This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Review Article
Received: February 19, 2023 Accepted: March 20, 2023 Published: March 27, 2023
ISSN 2658-5553

The world experience in using fly ash as a secondary resource and features of its application in the Russian Federation: Overview

Vafaeva, KHristina Maksudovna[1*]
Shinkareva, Maria Konstantinovna[1]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;
Correspondence:* email vafaeva_hm@spbstu.ru; contact phone +79522076649

Keywords:

Ash and slag waste; Ash and slag materials; Ash and slag disposal; Fly ash; Ash dump

Abstract:

The object of research is fly ash as part of ash and slag waste generated due to the production activities of thermal power plants, CHP. This work aims to systematize data on the volumes of fly ash generated as part of ash and slag waste, disposal methods, and a review of the world's experience in using fly ash to produce building materials. Research **methods**: overview literature sources, annual reports of energy companies, generalization, identification of potential uses of ash and slag, and the main obstacles. **Results**. The analysis of the Russian experience of industrial waste management shows the growing interest of the state and businesses in waste management methods. At the same time, the increase in processing volumes is limited by several regulatory, technical, and economic barriers. While studying scientific papers, it can be concluded that research mainly aims to improve the physical and chemical characteristics of materials using fly ash. With the complex use of ash and slag waste as secondary resources and the production of building materials, it is necessary to consider the different compositions of ash dumps.

1 Introduction / Введение

Накопление золошлаковых отходов (ЗШО) получаемых в результате сжигания углей ТЭС и ТЭЦ приводит к стремительному росту экологических и экономических издержек. В РФ ежегодно образуется около 25 - 30 миллионов тонн ЗШО, а накопленный объем оценивается в 1.5-2 миллиарда тонн, что говорит о важности угольной энергетики в РФ, которая охватывает примерно пятую часть в структуре электрогенерации [1].

В РФ утилизируется предположительно 10% от общего объема накопленных ЗШО [2]. Золоотвалы, содержащие золошлаковые отходы, являются значительным источником неблагоприятного воздействия на окружающую среду.

При современном уровне и масштабах потребления природного сырья первостепенное значение имеет полное использование и вовлечение в производство отходов как вторичного материального ресурса. Освоение природных ресурсов и отказ от строительства новых золошлакоотвалов удешевит как производство строительных материалов, так и промышленное и гражданское строительство. Состав и свойства золошлаков зависят от состава минеральной фракции топлива, типа системы пылеудаления, режима сжигания, способа улавливания и удаления, места сбора золошлаков в улавливающих установках, на золоотвале.

Зола – несгорающий остаток с зернами мельче 0.16 мм, образующийся из минеральных примесей топлива при полном его сгорании и осажденный из дымовых газов золоулавливающими устройствами [3].

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Поскольку золоотвалы являются источником увеличения опасности для окружающей среды, грамотная утилизация золошлаковых отходов представляет собой сложную и комплексную проблему, связанную со снижением уровня негативного воздействия на экологию. Таким образом, актуальность поиска новых способов утилизации ЗШО очевидна, поскольку в РФ почти 70 % всей электроэнергии вырабатывается за счет сжигания твердого топлива [4].

Согласно информации, представленной Национальной ассоциацией развития вторичного использования сырья уровень заполняемости золоотвалов в РФ составляет 80% и дополнительные затраты при сохранении текущей модели обращения с золошлаками ТЭС составит 113.7 млрд. руб. до 2035 г.

Актуальность исследования обусловлена тем, что современное производство ориентировано на разработку эффективных материалов, которые обеспечивали бы минимальное потребление сырья, снижение его стоимости и энергозатрат при производстве и непосредственное использование вторичных ресурсов. Так как переработка, утилизация, обезвреживание и сбор промышленных отходов являются одной из наиболее острых экологических проблем [5]. ЗШО составляют 95% от общего количества отходов производства и потребления объектов электроэнергетики. ЗШО имеют хорошую перспективу широкого применения в целях ресурсосбережения, потому что золошлаковый материал представляет собой ценное минеральное сырье, которое можно использовать в металлургии, строительной индустрии, при сооружении дорог, в сельском хозяйстве.

Цель данной **работы** состоит в систематизации данных об объемах образуемой золы уноса в составе золошлаковых отходов, возможных методов утилизации, обзора мирового опыта использования золы уноса при производстве строительных материалов и выработки практических рекомендаций к их производству. **Объектом исследования** является зола уноса в составе золошлаковых отходов, образуемая в результате производственной деятельности ТЭС, ТЭЦ. Основные **методы исследования** в данной работе: аналитический обзор литературных источников, годовых отчетов энергетических компаний, систематизация и обобщение.

В ходе изучения научных работ можно сделать вывод, что исследования в основном направлены на улучшение физико-химических характеристик материалов с использованием золы. Необходимо отметить, что золоотвалы отличаются по составу. Поэтому следует учитывать различия составов золоотвалов при производстве строительных материалов и комплексного использования ЗШО в качестве вторичного ресурса.

2 Overview of world experience/ Обзор мирового опыта

Модели утилизации ЗШО мировых лидеров в этой области можно поделить на три вида: строительная модель, горно-строительная модель и сельхоз-строительная модель, графически показывает Рисунок 1 (Данные по ряду страну актуальны на 2018 год.) [6].

