывшее Министерство охраны окружающей среды издало «Политику по предотвращению загрязнений на тепловых электростанциях» [Политика..., 2017], где также подчеркивается принцип приоритетного комплексного использования золы-уноса: размещать золу-унос на специально оборудованных площадках, соблюдать при хранении требования национального стандарта GB 18599-2020 «Стандарт по контролю загрязнения при хранении и захоронении обычных промышленных твердых отходов».

В Стандарте также указано, что зола-унос должна преимущественно использоваться для производства портландцемента, цемента с золой и бетона, соответствующих требованиям стандарта GB/T 1596-2017 «Зола-унос для цемента и бетона».

В 2018 г. Министерство промышленности и информационных технологий КНР в *Каталоге продукции из промышленных твердых отходов, допущенной к комплексному использованию* [Объявление..., 2018] включило все возможные направления использования золы-уноса, в том числе:

- применение в строительных материалах,
- извлечение металлических компонентов (оксид алюминия, оксид железа, металлы, металлические оксиды, редкоземельные элементы),
- производство белой сажи, синтетических цеолитов, реагентов для очистки воды и дымовых газов,
- получение жидкого стекла (силикат натрия), гидроксид алюминия, почвенных кондиционеров и т. д.

Начиная с 1950-х годов зола-уноса служит добавкой в производстве цемента и бетона и остается наиболее успешным способом ее утилизации во всем мире [Teixeira, et al., 2016]. По химическому составу зола-уноса близка к портландцементу и обладает высокой пуццолановой активностью [Shang, et al., 2018; Xu, et al., 2016]. Введение механически активированной золы-уноса в цемент или бетон значительно повышает их прочность и долговечность [Lu, et al., 2018; Mo, et al., 2017; Shi, et al., 2011; Zhuang, et al., 2016]. На практике в Китае широко применяются пустотелые блоки на основе золы-уноса [Wu, et al., 2015; Shi, et al., 2019], водопроницаемые кирпичи [Wang, et al., 2016] и теплоизоляционные плиты [Luo, Wang, 2008; Qi, et al., 2019] — благодаря простоте технологий и низкой стоимости.

Кроме того, около 9 % всего золошлака идет на перспективные направления, такие как высококачественные строительные материалы (керамика), извлечение полезных элементов и агромелиорация.

В последние два десятилетия в Китае активно развиваются технологии извлечения оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) из золы-уноса, образующейся при сжигании угля на тепловых электростанциях. Особое внимание к данному направлению обусловлено высокой концентрацией алюминия в золе, получаемой в ряде угледобывающих регионов — в частности, на юге Внутренней Монголии, севере провинции Шаньси и в провинции Шэньси, где содержание  $Al_2O_3$  может достигать 40–50 %.

С целью стимулирования комплексного использования золы-уноса, в 2011 г. Государственный комитет по развитию и реформам КНР (NDRC) включил золу с высоким содержанием алюминия в перечень приоритетных направлений развития промышленности. Это стало началом реализации ряда промышленных проектов, направленных на получение глинозёма металлургического качества с применением различных технологических подходов.

Так, компания Inner Mongolia Melic Sea Ordos Al Co., Ltd. одна из первых в данной области применила схему известково-спекательного процесса с последующим низкотемпературным байеровским выщелачиванием, разработанную на основе польских технологий.

Inner Mongolia Datang International Recycling Resource Development Co., Ltd. реализует проект с использованием предварительной десиликации золы, после чего остаток спекается с кальциевым шлаком. Кроме оксида алюминия, в процессе дополнительно получают активный силикат кальция.

Технология, применяемая Shenhua Group Co., Ltd., основана на одностадийном кислотном выщелачивании с использованием соляной кислоты и включает фильтрацию, испарение, кристаллизацию и обжиг. В результате достигается высокий уровень извлечения глинозёма (~80–90 %), соответствующего требованиям металлургического качества.

