

Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС

Золотова Ирина Юрьевна,

директор Центра отраслевых исследований и консалтинга ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», IYZolotova@fa.ru

В данной статье автором предлагается проводить бенчмаркинг лучших практик утилизации промышленных отходов на примере золошлаков угольных ТЭС (ПСТТ-ЗШО). Данный подход позволяет учитывать фактор значимости угольной генерации в обеспечении граждан электрической и тепловой энергией за счет нормирования утилизируемых отходов на численность населения. На основе предложенного подхода были выявлены страны-лидеры в области утилизации ПСТТ-ЗШО: Китай, Австралия, США, Индия и Япония. Детальный анализ зарубежных практик утилизации ПСТТ-ЗШО представлен в статье. В частности, были выявлены три модели утилизации ПСТТ-ЗШО: строительная (более 90% утилизируется за счет строительной отрасли – доминирует в Китае), сельскохозяйственная (помимо строительной более 15% от общего объема утилизируемых ПСТТ-ЗШО приходится на сельское хозяйство – доминирует в Японии и Индии) и горно-строительная (наравне со строительной отраслью существенные объемы утилизируются за счет рекультивации нарушенных земель и ликвидации горных выработок – доминирует в США и Австралии). В заключении отмечается важность учета регионального фактора при реализации исследований области утилизации ПСТТ-ЗШО в России, в частности в связи с существенными региональными отличиями в части потенциальных направлений полезного использования золошлаков.

Ключевые слова: утилизация промышленных отходов, экология электроэнергетики, угольная генерация, золошлаковые отходы, зарубежный опыт

Введение

Энергетическая стратегия на период до 2035 года (далее – Энергостратегия-2035) впервые в новейшей истории России устанавливает целевой показатель по объемам утилизации продуктов сжигания твердого топлива (золошлаков) угольных ТЭС (далее – ПСТТ-ЗШО) – 50% от годового объема образования к 2035 году [16]. По данным Минэнерго России, в 2018 году данный показатель составлял 8,4% (базовое значение в проекте Энергостратегии-2035). В данной работе поставлена цель оценить передовые зарубежные практики полезного использования золошлаков угольных ТЭС.

Страны-лидеры по объемам утилизации золошлаков

Бенчмаркинг стран по уровню утилизации ПСТТ-ЗШО предлагается произвести на основе сопоставления объемов образования ПСТТ-ЗШО и их вовлечения в хозяйственный оборот. Данные по странам с наибольшим объемом использования ПСТТ-ЗШО и продукции на основе ПСТТ-ЗШО представлены в таблице 1. Наибольшая часть образуемых и утилизируемых ПСТТ-ЗШО приходится на Китай. Причем существенные темпы роста образования ПСТТ-ЗШО не повлияли на способность китайских электростанций удерживать процент утилизации на уровне 70%. На втором месте в мире по образованию ПСТТ-ЗШО находится Индия, где за 6 лет объем формируемых золошлаков вырос почти вдвое. Более 100 млн т ежегодно образуется на электростанциях в США, однако объемы угольной генерации в стране постепенно снижаются. Аналогичный тренд можно наблюдать в странах Европейского Союза (ЕС), где три страны (Австрия, Швеция и Бельгия) уже сумели реализовать 100%-й отказ от угольной генерации, а также ряд государств публично задекларировали о подобных планах.

Особенно важно рассматривать объемы утилизации ПСТТ-ЗШО в контексте значимости угольной генерации для обеспечения граждан электрической и тепловой энергией. Для учета данного фактора предлагается нормировать утилизируемые объемы ПСТТ-ЗШО на численность населения. Таким образом мы сможем определить сопоставимые значения по объемам утилизации для стран с существенно отличными размерами угольной генерации (рисунок 1). На основе проведенного анализа можно констатировать, что наиболее успешные практики утилизации ПСТТ-ЗШО сформированы в Китае, Австралии, США, Индии и Японии.

Таблица 1
Объемы образования и утилизации ПСТТ-ЗШО в мире

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

*Европейский Союз-15: Бельгия, Дания, Франция, Германия, Греция, Ирландия, Италия, Люксембург, Нидерланды, Португалия, Испания, Великобритания, Австрия, Финляндия, Швеция

Источник: подготовлено авторами на основе [5, 7].