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

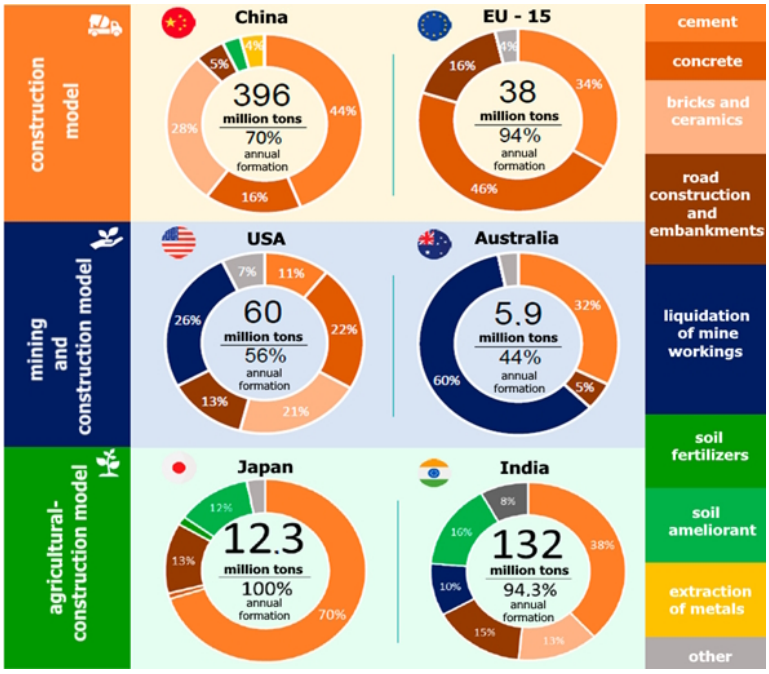

Рис. 1 – Модели утилизации ЗШО в мире [6]
Fig. 1 – Models of waste disposal in the world [6]

Строительная модель. Патентную и научно-техническую информацию по утилизации золы и шлака можно сгруппировать по трем направлениям: гидроудаление, сухое удаление всей массы золы с последующей ее утилизацией, частичная утилизация золы в производстве строительных материалов.

К примеру, авторами [7] в ходе исследования в качестве образца был изготовлен строительный раствор с использованием дополнительного материала - асбестовых отходов и золы уноса. Утилизация промышленных отходов или вторичных материалов стимулировала цементную и бетонную промышленность к производству более выгодных продуктов.

Переработка отходов имеет большой потенциал в бетонной промышленности. За последние десятилетия были проведены интенсивные научные исследования с целью изучения всех возможных методов повторного использования. Строительные отходы, зола уноса и т.д. были исследованы в качестве альтернативных методов замены цемента и заполнителей. Было выявлено, что свойства золы уноса способствуют увеличению прочности и повышению долговечности при использовании с портландцементом [8].

Некоторые цементные заводы начали использовать золу унос при производстве портландцемента, но общее использование остается низким, а большая часть золы уноса выбрасывается на свалки [9]. Также исследовалось влияние золы уноса на прочность цементных растворов с использованием ее содержания с диапазоном до 25% [10]. Использование золы уноса в бетоне в пропорциях от 30 до 65 процентов от общего количества цементирующих вяжущих широко изучалось в течение последних двадцати лет [11]. Детальные исследования золы уноса показывают также, что зола уноса обладает хорошим потенциалом для использования при строительстве автомобильных дорог [12].

Авторами [13] изучалась возможность нейтрализации расширения золы уноса с Березовской ГРЭС (РФ) с высоким содержанием кальция при гидратации, результаты показали, что свободная известь в золе уносе полностью гидратировалась за 11 дней и давала наибольшее расширение в отсутствие микрокремнезема. Экспериментальное исследование [14] заполнителей из золы уноса с Новосибирской ТЭЦ - 5 показало возможность эффективного использования в широких классах конструкционных бетонов.

Исследования влияния добавок золы уноса на тепловое расширение, прочность, усадку и тепловыделение бетона показали, что добавление 30% золы уноса сверх содержания цемента увеличивает тепловое расширение в 6 раз и то, что образцы с добавлением золы уноса из горючих сланцев поглощают больше влаги, чем смеси без золы уноса [15].

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Результаты других исследований показали эффективное прогнозирование параметров прочности бетона с различными пропорциями золы уноса при помощи машинного обучения, где обучение и тестирование моделей происходило на основе базы данных из опубликованной литературы [16]. Прогнозирование влияния угольной золы уноса на физико-механические свойства композитов с металлической матрицей обсуждалось в статье [17].

В обзорных статьях [18,19] обсуждались характеристики композитов на цементной основе, содержащих золу уноса в качестве дополнительного цементирующего материала, оценивались механические и микроструктурные свойства бетона на основе золы уноса, обобщались различные физические, химические, минералогические характеристики. Авторы [20] продемонстрировали, что зола уноса, добавляемая в бетон и в строительные растворы в количестве 10%-15%, не снижает их технических свойств, определили влияние добавления золы уноса на свойства бетонной смеси и максимально возможное содержание золы уноса, которое может быть добавлено в бетон для максимизации определенных свойств.

Зола уноса использовалась для строительства Римского Колизея, 2000-летнего сооружения, которое до сих пор выдерживает испытание временем [21]. Согласно исследованиям более 22 миллиона тонн золы уноса ежегодно используется в различных инженерных целях [22]. Типичные области применения в дорожном строительстве включают:

-портландцементный бетон (PCC)

-стабилизация грунта и дорожного основания

-цементные растворы,

- асфальтобетонный наполнитель.

Исследователями [23] были предприняты попытки разработать новую методику создания смесей для получения легких заполнителей из золы уноса, являющейся более надежной, чем существующие процедуры. Кроме того, предложенная методология была подтверждена путем разработки спектра бетонов, имеющих водоцементное соотношение, варьирующееся от 0.25 до 0.75.

В автомобильной промышленности зола уноса использовалась в качестве теплозащитного покрытия в двигателях внутреннего сгорания, тогда как в аэрокосмической промышленности, где требуются более легкие и прочные материалы, зола уноса использовалась в качестве армирующего материала. Использование золы уноса открыло новый рубеж исследований в области нанесения покрытий термическим напылением, где экономически жизнеспособные покрытия могут быть получены с использованием промышленных отходов [24].

Авторами [25] был принят статистический и вычислительный подход с использованием MATLAB для оценки влияния различных параметров на прочность бетона с использованием интегрированных математических графиков, где на основе стандартных результатов определения характеристик, полученных при проведении различных испытаний образцов, представлена модель оптимизации для достижения оптимальной дозировки золы уноса в бетоне, путем построения поверхностного графика с учетом соотношения воды к цементу, гидратации и достигнутой прочности в качестве ориентировочных параметров, после была получена оптимальная дозировка золы уноса.