Сходная технологическая схема применяется в проекте China Coal Pingshuo Coal Industry Co., Ltd., где в сотрудничестве с университетами и Институтом инженерных процессов Китайской академии наук реализована комбинация десиликации, карбонизации и последующего известково-содового спекания.

Компания Inner Mongolia Kaiyuan Ecological Aluminum Co., Ltd. использует технологию низкотемпературного спекания с сульфатом аммония, ориентируясь как на извлечение алюминия, так и на получение кремнийсодержащих побочных продуктов.

Аналогичный подход реализуется в проекте Erdos Electrical Metallurgical Co., Ltd., в котором применяется кислотное выщелачивание с последующим байеровским процессом. Помимо глинозёма (1 млн т/год), проект предусматривает выпуск побочных продуктов — цеолитов, силикатов натрия и белого кремнезёма в значительных объемах.

Дополнительно сообщается о технологическом прорыве компании Beijing Lucency Environ-tech Co., Ltd., дочернего предприятия China Guodian Corporation, в лабораторных исследованиях по комплексной переработке золы-уноса с получением глинозёма,  $SiO_2$  и оксидов железа [Yao, 2014].

Учитывая активное развитие технологий переработки ЗШО в области переработки золы-уноса возникает необходимость не только в совершенствовании процессов извлечения ценных компонентов, но и в решении логистических и территориальных проблем, связанных с распределением СФА по стране. Несмотря на наличие масштабных производственных мощностей в ресурсных регионах, таких как Внутренняя Монголия и Шаньси, их удаленность от центров потребления преимущественно в юго-восточных прибрежных районах существенно затрудняет эффективную утилизацию вторичного сырья. Следовательно, дальнейшее развитие отрасли требует интеграции технологических решений с мерами по преодолению регионального дисбаланса между образованием и использованием золы-уноса, включая развитие локальных производств, логистических схем и рыночных стимулов.

Китай характеризуется значительными региональными различиями в уровне социально-эко-

номического развития. В целом, юго-восточные прибрежные районы опираются на товарно-ориентированную экономику, тогда как западные и северные регионы имеют ресурсозависимую структуру хозяйства [Wang, Ducruet, 2014]. Существенное опережение прибрежных районов по численности населения и уровню экономического развития привело к выраженному дисбалансу между производством и потреблением ЗШО.

В юго-восточных регионах, где сосредоточено наибольшее количество инфраструктурных проектов, наблюдается высокий спрос на цементы и бетоны с добавлением ЗШМ. В мегаполисах, таких как Шанхай и Шэньчжэнь, ЗШО не хватает, что приводит к повышению цен на вторичный материал.

Напротив, в таких регионах, как Шаньси, Внутренняя Монголия и Шэньси, где благодаря обширным запасам угля активно строятся и функционируют угольные электростанции [Fang, et al., 2019; Luo, et al., 2004; Yao, et al., 2014], образуется значительное количество ЗШО. Однако из-за низкой плотности населения и сдержанного темпа экономического роста, значительная часть золы накапливается на золоотвалах, не находя применения.

Дополнительной проблемой является засушливый климат этих территорий [Wu, Ci, 2002], что способствует высокой подвижности ЗШМ в окружающей среде и увеличивает риски вторичного загрязнения почв и атмосферного воздуха. Кроме того, ЗШМ характеризуется низкой объемной плотностью ( $0,5\text{--}1,2\text{ г/см}^3$ ), что делает ее дальнейшую транспортировку экономически нецелесообразной.

**Опыт России.** По состоянию на сегодняшний день на специализированных золоотвалах, расположенных на территории Российской Федерации, накоплено порядка 1,3 млрд тонн золошлаковых отходов. Ежегодный прирост ЗШО составляет около 18 млн т, при этом лишь около 20 % из них повторно используется в качестве вторичного сырья [Максимов, 2023]. В настоящее время на территории страны функционируют 172 угольные теплоэлектростанции (ТЭС), на которых ежегодно сжигается свыше 123 млн тонн твердого топлива [Завальный, 2019].