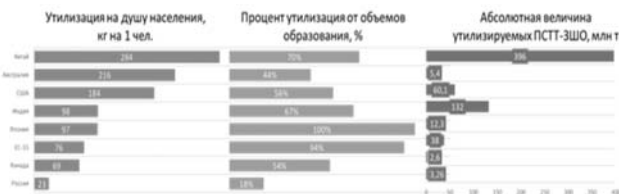


Рисунок 1 – Мировые лидеры по объемам утилизации ПСТТ-ЗШО

Источник: подготовлено авторами на основе [5].

Далее в статье будет приведено подробное описание опыта утилизации ПСТТ-ЗШО в странах-лидерах

Описание лучших практик Китай

В 2010 году в Китае были утверждены руководящие принципы по утилизации золы-уноса и введен ряд сопутствующих мер, таких как финансирование или налоговые льготы для проектов, использующих золу-уноса [6]. Двенадцатый пятилетний план Китая (2011 – 2015 гг.) по комплексному использованию промышленных твердых отходов содержит целевой показатель по проценту использования выработанной золы-уноса. К 2015 году правительства КНР отчитались об успешном выполнении целевого показателя в 70% утилизации ПСТТ-ЗШО от годового объема образования (рисунок 2А).

Наибольшая доля утилизируемых ПСТТ-ЗШО в Китае (около 90%) приходится на строительную отрасль (рисунок 2Б). В частности, золошлаки используются в производстве цементных, бетонных и прочих строительных материалов. Применение ПСТТ-ЗШО в качестве добавки в цемент и бетон в Китае практикуется с 1950-х годов с целью замещения некоторых глинистых материалов, кремнезема или глиноземсодержащих материалов. Добавление ЗШО в смесь для газобетон-

ных блоков получило широкое распространение в связи с наличием экономических выгод использования данного направления утилизации золошлаков - снижение потребности в энергии на термическую обработку материалов.

Одним из перспективных направлений утилизации ПСТТ-ЗШО в Китае сегодня является извлечение глинозема. Содержание оксида алюминия в золах углей, добытых на месторождения в провинциях Восточная Монголия и Шаньси, составляет от 40% до 50% общей массы, что делает их полноценным заменителем бокситов (наиболее распространенного источника глинозема в мире) [4].

С 2011 года зола с высоким содержанием оксида алюминия включена в перечень приоритетных материалов промышленности производства Китая [15]. Благодаря данной инициативе компании, планирующие организовать перерабатывающие предприятия для извлечения глинозема из ПСТТ-ЗШО, могут претендовать на бюджетные субсидии, направляемые на компенсацию части капитальных затрат. На сегодняшний день масштабы производства построенных в рамках данной инициативы заводов составляют 6 млн тонн глинозема в год [12]. На сегодняшний день в Китае действует алюминиевый технопарк при крупнейшей угольной ТЭС в мире – ТЭС Тогто (установленной мощностью 6,7 ГВт), где была успешно апробирована опытная установка извлечения глинозема из ПСТТ-ЗШО.

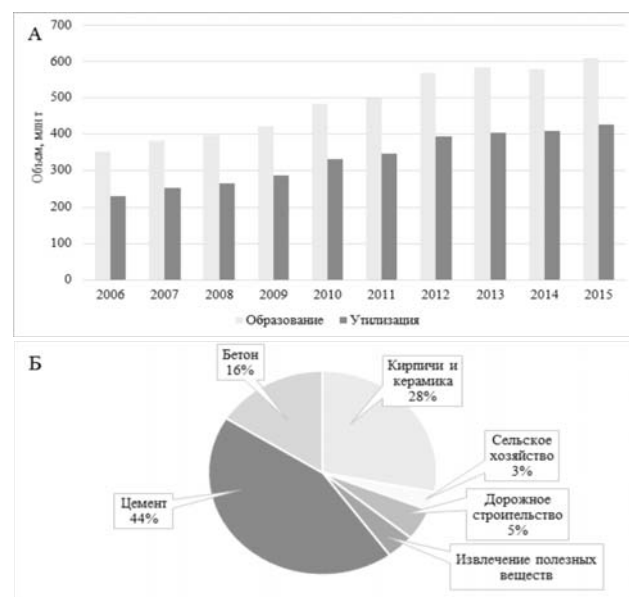


Рисунок 2 — Динамика образования и утилизации золы-уноса и основные направления ее использования в Китае в 2006-2015 гг.

Источник: подготовлено автором на основе [11].