Поиск новых способов переработки отходов производства для улучшения характеристик различных строительных материалов является актуальной научной задачей. Исследовалась разработка грунтобетонов на основе суглинка и золы уноса, модифицированных стабилизирующей полимерной добавкой, была установлена принципиальная возможность использования золы уноса в составе грунтобетона как эффективного способа решения ряда экологических проблем [26].

Горно-строительная модель. Одним из наиболее перспективных способов повторного использования отходов горнодобывающей промышленности является их применение в строительстве. Авторами [27] проведено экспериментальное исследование с целью изучения возможного повторного использования пустой породы, образующейся при добыче полезных ископаемых, в виде мелких заполнителей в геополимерах на основе золы уноса. Образцы геополимеров на основе золы уноса готовили предварительно смешивая порошкообразные материалы и гомогенизировали в сухом виде, а затем к сухой смеси добавляли раствор активатора [27].

В Индии были предприняты попытки массового использования золы уноса при подземной закладке и обратной засыпке шахт, авторами [28] проанализированы проблемы, с которыми

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

столкнулись во время экспериментов и возможные решения для устранения препятствий. Применение золы уноса в горнодобывающей промышленности можно подразделить на три категории: использование золы уноса в качестве заменителя извести, поверхностная обработка почвы, обратная засыпка шахт [29].

Авторы [30] исследовали применение золы уноса для нейтрализации кислотного дренажа шахты и определили, что эффективность нейтрализации зависит от содержания оксидов в золе уноса.

Сельскохозяйственная модель. В сельском хозяйстве большинство исследований сосредоточены на применении золы уноса в качестве добавки к удобрениям, так как зола уноса имеет химический состав аналогичный цеолиту [31]. Из-за простоты синтеза в чистом виде и лучшей ионообменной способности особое внимание уделяется синтезированию цеолита гидротермальным методом из золы уноса и другого сырья невысокой стоимости. Показано, что синтезированные цеолиты в сравнении с природными цеолитами обладают лучшей ионообменной способностью [32].

Зола уноса обладает свойствами обогащения питательными веществами, поэтому полезна для улучшения роста и урожайности сельскохозяйственных культур на кислых латеритных почвах с низким плодородием [33]. Многие исследователи продемонстрировали повышение урожайности с применением золы уноса для улучшения физических и химических характеристик почвы [34–37]. Комплексное использование золы уноса с химическими удобрениями и органическими материалами может повысить эффективность использования удобрений [38]. Авторами [39] также исследовалось применение золы уноса в сельскохозяйственных почвах, что показало многообещающие результаты в отношении растениеводства, за счет высокого содержания минеральных веществ и уникальных физико-химических свойств. Показано, что зола уноса может быть заменяющим материалом для использования в стабилизации почвы, что приводит к существенным экономическим и экологическим выгодам [40].

Интересным направлением использования золы уноса является ее применение для очистки сточных вод. Предложенная авторами [41] система, содержащая золу уноса, значительно улучшила качество воды для целей орошения за счет снижения мутности на 95%, цвета на 98% и содержания хлоридов на 49% и увеличения содержания растворенного кислорода на 33%.

В обзоре [42] рассматривались и сравнивались последние результаты, преимущества и недостатки различных методов обработки золы уноса, в итоге делается вывод о том, что одновременное применение различных методов может привести к высокоэффективному удалению/стабилизации тяжелых металлов при одновременном учете экономических и экологических соображений.

Было отмечено, что большинство исследований показали улучшение физико-химических характеристик материалов с использованием золы уноса. Таблица 1 показывает краткую сводную информацию об определенных улучшенных свойствах строительных материалов.

Таблица 1. Краткое изложение результатов исследований
Table 1. Summary of research results

№	Материал	Краткое описание исследования/результатов	Источник
1	Бетон	Осадка бетонной смеси при различном размере частиц золы уноса увеличивается с увеличением содержания золы уноса. Чем меньше размер частиц золы уноса, тем больше оптимальная дозировка в бетоне. Когда размер частиц золы уноса составляет менее 5 мкм, оптимальная дозировка золы уноса в бетоне составляет 30% для обеспечения необходимой прочности на сжатие. Закон вариации заключается в том, что прочность на разрыв и прочность на изгиб бетона из золы уноса являются самыми высокими, когда содержание золы уноса составляет 20-30%	[43]
2	Бетон	Авторами рассматривается разработка легкого заполнителя в сочетании с золой уноса. Исследование	[44]

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

№	Материал	Краткое описание исследования/результатов	Источник
		показывает краткий анализ долговечности и водопоглощающих свойств бетона на основе золы уноса. Эксперименты проводились путем подвергания проницаемого бетона на основе золы уноса различным химическим воздействиям, таким как сульфат натрия, серная кислота и морская вода. Для проверки характеристик предлагаемого проницаемого бетона на основе золы уноса была приготовлена двадцать одна смесь с различными соотношениями воды к цементу и цемента к заполнителю. В исследовании использовались заполнители размером 4.75, 9.5 и 12 мм, добавка 5-15% по весу цемента. Результаты испытаний показали, что потеря прочности и веса бетонных образцов из-за воздействия сульфата натрия, кислоты и морской воды увеличивается с увеличением отношения цемента к заполнителю и отношения воды к цементу. Наблюдения показали, что пропорция смеси, включающая соотношение цемента и заполнителя 1: 3, демонстрирует лучшие показатели долговечности при низком значении водопоглощения по сравнению с другими.	
3	Бетон	Целью исследования является оценка влияния смеси золы уноса биомассы с угольной золой уноса на свойства бетона. Замена смеси золы уноса на 20% улучшила 90-дневную прочность бетона на сжатие на 10% по сравнению с результатами образцов с тем же количеством несмешанной золы уноса биомассы.	[45]
4	Бетон	Авторами представлены результаты экспериментального исследования, проведенного для оценки влияния химического состава золы уноса на физико-механические свойства и стойкость железобетона к проникновению хлоридов. В исследовании рассматриваются цементирующие композиты, приготовленные с использованием двух различных типов золы уноса в качестве замены цемента, и сравниваются с эталонными образцами, приготовленными без золы уноса. Результаты экспериментов показывают, что характеристики затвердевшего бетона из золы уноса зависят не только от содержания CaO и SiO2 в добавке, но также от содержания свободной извести и сульфат-ионов. В частности, улучшаются прочностные свойства бетона, содержащего золу уноса с высоким содержанием SO3 и CaO.	[46]
5	Бетон	В этой работе авторы подготовили различные пропорции образцов, в которых связующий материал заменен золой уноса и измельченным гранулированным доменным шлаком (GGBS). Образцы были протестированы в свежем и затвердевшем состоянии с использованием обычного бетона. Сделан вывод, что зола уноса и GGBS, частично замененные цементом в бетоне, могут обеспечить лучшую обрабатываемость, а также лучшую прочность на сжатие, прочность на растяжение и прочность на изгиб по сравнению с обычным бетоном.	[47]