Совокупная площадь золошлаковых отвалов превышает 28 тыс. га, причем в ряде случаев вследствие процессов урбанизации данные объекты оказались в непосредственной близости от зон жилой застройки. При этом пылеобразование и фильтрация продуктов хранения золы представляют собой потенциальную экологическую угрозу для окружающей среды и здоровья населения. Указанные данные были озвучены председателем Комитета Государственной Думы по энергетике П.А. Завальным в ходе круглого стола на тему «Законодательное регулирование использования золошлаковых отходов угольных ТЭС», состоявшегося 18 февраля 2019 г.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р утверждена *Энергетическая стратегия Российской Федерации*

*на период до 2035 г.* [Стратегия..., 2020]. В рамках данного стратегического документа предусмотрен комплекс мероприятий, направленных на охрану окружающей среды и снижение антропогенного воздействия на климат. Впервые в современной российской практике в документе установлен целевой показатель утилизации ЗШО — не менее 50 % от объема их ежегодного образования к 2035 г.

Согласно данным Энергетической стратегии, по состоянию на 2018 г. уровень утилизации ЗШО составлял лишь около 8 %, что значительно уступает показателям большинства индустриально развитых государств с высокой долей угольной генерации в энергобалансе — таких как Китай, США, Германия, Индия и Австралия.

Одним из существенных экономических рисков, связанных с сохранением существующей системы обращения с ЗШО в Российской Федерации, является истощение емкостей действующих объектов размещения отходов, прежде всего золоотвалов [Золотова, 2020]. Несмотря на то, что ЗШО официально отнесены к V классу опасности (практически неопасные), их длительное хранение без реализации надлежащих природоохранных мероприятий может способствовать накоплению токсичных соединений, концентрация которых превышает санитарные нормативы. Таким образом, продолжительное складирование ЗШО требует привлечения дополнительных финансовых и организационных ресурсов, направленных на предотвращение негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

В целях повышения эффективности использования ЗШО и продвижения принципов циркулярной экономики в 2019 г. была учреждена *Ассоциация развития вторичного использования сырья* [АРВИС, 2025]. Деятельность АРВИС направлена на формирование нормативной базы, поддержку пилотных проектов по переработке золошлаков, развитие рынка вторичного минерального сырья, а также взаимодействие между государственными структурами, энергетическими компаниями и переработчиками. Ассоциация активно участвует в разработке законодательных инициатив, направленных на признание ЗШО не отходами, а техногенным сырьем, пригодным для включения в производственные цепочки строительной, дорожной и химической отраслей.

В последние годы Ассоциация развития вторичного использования сырья (АРВИС) активно продвигает системный подход к утилизации золошлаковых отходов (ЗШО) в России. На Российской энергетической неделе 2024 г. генеральный директор АРВИС Ирина Золотова подчеркнула, что страна перешла от обсуждения возможности использования ЗШО к созданию полноценной отрасли вторичного вовлечения сырья в хозяйственный оборот [Золотова, 2024].

АРВИС инициирует пилотные проекты по применению ЗШО в дорожном строительстве. Так, в Алтайском крае и Кузбассе реализуются проекты,

где золошлаковые материалы используются при реконструкции автодорог. В частности, в Алтайском крае при реконструкции участка трассы Павловск — Кольванское — Ракиты — Топчиха применяются золы-уносы с Барнаульской ТЭЦ-3, что позволяет заменить часть цемента в дорожной смеси. В Кузбассе рассматривается использование шлакового песка с Томь-Усинской ГРЭС в строительстве автодороги Шарап — Восточный.

Несмотря на существование стратегических документов и инициатив, направленных на повышение уровня утилизации золошлаковых отходов, масштабная реализация подобных программ, сравнимая с китайским опытом, в России в настоящее время представляется затруднительной. Это обусловлено рядом объективных факторов. Во-первых, строительный сектор в Российской Федерации значительно менее масштабен и динамичен, чем в Китае, где государственные инвестиции в жилищное и инфраструктурное строительство обеспечивают устойчивый спрос на материалы, содержащие ЗШО. Во-вторых, территориальная диспропорция между источниками образования золошлаков и регионами с высоким спросом на строительные материалы осложняет их логистику и делает переработку экономически нецелесообразной.