Существенным барьером для выхода на 100%-й показатель утилизации ЗШО в Китае является географический дисбаланс расположения источников образования золошлаков и потенциальных потребителей (рисунок 3). Максимальные уровни утилизации достигают ТЭС, расположенные ближе к западной части страны, где расположена наибольшая часть строительных предприятий [10].



Рисунок 3 – География образования и потребления золошлаков в Китае
Источник: [10]

Австралия

В 2018 году в Австралии в хозяйственный оборот было вовлечено 5,936 млн т ЗШО или 47% от годового объема образования. Динамика объемов образования и утилизации золошлаков с 2014 года представлена на рисунке 4А.

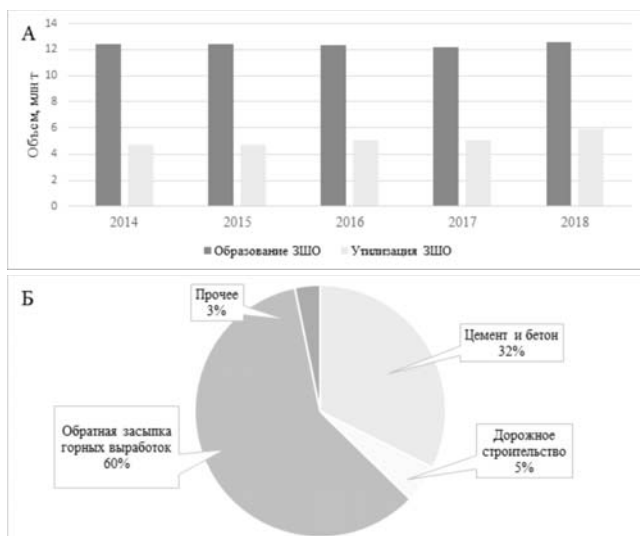


Рисунок 4 — Динамика образования и утилизации ПСТТ-ЗШО и направления их использования в Австралии в 2014-2018
Источник: подготовлено автором на основе [8]

В целом по Австралии наблюдается тренд на снижение спроса на уголь в качестве топлива для электростанций как результат проводимой правительством политики по увеличению доли возобновляемых источников энергии и реализации программы приватизации правительством субъектов электроэнергетики. Основная часть, около 60%, утилизированных ПСТТ-ЗШО приходится на обратную засыпку горных выработок (рисунок 4Б).

Согласно данным Ассоциации развития золошлаковой индустрии Австралии (Ash development association of Australia - ADAA) [1], спрос на производственные мощности для использования золы-уноса с каждым годом растёт, поэтому необходимо их развивать с учетом модернизации системы хранения и поставок ПСТТ-ЗШО. На сегодняшний день в Австралии также наблюдается

географическая неравномерность спроса ПСТТ-ЗШО. Сильно растет спрос на ЗШО вблизи крупных городов, по большей части это связано с развитием инфраструктуры крупных городов. В связи с этим, особенно актуален вопрос оптимизации системы поставок, которая неизбежно влияет на себестоимость утилизации ПСТТ-ЗШО.

В 2018 году лишь чуть более 30% утилизируемых ЗШО были использованы в производстве продукции и материалов. При этом большая часть вовлекаемых ЗШО состоит из сухой золы-уноса, объем которой составляет 88% образованного количества ЗШО в 2018 году [1]. Примерно 3,93 млн ЗШО в Австралии утилизируется негерметизированным способом в качестве грунта для насыпей и ликвидации горных выработок. Членами ADAA данный факт отмечается как негативный, поскольку негерметизированная утилизация создает минимальную экономическую стоимость и не позволяет генерировать экологические эффекты.

США

На сегодняшний день в США, несмотря на активное внедрение «зеленой» генерации, треть электроэнергии вырабатывается угольными электростанциями. США является второй страной в мире (после Китая) по объемам потребления энергетического угля. В связи с этим в США образовывается значительное количество ЗШО. С 1968 года Американская золошлаковая ассоциация (American coal ash association - АСАА) осуществляет мониторинг объемов образования и практик утилизации всех видов ПСТТ-ЗШО.

В 2018 году в США наблюдалось ухудшение ситуации в части использования золошлаков (как в абсолютных, так и относительных показателях): так в 2018 году было утилизировано 57% от годового объема образования ПСТТ-ЗШО, что ниже на 7 п.п. соответствующего показателя за 2017 год. В то же время на протяжении последних лет в США перерабатывается свыше 50% образованных золошлаков [2]. Динамика производства и утилизации ЗШО представлена на рисунке 5А.