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

№	Материал	Краткое описание исследования/результатов	Источник
6	Бетон	Методом кольцевых испытаний была исследована 21 бетонная смесь с 30% содержанием золы уноса, 40 % и 60% содержанием шлака и 6 различными классами прочности в диапазоне от 20 МПа до 100 МПа. Сделан вывод, что высокопрочные бетонные и шлаковые смеси растрескиваются быстрее, в то время как зола уноса задерживает растрескивание.	[48]
7	Бетон	Авторами исследуется использование золы уноса с различным содержанием хлоридов в качестве дополнительного цементирующего материала для использования в бетоне. Были измерены три различные концентрации хлоридов (приблизительно 0.20%, 0.10% и 0.01%) в золе уноса и введены в бетон при 25% и 50% замене. В результате получился бетон, срок годности которого аналогичен бетону, выдержанному в условиях окружающей среды в течение 1 года. Исследование демонстрирует, что включение золы уноса с различным содержанием хлоридов не снижает долговечность. Кроме того, увеличение замены золы уноса с 25% до 50% привело к получению бетонов, обладающих повышенными прочностными свойствами.	[49]
8	Кирпич	Водопроницаемый керамический кирпич был получен из золы уноса простым методом гранулирования. Расход золы уноса в керамическом кирпиче составлял до 80% от массы. Водопроницаемые керамические кирпичи имели низкую токсичность для выщелачивания тяжелых металлов.	[50]
9	Стеклокерамика	Авторам удалось достичь производства стеклокерамики, полученной полностью из отходов. Продемонстрировано, что добавление золы уноса снижает концентрацию выщелачивания тяжелых металлов.	[51]
10	Асфальтобетонная смесь	В исследовании изучается влияние золы уноса и стеклопорошка в качестве наполнителя и крупного заполнителя из стального шлака на характеристики асфальтобетонных смесей для дорожного строительства. Включение золы улучшает влагостойкость смеси из стального шлака.	[52]
11	Дорожное покрытие	Было исследовано применение золы уноса для стабилизации глины с высокой пластичностью. Образцы, стабилизированные золой уноса, демонстрируют незначительное набухание и усадку. Пористость глины уменьшилась с 3.43% до 0.18% после стабилизации 20% золой уноса.	[53]
12	Керамическая плитка	Керамическая плитка на основе золы уноса, спеченная при 1100 °C, обладает оптимальными свойствами после спекания (объемная плотность 2.5 г/ см3; модуль прочности на разрыв 50.1 МПа; и водопоглощение 0%).	[54]

Во многих странах экономические и экологические факторы стали основным стимулом для повышения уровня утилизации ЗШО. Политика оплаты за вывоз отходов в Европе призвана предоставить дополнительный стимул электростанциям для утилизации образующихся золоотходов.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

С развитием технологий коэффициент использования золы уноса в некоторых развивающихся странах резко вырос. В будущем зола уноса должна классифицироваться как пригодных для использования материал, а не как опасный загрязнитель окружающей среды [55].

Таким образом, можно утверждать, что утилизация ЗШО осуществляется в различных отраслевых секторах. Утверждение целевого показателя в рамках Энергостратегии 2035 — это начальный шаг выработки комплексного решения из-за существующих барьеров в реализации эффективной утилизации ЗШО в РФ. Некоторые барьеры для реализации утилизации ЗШО в РФ можно свести к следующему: удаленность объектов образования ЗШО от потенциальных потребителей, транспортные затраты существенно превышают стоимость применения ЗШО в качестве вторичного сырья; риски роста цены поставок ЗШО, снижающие целесообразность в реализации инвестпроекта; отсутствие финансов, гарантирующих окупаемость затрат на модернизацию и высокие транзакционные издержки на поиск потребителей.

3 Overview of the dynamics of waste generation and disposal methods in the Russian Federation/ Обзор динамики образования отходов и методов утилизации в РФ

В развитых странах электростанции осуществляют предпродажную подготовку для использования золы уноса в качестве вторичного ресурса, доводя ее свойства, характеристики до требований официальных строительных нормативных документов. Вторичная переработка отходов стала довольно распространенной практиков во многих странах мира.

Рисунок 2 представляет график динамики образования отходов в России [56], где видно, как растет количество отходов по годам. Следует отметить непрерывный рост образования отходов с 2016 г.

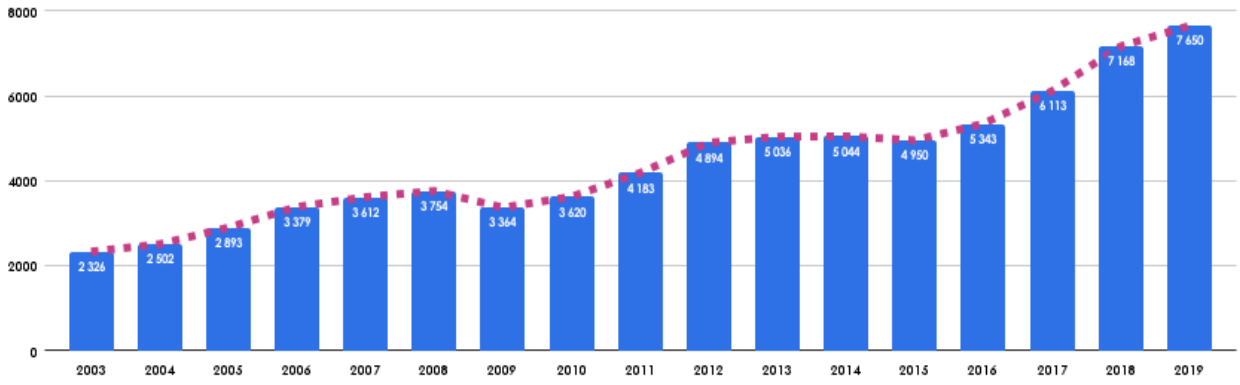

Рис. 2 - Динамика образования отходов в России, млн.тонн [56]
Fig. 2 - Dynamics of waste generation in Russia, million tons [56]