Наиболее крупные угольные ТЭС и соответствующие золошлаковые отвалы сосредоточены преимущественно в Сибири и на Дальнем Востоке, тогда как наибольшая строительная активность наблюдается в Центральном федеральном округе, Санкт-Петербурге, Краснодарском крае и некоторых районах Поволжья. Такая пространственная асимметрия требует значительных затрат на транспортировку и создает инфраструктурные ограничения, которых в Китае удалось избежать за счет плотной индустриальной и строительной интеграции регионов.

**Заключение.** Проведенный анализ свидетельствует о том, что золошлаковые отходы, накопленные на объектах энергетической инфраструк-

туры, представляют собой значительный резерв минерального сырья, пригодного для включения в производственные цепочки, с одной стороны, а с другой, может играть весьма значимую роль в вопросах реализации цели устойчивого развития «Обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производства» и национальных целей развития России до 2030 г. с перспективой до 2036 г. Китай демонстрирует успешную модель переработки ЗШО, основанную на развитой правовой базе, региональной интеграции производства и потребления, а также инвестициях в технологические инновации. В России, несмотря на наличие целевых стратегий и инициатив (в частности, Энергетической стратегии до 2035 г. и деятельности АРВИС), уровень вовлечения ЗШО в хозяйственный оборот остается низким. Основными барьерами выступают слабая строительная активность в золообразующих регионах, высокие логистические издержки и отсутствие нормативной классификации ЗШО как ценного техногенного ресурса. Преодоление этих препятствий возможно при условии синхронизации национальных целей развития России с целями устойчивого развития, с одной стороны, а также законодательных, экономических и технологических мер при адаптации элементов китайского опыта, имеющего значительный опыт работы с ЗШО, к российским условиям. Имплементация китайского опыта по работе с ЗШО может стать одним из перспективных направлений по взаимодействию двух стран в рамках объединения БРИКС+. Стратегическое направление по утилизации и переработке ЗШО в России должно быть сосредоточено на формировании полноценной индустрии золы-уноса, способной внести вклад в экологическую безопасность и развитие циркулярной экономики, внести вклад в обеспечение национальных целей развития.

**Финансирование.** Статья выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 24-Ш05-09.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ассоциация развития вторичного использования сырья (АРВИС). Официальный сайт. URL: <https://arvis.online/> (дата обращения: 07.05.2025).

Годовой отчет по предотвращению загрязнения окружающей среды твердыми отходами в крупных и средних городах Китая (2014–2017). URL: <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/gtfwwrfz/> (дата обращения: 05.05.2025). (На кит. яз.)

Годовой отчет по предотвращению загрязнения окружающей среды твердыми отходами в крупных и средних городах Китая (2018–2020). URL: <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/gtfwwrfz/> (дата обращения: 05.05.2025). (На кит. яз.)

Завальный П.А. Зарубежный опыт использования золошлаковых отходов угольных ТЭС применим в России // Фракция «ЕДИНАЯ РОССИЯ» в Государственной Думе. 2019. 18 февр. URL: <https://er-gosduma.ru/news/pavel-zavalnyy-zarubezhnyy-opyt-ispolzovaniya-zoloshlakovykh-otkhodov-ugolnykh-tes-primenim-v-rossii/> (дата обращения: 07.05.2025).

Закон КНР о предотвращении загрязнения окружающей среды твердыми отходами 29.04.2020. URL: [http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/30/content\\_5507561.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/30/content_5507561.htm) (дата обращения: 05.05.2025). (На кит. яз.)

Закон КНР о содействии циклической экономике. 29.08.2008. URL: [http://www.gov.cn/flfg/2008-08/29/content\\_1084355.htm](http://www.gov.cn/flfg/2008-08/29/content_1084355.htm) (дата обращения: 05.05.2025). (На кит. яз.)