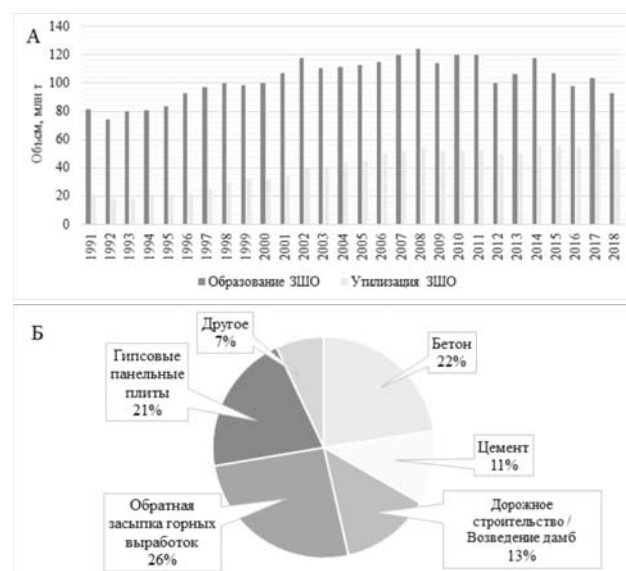


Рисунок 5 — Динамика образования и применения ПСТТ-ЗШО и направления их использования в США в 1991-2018 гг.
Источник: подготовлено авторами на основе [2].

Использование золы-уноса в качестве добавки в бетон в 2018 году снизилось на 11% (до 12,5 млн т). Производители бетона указали на дефицит золы-уноса в 2018 году. В 2018 году объем использования угля был рекордно низким, соизмеримым с показателями 1996 года, следовательно, был образован наименьший объем ЗШО за более чем 20 лет. Данное снижение связано с закрытием ряда угольных электростанций. По тем же причинам на 23% (до 12,3 млн т) сократилось использование золы-уноса в синтетическом гипсе, используемом в строительстве панельных сооружений.

Довольно широкое применение золошлаков в США получило использование золы-уноса в строительстве автомобильных дорог и мостов. Совокупный экономический эффект для дорожностроительной отрасли США от использования ПСТТ-ЗШО оценивается в 5,2 млрд USD ежегодно [2]. Крупнофракционная зола часто используется в качестве наполнителя в строительной отрасли, заменяя гравий и песок. Котловой шлак, собранный у основания котлов старого поколения, имеет высокий спрос для использования его в качестве пескоструйного очистителя и кровельных гранул. Но основным направлением применения котельной золы по-прежнему остаётся обратная засыпка шахт.

Во время фильтрации дымовых газов на электростанциях при использовании систем десульфуризации создаются побочные продукты, одним из которых является синтетический гипс. Этот продукт технически не является золой, однако в США обращение с ним регулируется и управляется как с продуктом сжигания твердого топлива. Синтетический гипс широко применяется при производстве стен и перекрытий. Более половины гипсокартонных плит, произведенных в США, используют синтетический гипс от угольных электростанций [2]. Помимо этого, синтетический гипс используется в сельском хозяйстве в качестве удобрения почвы.

Индия.

Индия – один из крупнейших потребителей электроэнергии в мире после Китая и США. Доля угольной генерации в общей выработке электроэнергии в Индии составляет более 80%. Согласно данным Министерства угольной промышленности Индии, с апреля 2018 года по март 2019 потребление угля в Индии составило 991 млн т [3]. В 2018 году в Индии было утилизировано 67% образованных ЗШО, что выше на 4 п.п. по отношению к уровню 2017 года [14]. С 2006 года перерабатывается более 50% образованных ПСТТ-ЗШО (рисунок 6А).