Следовательно, ожидается, что образование угольной золы уноса будет увеличиваться в течение еще многих лет в результате растущей зависимости мира от производства электроэнергии на угле. Понимание процесса образования и характеристик обеспечивает предпосылки и основу для альтернативного использования золы уноса. Далее рассматриваются объемы отходов с отчетности некоторых энергетических компаний для детального обзора, в том числе их методов утилизации и переработки.

Группа Газпром энергохолдинг (ООО «Газпром энергохолдинг», г. Санкт-Петербург, РФ). В Группе Газпром энергохолдинг накопленные ЗШО используются в качестве компонента для бетонов, сухих смесей и пеноблоков (Рязанская ГРЭС, Новочеркасская ГРЭС, Красноярская ГРЭС, Новочеркасская ГРЭС ОГК-2), при строительстве дорог (ТЭЦ-22 Мосэнерго, Новочеркасская ГРЭС ОГК-2) и т.д. (Рисунок 3)

Рисунок 4 представляет структуру образования отходов, где можно отметить прирост золошлаковых отходов на 1% в 2021 г. в сравнении с предыдущим годом.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

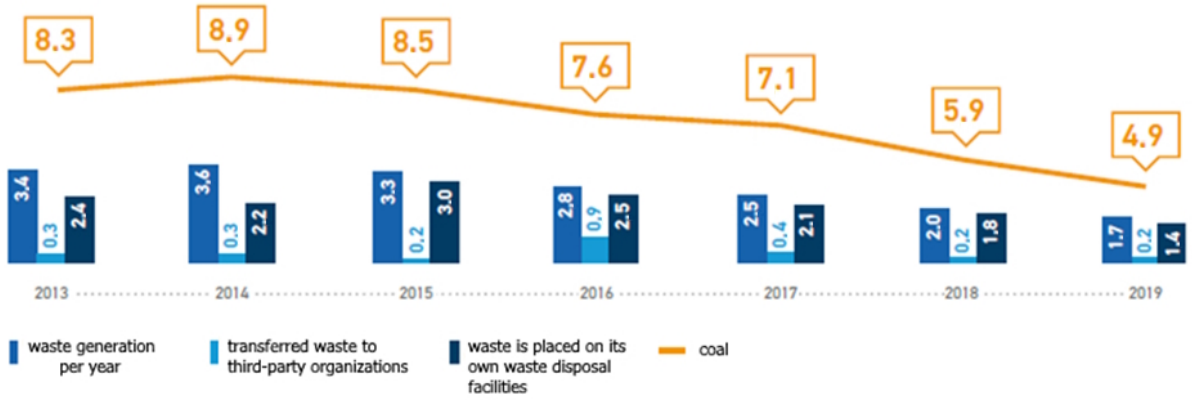

Рис. 3 - Обращение с золошлаковыми отходами, млн.т. [57]
Fig. 3 - Treatment of ash and slag waste, million tons [57]

Type of waste	2019	2020	2021	Change 2021/2020
Ash and slag waste	44	37	38	1
Drilling waste	27	34	34	0
Oil sludge	6	9	5	–4
Other types of waste	23	20	23	3

Рис. 4 - Структура образования отходов по видам, % [58]
Fig. 4 - The structure of waste generation by type, % [58]

Группа Т-плюс (ПАО «Т Плюс», Московская область, РФ). Основную массу отходов предприятий Группы Т-плюс составляют неопасные отходы, относящиеся к IV и V классам опасности. На их долю приходится 99.7% от общего количества производимых отходов. Основным видом отходов на объектах ПАО «Т Плюс» являются золошлаковые отходы, образуемые при сжигании угля. Их доля составляет 67%. Сокращение в 2021 году объемов выработки энергии на планируемой к выводу из эксплуатации Воркутинской ТЭЦ-1 привело к снижению объема размещения ЗШО на 42%, что соответствует 13.7 тыс. т. Газификация Воркутинской ТЭЦ-2 позволила сократить объем размещенных ЗШО в 2021 году на 23%, что соответствует 32.8 тыс. т. Стоит отметить сокращение использования угля на Кировской ТЭЦ-5. Его доля в топливном балансе станции сократилась с 5.9% в 2020 году до 0.6% в 2021 году, в результате чего объем размещения ЗШО снизился на 89%, что соответствует 7.7 тыс. т. [59].

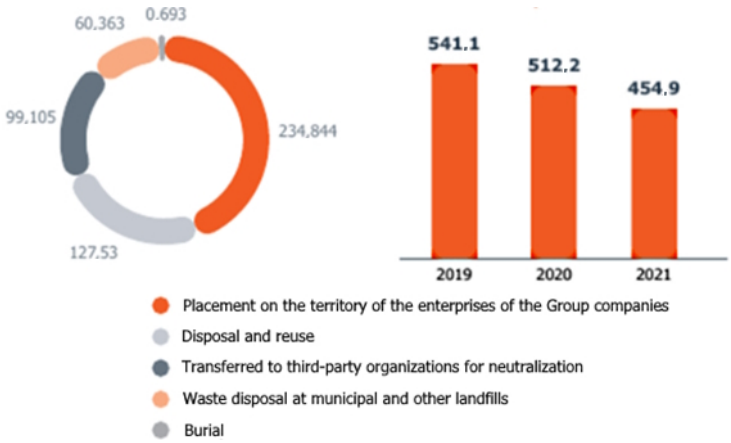

Рис. 5 - Динамика образования отходов в 2021 г., тыс.т. [59]
Fig. 5 - Dynamics of waste generation in 2021, thousand tons [59]

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Группа Интер РАО (ПАО "Интер РАО", г. Москва, РФ). На предприятиях образующиеся отходы передаются по договорам специализированным организациям, уполномоченным на транспортировку, сбор и дальнейшую утилизацию отходов. Следует отметить, что на электростанциях группы организован выборочный сбор определенных видов отходов с передачей их для последующей утилизации. Компания не осуществляет перевозки отходов собственными силами. [60].