Закон КНР о содействии чистому производству. 01.03.2012. URL: [http://www.gov.cn/flfg/2012-03/01/content\\_2079732.htm](http://www.gov.cn/flfg/2012-03/01/content_2079732.htm) (дата обращения: 05.05.2025). (На кит. яз.)

Закон КНР об охране окружающей среды. 25.04.2014. URL: [http://www.gov.cn/zhengce/2014-04/25/content\\_2666434.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2014-04/25/content_2666434.htm) (дата обращения: 05.05.2025). (На кит. яз.)

Золотова И.Ю. Начало «золошлакового» века: технологический суверенитет // Российская энергетическая неделя. 2024. URL: <https://rusenergyweek.com/news/nachalo>

%C2 %AVzoloshlakovogo%C2 %BB-veka-tehnologicheskij-suverenitet/ (дата обращения: 08.05.2025).

Золотова И.Ю. Риски сохранения текущей системы утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС в России // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2020. Т. 11, №. 2. С. 172–181.

Леонтьева Л.С., Воронов А.С., Барабошкин К.Е. и др. Достижение национальных целей развития России как фактор обеспечения национальной безопасности. МИР. (Модернизация. Инновации. Развитие). 2024;15(4):640-658

Максимов А. В 17 российских регионах ведется разработка программ утилизации продуктов сжигания угля на ТЭС и в котельных. Министерство энергетики (02.03.2023) РФ. URL: <https://www.minenergo.gov.ru/press-center/news-and-events?news-item=andrey-maksimov-v-17-rossiyskikh-regionakh-vedyetsya-razrabotka-programm-utilizatsii-produktov-szhiganiya-uglya-na-tes-i-kotelnykh> (дата обращения: 07.05.2025)

Объявление Министерства промышленности и информатизации КНР: № 26, 2018. 15.05.2018. URL: [https://www.miit.gov.cn/zw/gk/zcwj/wjfb/gg/art/2020/art\\_ace4b98d05fb4912a137b0347e09de73.html](https://www.miit.gov.cn/zw/gk/zcwj/wjfb/gg/art/2020/art_ace4b98d05fb4912a137b0347e09de73.html) (дата обращения: 05.05.2025). (На кит. яз.)

Политика предотвращения загрязнений на тепловых электростанциях: Объявление № 1, 2017. 10.01.2017. URL: [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201701/t20170117\\_394809.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201701/t20170117_394809.htm) (дата обращения: 05.05.2025). (На кит. яз.)

Порядок комплексного использования золы-уноса (Приказ № 19). 17.01.2013. URL: <http://www.gov.cn/gzdt/att/site1/20130117/782bcb9a8be91261e0b001.pdf> (дата обращения: 05.05.2025). (На кит. яз.)

Цели в области устойчивого развития. Официальный сайт Организации объединенных наций. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-consumption-production> (дата обращения 07.05.2025)

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года от 9 июня 2020 г. No. 1523-р // Министерство энергетики Российской Федерации. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4lgsArssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 07.05.2025)

Ainsworth C.C., Mattigod S.V., Rai D., Amonette J.E. Detailed physical, chemical, and mineralogical analyses of selected coal and oil combustion ashes. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1993.

ASTM E2277-03: Standard Guide for Design and Construction of Coal Ash Structural Fills. ASTM International. 2023.

Bergeson K.L., Schlorholtz S., Demirel T. Development of a rational characterization method for Iowa fly ash. Final report. Iowa Department of Transportation, ISU-ERI 86-450, 1988.

Davison R.L., Natusch D.F.S., Wallace J.R., Evans C.A. Trace elements in fly ash: dependence of concentration on particle size // Environmental Science and Technology. 1974. Vol. 8. P. 1107–1112.

Diamond S. On the glass present in low-Ca and high-Ca fly ash // Cement and Concrete Research. 1984. Vol. 13. P. 459–464.

Enders M. Microanalytical characterization (AEM) of glassy spheres and anhydrite from a high-calcium lignite fly ash from Germany // Cement and Concrete Research. 1995. Vol. 25. P. 1369–1377.