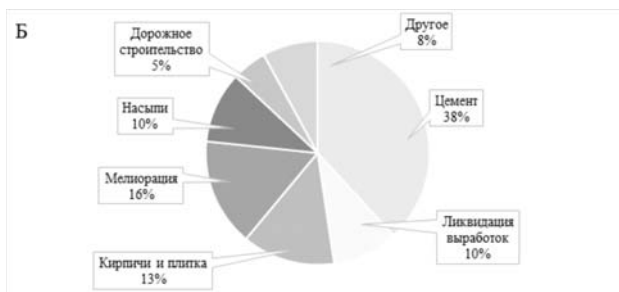


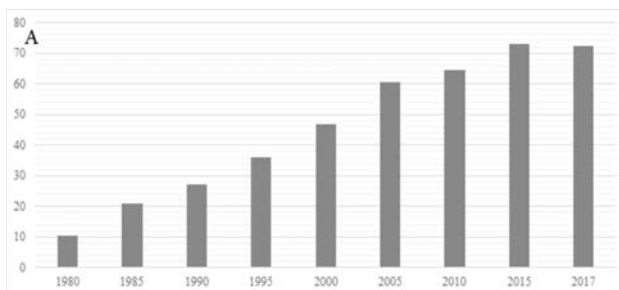
Рисунок 6 — Динамика образования и утилизации ПСТТ-ЗШО и направления их использования в Индии в 2004-2018
Источник: подготовлено автором на основе [14]

На рисунке 6Б представлена диаграмма использования ПСТТ-ЗШО в Индии в разрезе отраслей. Существенная часть золошлаков утилизируется за счет их использования в строительной отрасли. На производство строительных материалов (кирпичей, цемента, плитки) в 2018 году пришлось 51% утилизированных ПСТТ-ЗШО. На сегодняшний день химический состав золы-уноса позволяет заменить 35% массы цемента в бетонных смесях. На замену песку и гравию в дорожных насыпях и строительстве автомобильных дорог в 2018 году приходилось 10% и 5% утилизированных ЗШО соответственно.

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

Япония.

В Японии проблема утилизации золошлаков ТЭС стала актуальной еще в 80-е годы прошлого столетия. Япония является одним из крупнейших импортёров угля в мире, и для обеспечения энергобезопасности особое внимание было уделено развитию атомной энергетики. Таким образом, ожидалось существенное сокращение угольной генерации. Однако авария на АЭС Фукусима-1 в 2011 году стала причиной приостановки развития атомной энергетики и наращивания объемов угольной генерации в Японии. На сегодняшний день доля угольной энергии в общем объеме генерации составляет 38% [8]. Объемы использования угля для производства электроэнергии с 1980 года показаны на рисунке 7А.



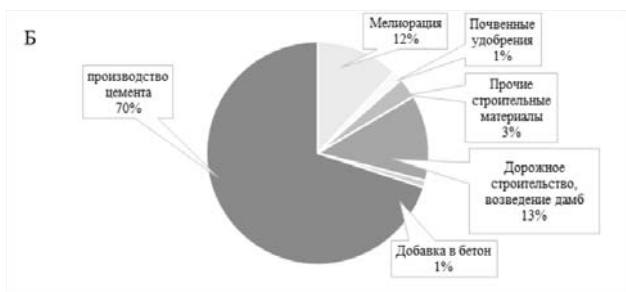


Рисунок 7 — Динамика образования и утилизации ПСТТ-ЗШО и направления их использования в Индии в 2004-2018, млн т.у.т

Источник: подготовлено автором на основе [8, 9]

Годовой объем образования ЗШО составляет порядка 12,3 млн т. Япония сумела достигнуть 100%-й уровень утилизации золошлаков. Большая часть вовлекаемых в хозяйственный оборот золошлаков приходится на строительную отрасль (85%) [9], рисунок 7Б. Центр угольной энергетики Японии (*Japan Coal Energy Center - JCOAL*) регулярно актуализирует стратегию эффективного использования ПСТТ-ЗШО в хозяйственной деятельности Японии. Отдельно стоит отметить логистику поставок ПСТТ-ЗШО. 80% угольных ТЭС в Японии находятся в прибрежных зонах, что позволяет доставлять ЗШО морским транспортом, существенно снижая себестоимость транспортировки.

Япония является одной из немногих стран, экспортирующих ПСТТ-ЗШО в существенных объемах. В среднем за год из Японии поставляется 1,28 млн т ЗШО в Южную Корею. При этом дистанция между ближайшими портами Японии (Фукуока) и Кореи (Пусан) оставляет 210 км. В год осуществляется порядка 400 рейсов для перевозки ПСТТ-ЗШО. Однако в 2019 году было объявлено, что объемы импорта золы-уноса со стороны Кореи сократятся в связи с учащением случаев поставок золошлаков с высоким содержанием радионуклидов и тяжелых металлов [13].