Основным типом отходов на энергетических установках Группы являются твердые частицы, образующиеся при сжигании угля (золоотходы). На их долю приходится около 96% всех отходов, производимых Группой. По степени воздействия на окружающую среду золошлаковые отходы классифицируются V классом опасности (минимальное воздействие на окружающую среду). Основными причинами снижения объемов ЗШО на 12% (2109 тыс.т.) в 2020 г. в сравнении с 2019 г. является сокращение выработки продукции угольной генерацией и повышение её эффективности, вывод из состава Группы Экибастузской ГРЭС-2.

На всех российских производственных активах Группы разрабатываются проекты нормативов образования отходов и лимитов на их размещение в соответствии с требованиями законодательства [60].

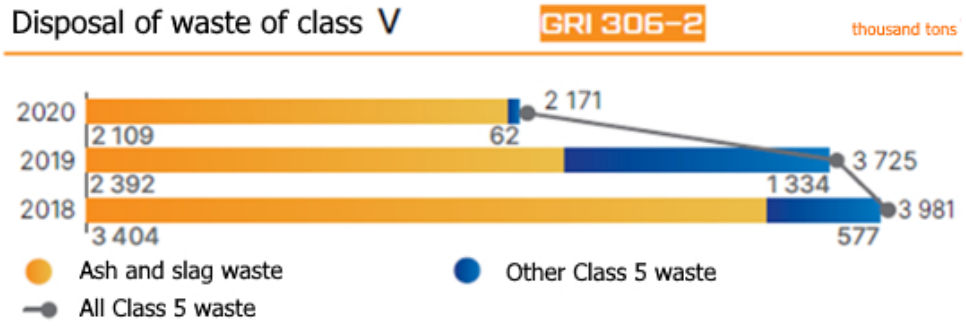

Рис. 6 - Динамика образования отходов 2018-2020 г. [60]
Fig. 6 - Dynamics of waste generation 2018-2020 [60]

ПАО «Юнипро» г. Сургут, РФ. В области обращения с отходами приоритетными направлениями деятельности Компании являются минимизация образования отходов и их максимальная переработка. Основную массу отходов Компании (89%) составляют золошлаковые отходы от сжигания углей. Золошлаки размещаются на собственных специально оборудованных объектах размещения отходов (золоотвалах) в соответствии с полученной лицензией на обращение с данными видами отходов. 99.8% ЗШО образуется на Березовской ГРЭС [61]. Из-за состава угля, который используют на Березовской ГРЭС, образовывается высококальциевая зола уноса, использование которой в строительстве крайне сложно, из-за расширения золы при гидратации. В экспериментальном исследовании авторами [62] разработан геополимерный цемент с использованием золы уноса с высоким содержанием кальция. Было обнаружено, что оптимальная смесь золы уноса по весу составляет 12 процентов (т.е. 6 процентов Na2O). Геополимерный цемент может быть использован для строительства, технического обслуживания, благодаря быстрому процессу твердения. Следовательно, высококальциевую золу уноса также можно использовать в качестве вторичного ресурса.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Рис. 7 - Объем отходов 2019-2021 г., тыс. тонн [61]
Fig. 7 - The volume of waste 2019-2021, thousand tons [61]

Method of treatment	2019			2020			2021		
	Total	I-IV classes	V class	Total	I-IV classes	V class	Total	I-IV classes	V class
Transfer for disposal	2 116	118	1 998	1 725	195	1 530	3 931	734	3 197
Transfer to burial	9 111	1043	8 068	7 387	994	6 394	5 979	912	5 068
Burial at own facilities of waste disposal	875	50	826	713	52	662	1 010	30	980
Transfer for processing, neutralization and regional MSW operators	1259	1249	10	905	849	56	667	654	12
Waste generation	13 361	2 460	10 901	10 730	2 089	8 641	11 587	2 330	9 257

The Formation of non-hazardous waste in PJSC «Unipro» in 2021 amounted 80% of the total amount of waste generated (with the exception of ash and slag waste). At the same time, the shape of recycling is equal to 35%.

Рис. 8 - Объем отходов по методу обращения, тонн [61]
Fig. 8 - Volume of waste by the method of treatment, tons [61]

В 2021 году 100% отходов, включенных в перечень видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты и захоронение которых запрещено, были направлены Компанией не на захоронение, а на утилизацию или обезвреживание. В 2021 году из всех образованных Компанией отходов (за исключением ЗШО) обеспечена утилизация 34% отходов. В 2020 году данный показатель составил 16%. (Рисунок 9)

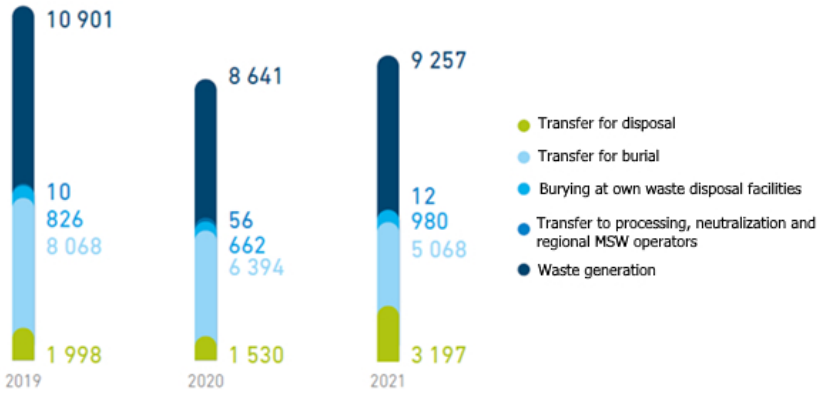

Рис. 9 - Объем неопасных отходов в разбивке по методу обращения, тонн [61]
Fig. 9 - Volume of non-hazardous waste by method of treatment, tons [61]

ООО «Байкальская энергетическая компания» г. Иркутск, РФ. (до 01.09.2020 ПАО «Иркутскэнерго», г. Иркутск, РФ). В течение 2020 года на филиалах ООО «Байкальская

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

энергетическая компания» образовалось 86 видов отходов I - V классов опасности. Общее количество образовавшихся отходов I - V классов опасности составляет –1 358 919 тонн, из них золошлаковых смесей 98%. Согласно сведениям о количестве, наименовании и классах опасности образующихся отходов производства, а также о мерах по их переработке, вторичном использовании, хранении и захоронении образование золошлаковых смесей при сжигании углей составило 19903.00 тонн с передачей населению, сторонним организациям, а поступление по договору золошлаковых смесей от сжигания углей на захоронение составило 3797472.5 тонн/год. В течение 2020 года реализовано для утилизации 65 236.5 тонн сухой золы [63].