Fang D., Chen B., Hubacek K., et al. Clean air for some: unintended spillover effects of regional air pollution pol-

icies // Science Advances. 2019. Vol. 5. Article eaav4707. DOI: 10.1126/sciadv.aav4707.

Fishman N.S., Rice C.A., Breit G.N., Johnson R.D. Sulphur-bearing coatings on fly ash from a coal-fired power plant: composition, origin, and influence on ash alteration // Fuel. 1999. Vol. 78. P. 187–196.

Flagan R.C., Friedlander S.K. Particle formation in pulverized coal combustion: a review. Paper presented at the Eighty-Second National Meeting of the American Institute of Chemical Engineers. Atlantic City, NJ, 1976.

Gieri R., Carleton L.E., Lumpkin G.R. Micro- and nano-chemistry of fly ash from a coal-fired power plant // American Mineralogist. 2003. Vol. 88. P. 1853–1865.

Helmuth R. Fly ash in cement and concrete. Skokie, IL: Portland Cement Association, 1987.

Hemmings R.T., Berry E.E. On the glass in coal fly ashes: recent advances // Materials Research Society Symposium Proceedings. 1988. Vol. 113. P. 3–38.

Hemmings R.Z., Berry E.E. Speciation in size and density fractionated fly ash // Materials Research Society Symposium Proceedings. 1986. Vol. 65. P. 91–104.

Hessley R.K., Reasoner J.W., Riley J.T. Coal science: an introduction to chemistry technology and utilization. New York, NY: John Wiley & Sons, 1986.

Hubbard F.H., McGill R.J., Dhir R.K., Ellis M.S. Clay and pyrite transformations during ignition of pulverized coal // Mineralogical Magazine. 1984. Vol. 48. P. 251–256.

Kaakinen J.W., Jorden R.M., Lawasani M.H., West R.E. Trace element behavior in coal-fired power plant // Environmental Science and Technology. 1975. Vol. 9. P. 862–869.

Katrinak K.A., Zygarlicke C.J. Size-related variations in coal fly ash composition as determined using automated scanning electron microscopy // Fuel Processing Technology. 1995. Vol. 44. P. 71–79.

Li Q., Xu S., Gu Y.Y., et al. Present status and suggestions on the standard system of ecology and environment of fly ash in China // Journal of Environmental Engineering Technology. 2023. Vol. 13. No. 1. P. 438–446.

Linton R.W., Williams P., Evans C.A., Natusch D.R.S. Determination of the surface predominance of toxic trace elements in airborne particles by ion microprobe mass spectrometry and Auger electron spectroscopy // Analytical Chemistry. 1977. Vol. 49. P. 1514–1521.

Lu C.F., Wang W., Li Q. T., et al. Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the pH value in fly ash concrete // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 181. P. 309–317.

Luo K., Ren D., Xu L., et al. Fluorine content and distribution pattern in Chinese coals // International Journal of Coal Geology. 2004. Vol. 57. P. 143–149.

Luo Y.P., Wang L.J. Research on non-steam-cured and non-fired fly-ash thermal insulating materials // Journal of China University of Mining and Technology. 2008. Vol. 18. P. 116–121.

McCarthy G.J. X-ray powder diffraction for studying the mineralogy of fly ash // Materials Research Society Symposium Proceedings. 1988. Vol. 113. P. 75–86.

Miller R.N., Given P.H. The association of major, minor, and trace inorganic elements with lignites. I. Experimental approach and study of a North Dakota lignite // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1986. Vol. 50. P. 2033–2043.

Mo L., Zhang F., Panesar D.K., Deng M. Development of low-carbon cementitious materials via carbonating Portland cement-fly ash-magnesia blends under various curing sce-

narios: a comparative study // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 163. P. 252–261.

Peng B., Guo D., Qiao H., et al. Bibliometric and visualized analysis of China's coal research 2000–2015 // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 197. P. 1177–1189.