Заключение

На основе бенчмаркинга ведущих стран по объемам утилизации золошлаков можно выделить три основных модели, которые используются в зарубежной практике:

- Строительная модель: более 90% утилизируемых ПСТТ-ЗШО приходится на производство строительной продукции, при этом ни одно другое направление не имеет удельного веса более 5%. Такой подход доминирует в Китае.

- Сельхоз-строительная модель: помимо строительной отрасли ПСТТ-ЗШО активно используется для сельскохозяйственных нужд: в качестве мелиоранта (порядка 20 млн т ежегодно в Индии) или, как в Японии, при производстве почвенных удобрений на цеолитной основе.

- Горно-строительная модель: более чем четверть утилизируемых ПСТТ-ЗШО приходится на обратную засыпку отработанных месторождений. Подобная модель успешно реализуется в США и Австралии, где были доказаны технологические и экономические выгоды от использования золошлаков при ликвидации горных выработок.

Для России возможен переход на любую из вышеперечисленных моделей. Однако необходимо учитывать

необходимость дифференциации подходов по развитию масштабного вовлечения золошлаков в хозяйственный оборот на региональном уровне. Данный аспект особенно актуален в контексте предложенного в данной статье подход к бенчмаркингу территорий по объемам утилизируемых ПСТТ-ЗШО. В России мы можем наблюдать ярко выраженную региональную концентрацию угольной генерации (большинство ТЭС расположены в регионах Сибирского и Дальневосточного федеральных округов). Подобный факт указывает на необходимость учета не только образуемых и утилизируемых ПСТТ-ЗШО, но и вклада угольной генерации в обеспечении граждан электрической и тепловой энергии при выявлении лучших практик. Именно вопрос региональной дифференциации можно обозначить как одно из приоритетных направлений для дальнейших исследований в области утилизации ПСТТ-ЗШО в России.

Литература

1. Annual Production and Utilisation Survey Report// Ash Development Association of Australia (ADAA) URL: <https://www.adaa.asn.au/files/download/37ae3c2f1f1fdbf> (дата обращения: 24.04.2020).
2. Beneficial use of coal combustion products // American Coal Ash Association (ACAA) URL: <https://www.acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/ACAA-Brochure-Web.pdf> (дата обращения: 24.04.2020).
3. Coal and lignite production, Annual report 2018-19// Ministry of coal (India) URL: https://www.coal.nic.in/sites/upload_files/coal/files/coalupload/chap6AnnualReport1819en.pdf (дата обращения: 24.04.2020).
4. Ding J. et al. Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash: A concise review //Waste Management. – 2017. – Т. 60. – С. 375-387.
5. Global aspects on Coal Combustion Products // Coaltrans Conferences URL: <https://www.coaltrans.com/insights/article/global-aspects-on-coal-combustion-products> (дата обращения: 20.03.2020)
6. He Y., Luo Q., Hu H. Situation analysis and countermeasures of China's fly ash pollution prevention and control //Procedia Environmental Sciences. – 2012. – Т. 16. – С. 690-696.
7. Heidrich C., Feuerborn H. J., Weir A. Coal combustion products: a global perspective //World of coal ash conference. – 2013. – С. 22-25.
8. IEA Sankey Diagram (balance) // International Energy Agency (IEA) URL: <https://www.iea.org/sankey/#?c=Japan&s=Balance> (дата обращения: 24.04.2020).
9. Kenichi Sato. et al. Effective use of coal ash as ground materials in Japan // International Workshop on Geotechnics for Resilient Infrastructure The Second Japan-India Workshop in Geotechnical Engineering – 2017 – С. 65-70.
10. Luo Y. et al. Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions //Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – С. 1-14.
11. Shu-Hua Ma. et al. Challenges and Developments in the Utilization of Fly Ash in China // International Journal of Environmental Science and Development – 2017 – Т. 8. – №. 11. – С. 781-785.
12. Sibanda V. et al. Towards the utilization of fly ash as a feedstock for smelter grade alumina production: a review

of the developments //Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Т. 2. – №. 2. – С. 167-184.

13. South Korean cement producers reduce coal ash imports from Japan // Global Cement URL: <https://www.globalcement.com/news/item/9744-south-korean-cement-producers-reduce-coal-ash-imports-from-japan> (дата обращения: 13.04.2020).