4 Main directions of ash slag use, obstacles and solutions/ Основные направления использования золошлаков, препятствия и решения

На основе анализа литературы были выявлены потенциальные направления сбыта ЗШО и представлены графически (Рисунок 10).

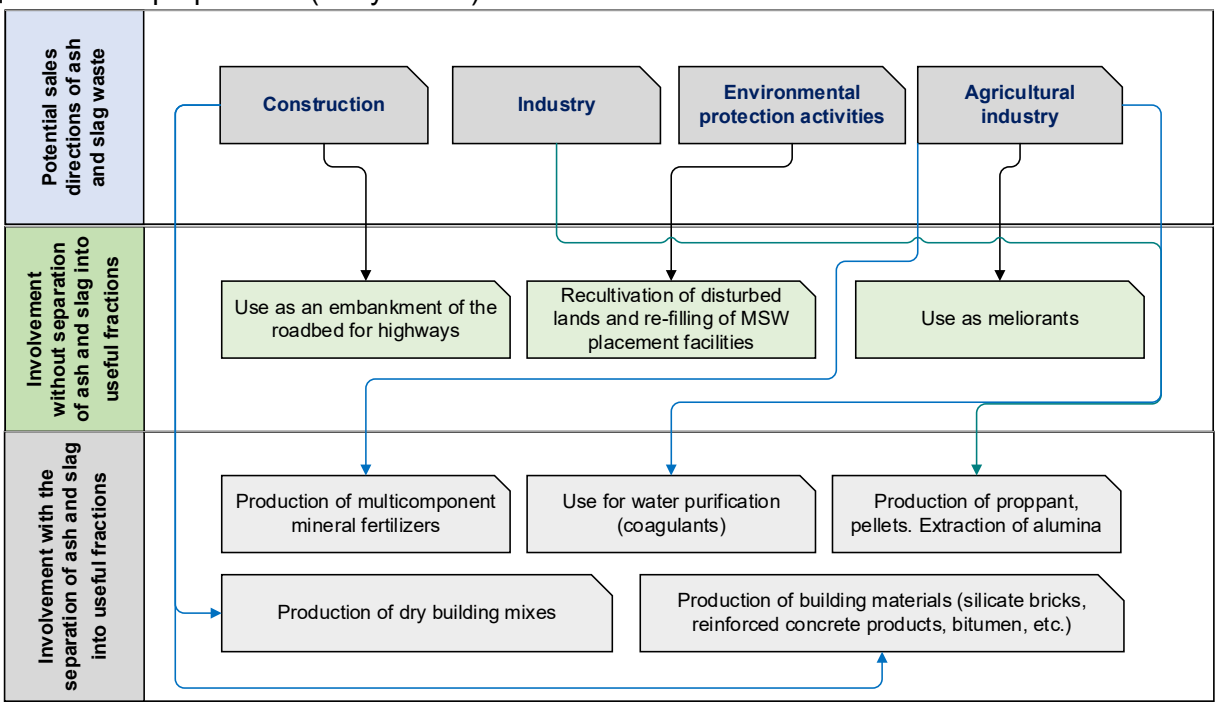

Рис. 10 - Потенциальные направления использования ЗШО
Fig. 10 - Potential areas of use of ash and slag waste

Основными барьерами системной утилизации промышленных отходов можно свести к следующему:

- отдаленность объектов образования ЗШО от потенциальных потребителей, где возможным решением данной проблемы может быть предоставление тарифных скидок при транспортировании ЗШО в том числе и ж/д транспортом;
- нестабильность рынка ЗШО и то, что большой потенциал для крупнотоннажного ЗШО не реализуется, можно преодолеть разработкой бизнес-моделей с единой базой технологических решений и поставщиков для создания устойчивого спроса;
- отсутствие четкого законодательного урегулирования для использования ЗШО в качестве вторичного сырья подразумевает за собой дополнительные расходы поставщиков на утилизацию и сертификацию продукции, в свою очередь, закрепленная процедура перевода отходов в побочный продукт и упрощение нормативных процедур вовлечения промышленных отходов в хозяйственный оборот на законодательном уровне может существенно помочь в преодолении данного барьера;
- низкий уровень осведомленности об успешных кейсах также влияет на стимулирование утилизации промышленных отходов в России, возможным решением для преодоления данного информационного барьера может послужить продвижение в СМИ, т.е. популяризация практик

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

использования золы уноса в качестве вторичного сырья, а также пилотные проекты утилизации золошлаков, которые помогут в том числе и наработать практический опыт;

Экономически целесообразно транспортировать ЗШМ в радиусе до 150 км от объекта транспортного строительства, в связи с этим необходимо проработать ценовые гарантии от поставщиков сырья и продумать сокращение транспортных затрат. Стимулирование спроса на вторичное сырье за счет госзаказов и предоставление льгот на ж/д перевозки поможет нивелировать барьер удаленности объектов образования ЗШО.

5 Conclusions

В ходе изучения научных работ можно сделать вывод, что исследования в основном направлены на улучшение физико-химических характеристик материалов с использованием золы, также необходимо отметить, что золоотвалы отличаются по составу, поэтому требуется это учитывать при производстве строительных материалов и систематизации использования ЗШО в качестве вторичного ресурса.