Qi L., Xu J., Liu K. Porous sound-absorbing materials prepared from fly ash // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 22264–22272.

Qian J.C., Lachowski E.E., Glasser F.P. Microstructure and chemical variation in Class F fly ash glass // *Materials Research Society Symposium Proceedings*. 1988. Vol. 113. P. 45–53.

Qian J.C., Lachowski E.E., Glasser F.P. The microstructure of National Bureau of Standards reference fly ashes // *Materials Research Society Symposium Proceedings*. 1989. Vol. 136. P. 77–85.

Shang J., Dai J. G., Zhao T.J., et al. Alternation of traditional cement mortars using fly ash-based geopolymers mortars modified by slag // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 203. P. 746–756.

Shi C., Jiménez A.F., Palomo A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. P. 750–763.

Shi Y., Li Y., Tang Y., et al. Life cycle assessment of autoclaved aerated fly ash and concrete block production: a case study in China // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 25432–25444.

Smith R. D. The trace element chemistry of coal during combustion and the emissions from coal-fired plants // *Progress in Energy and Combustion Science*. 1980. Vol. 6. P. 53–119.

Smith R.D., Campbell J.A., Nielson K.K. Concentration dependence upon particle size of volatilized elements in fly ash // *Environmental Science and Technology*. 1979. Vol. 13. P. 553–558.

Soroczak M.M., Eaton H.C., Tittlebaum M.E. An ESCA and SEM study of changes in the surface composition and morphology of low-calcium coal fly ash as a function of aqueous leaching // *Materials Research Society Symposium Proceedings*. 1987. Vol. 86. P. 37–47.

Su Y., Fang H. Research on fly ash policy in China // *Clean Coal Technology*. 2016. Vol. 22(4). P. 52–55.

Summers D.V., Rupp G.L., Gherini S.A. Physical-chemical characteristics of utility solid wastes. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, EA-3236, 1983.

Teixeira E.R., Mateus R., Camoes A.F., et al. Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112. P. 2221–2230.

Tikalsky P.J. The effects of fly ash on the sulfate resistance of concrete. PhD dissertation. University of Texas at Austin, 1989.

Valkovic V. Trace elements in coal: volumes I and II. Boca Raton, FL: CRC Press, 1983.

Van der Sloot H.A., Nieuwendijk B.J. T. Release of trace elements from surface-enriched fly ash in seawater // *Wastes in the Ocean*. 1985. Vol. 4. P. 449–465.

Wang D., Wan K., Yang J. Measurement and evolution of eco-efficiency of coal industry ecosystem in China // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 209. P. 803–818.

Wang L., Sun H., Sun Z., Ma E. New technology and application of brick making with coal fly ash // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2016. Vol. 18. P. 763–770.

Wu B., Ci L.J. Landscape change and desertification development in the Mu Us Sandland, Northern China // *Journal of Arid Environments*. 2002. Vol. 50. P. 429–444.

Wu E.J., Chen K.Y. Chemical form and leachability of inorganic trace elements in coal ash. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, EA-5115, 1987.

Wu J., Bai G.L., Zhao H.Y., Li X. Mechanical and thermal tests of an innovative environment-friendly hollow block as self-insulation wall materials // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. P. 342–349.

Xu S., Wang J., Jiang Q., Zhang S. Study of natural hydraulic lime-based mortars prepared with masonry waste powder as aggregate and diatomite/fly ash as mineral admixtures // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 119. P. 118–127. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.069

Yao Z.T., Xia M.S., Sarker P.K., Chen T. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China // *Fuel*. 2014. Vol. 120. P. 74–85.

Zang W.C., Wang F. Adhere to green development and promote industrial solid waste management and utilization // *Environmental Protection*. 2018. Vol. 46. No. 16. P. 12–16. (in Chinese).

Zhuang X.Y., Chen L., Komarneni S., et al. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 125. P. 253–267.

Статья поступила в редакцию 21.05.2025,  
одобрена после рецензирования 23.05.2025,  
принята к публикации 30.10.2025