14. Venkatesh Sharma. et al. Trends in Utilization of Coal Fly Ash in India: A Review // Journal of Engineering Design & Analysis – 2019 – Т. 2. – №. 12-16. – С. 13-16

15. Yao Z. T. et al. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China //Fuel. – 2014. – Т. 120. – С. 74-85.

16. Энергетическая стратегия // Министерство энергетики Российской Федерации URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/1920/108852> (дата обращения 11.02.2020).

Benchmarking best practices of coal combustion product utilization

Zolotova I.Yu.

Financial University under the Government of the Russian Federation

This paper provides a proposal on conducting best practices benchmarking of industrial waste utilization with a specific overview of ash slag waste derived from coal power thermal power plants. The approach described in the article allows to account for the significance of coal power generation in a specific region by normalizing waste utilization volume on a per capita basis. By adopting this approach, the author was able to highlight the leading countries in coal combustion product utilization: China, Australia, USA, India and Japan. A more detailed analysis of waste utilization practices allowed to establish three key models: construction model (more than 90% of waste is utilized using construction products – well established in China), agriculture-construction model (apart from construction at least 15% of waste is utilized in fertilizer production – well established in Japan and India), and mining-construction model (in line with construction a sufficient amount of waste is utilized in mine backfilling projects – well established in USA and Australia). In conclusion, the author stresses the importance of the regional factor in future coal ash utilization studies in Russia, since sufficient regional disparities may occur in establishing key utilization areas.

Keywords: industrial waste utilization, ecology of power energy, coal powered generation, coal combustion products, international experience

References

1. Annual Production and Utilization Survey Report/ / Ash Development Association of Australia (ADAA) URL: <https://www.adaa.asn.au/files/download/37ae3c2f1f1fdbf> (accessed: 24.04.2020).
2. Beneficial use of coal combustion products // American Coal Ash Association (ACAA) URL: <https://www.acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/ACAA-Brochure-Web.pdf> (accessed: 24.04.2020).
3. Coal and lignite production, Annual report 2018-19// Ministry of coal (India) URL: https://www.coal.nic.in/sites/upload_files/coal/files/coalupload/chap6AnnualReport1819en.pdf (accessed: 24.04.2020).
4. Ding J. et al. Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash: A concise review // Waste Management. - 2017. - Vol. 60. - Pp. 375-387.
5. Global aspects on Coal Combustion Products // Coaltrans Conferences URL: <https://www.coaltrans.com/insights/article/global-aspects-on-coal-combustion-products> (accessed: 20.03.2020)
6. He Y., Luo Q., Hu H. Situation analysis and countermeasures of China's fly ash pollution prevention and control // Procedure Environmental Sciences. - 2012. - Vol. 16. - Pp. 690-696.
7. Heidrich C., Feuerborn H. J., Weir A. Coal combustion products: a global perspective // World of coal ash conference. - 2013. - Pp. 22-25.
8. IEA Sankey Diagram (balance) // International Energy Agency (IEA) URL: <https://www.iea.org/sankey/#?c=Japan&s=Balance> (accessed: 24.04.2020).
9. Kenichi Sato. et al. Effective use of coal ash as ground materials in Japan // International Workshop on Geotechnics for Resilient Infrastructure The Second Japan-India Workshop in Geotechnical Engineering – 2017 – Pp. 65-70.
10. Luo Y. et al. Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions // Environmental Science and Pollution Research. - 2020. - Pp. 1-14.
11. Shu-Hua Ma. et al. Challenges and Developments in the Utilization of Fly Ash in China // International Journal of Environmental Science and Development – 2017 – Vol. 8. – No. 11. – Pp. 781-785.
12. Sibanda V. et al. Towards the utilization of fly ash as a feedstock for smelter grade alumina production: a review of the developments // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Vol. 2. – No. 2. – Pp. 167-184.
13. South Korean cement producers reduce coal ash imports from Japan // Global Cement URL: <https://www.globalcement.com/news/item/9744-south-korean-cement-producers-reduce-coal-ash-imports-from-japan> (accessed: 13.04.2020).
14. Venkatesh Sharma. et al. Trends in Utilization of Coal Fly Ash in India: A Review // Journal of Engineering Design & Analysis-2019-Vol. 2. - No. 12-16 – P. 13-16
15. Yao Z. T. et al. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China // Fuel. - 2014. - Vol. 120. - Pp. 74-85.
16. Energy strategy // Ministry of energy of the Russian Federation URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/1920/108852> (accessed 11.02.2020).