6 Fundings

This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 21-19-00324, https://rscf.ru/project/21-19-00324/

References

1 Secondary Resources Generated in the Field of Thermal Energy. https://elibrary.ru/item.asp?id=42592964.

2 Analytical Review of the Experience of Involving Ash Slag Waste from of Thermal Power Plants in Economic Circulation in the Russian Federation. https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-nakoplennogo-v-rossiyskoy-federatsii-opyta-vovlecheniya-v-hozyaystvennyy-oborot-zoloshlakovyh-othodov/viewer.

3 N.I. Vatin, D.V. Petrosov, A.I. Kalachev and P. Lahtinen. Use of Ashes and Ash-and-Slad Wastes in Construction. https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/4(22)/petrosov_zola.pdf.

4 Assessment of the Possibility of Using Ash from Reftinskaya GRES the Production of Continuous Glass Fiber. https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozmozhnosti-ispolzovaniya-zoly-reftinskoy-gres-v-proizvodstve-nepreryvnogo-steklovolokna/viewer.

5 Bieliatynskyi, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M. and Ta, M. (2022) The Use of Fiber Made from Fly Ash from Power Plants in China in Road and Airfield Construction. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **323**. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126537.

6 Meta-Organizational Model of the Development of the Industrial Waste Processing Industry in Russia. https://arvis.online/wp-content/uploads/2022/04/Metaorganizaczionnaya-model-razvitiya-otrasli-pererabotki-othodov.pdf.

7 Amin, M.S., Ariyanto S, E., Erwanto, Z. and Purwanto, A. (2019) Pengaruh Limbah Asbes Dan Fly Ash Dalam Pembuatan Kusen Beton. *Jurnal Poli-Teknologi*, Politeknik Negeri Jakarta, **18**. https://doi.org/10.32722/PT.V18I1.1285.

8 Effect of Copper Slag and Fly Ash and Nano Material to Strengthen the Properties of Concrete. https://www.researchgate.net/publication/361506638_Effect_of_copper_slag_and_fly_ash_and_Nano_Material_to_strengthen_the_properties_of_concrete.

9 Effect on Mechanical Properties of Concrete Using Fine Aggregate as Partial Replacement with Fly Ash. https://www.researchgate.net/publication/365824435_EFFECT_ON_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_CONCRETE_USING_FINE_AGGREGATE_AS_PARTIAL_REPLACEMENT_WITH_FLY_ASH.

10 Taylor, P.C. and Tait, R.B. (1999) Effects of Fly Ash on Fatigue and Fracture Properties of Hardened Cement Mortar. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier Science Ltd, **21**, 223–232. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00005-0.

11 Naidu, P.V. and Pandey, P.K. (2014) Replacement of Cement in Concrete. *International Journal of Environmental Research and Development*, **4**, 91–98. http://www.ripublication.com/ijerd.htm.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

12 Fly Ash – Waste Management and Overview : A Review. https://www.researchgate.net/publication/277309330_Fly_ash_-_waste_management_and_overview_A_Review.
13 Barabanshchikov, Y. and Usanova, K. (2022) Influence of Silica Fume on High-Calcium Fly Ash Expansion during Hydration. *Materials*, MDPI, **15**. https://doi.org/10.3390/MA15103544.
14 Barabanshchikov, Y., Fedorenko, I., Kostyrya, S. and Usanova, K. (2019) Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregate Concretes with Low Thermal Transmittance: Review. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Verlag, **983**, 858–866. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_84.
15 Vatin, N., Barabanshchikov, Y., Usanova, K., Akimov, S., Kalachev, A. and Uhanov, A. (2020) Cement-Based Materials with Oil Shale Fly Ash Additives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, **578**. https://doi.org/10.1088/1755-1315/578/1/012043.
16 Amin, M.N., Khan, K., Aslam, F., Shah, M.I., Javed, M.F., Musarat, M.A. and Usanova, K. (2021) Multigene Expression Programming Based Forecasting the Hardened Properties of Sustainable Bagasse Ash Concrete. *Materials*, MDPI, **14**. https://doi.org/10.3390/MA14195659.
17 Dixit, S., Singh, A., Singh, J., Kumar, R., Vatin, N.I., Kumar, K., Miroshnikova, T., Epifantsev, K. and Sinha, M.K. (2022) Comparison of Theoretical and Experimental Physio-Mechanical Properties of Coal-Fly Ash (CFA) Reinforced Iron Matrix Composites. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, Springer-Verlag Italia s.r.l. https://doi.org/10.1007/S12008-022-01022-9.
18 Vig, N., Mor, S. and Ravindra, K. (2023) The Multiple Value Characteristics of Fly Ash from Indian Coal Thermal Power Plants: A Review. *Environmental Monitoring and Assessment*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **195**. https://doi.org/10.1007/S10661-022-10473-2.
19 Li, G., Zhou, C., Ahmad, W., Usanova, K.I., Karelina, M., Mohamed, A.M. and Khallaf, R. (2022) Fly Ash Application as Supplementary Cementitious Material: A Review. *Materials*, MDPI, **15**. https://doi.org/10.3390/MA15072664.
20 Bieliatynskyi, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M. and Ta, M. (2022) Development of Building Materials Based on a High Content of Fly Ash and Polycondensation Products from Chinese Heat and Power Plants. *Materials Science- Poland*, Sciendo, **40**, 270–288. https://doi.org/10.2478/MSP-2022-0025.
21 Fly Ash in India: Generation Vis-à-Vis Utilization and Global Perspective. https://www.researchgate.net/publication/337562728_Fly_ash_in_India_Generation_vis-a-vis_Utilization_and_Global_perspective.
22 Usability of Fly Ash from Solid Waste Incineration as a Concrete Production as a Supplement Material. https://www.researchgate.net/publication/348350757_USABILITY_OF_FLY_ASH_FROM_SOLID_WASTE_INCINERATION_AS_A_CONCRETE_PRODUCTION_AS_A_SUPPLEMENT_MATERIAL.
23 Nadesan, M.S. and Dinakar, P. (2017) Mix Design and Properties of Fly Ash Waste Lightweight Aggregates in Structural Lightweight Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, **7**, 336–347. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2017.09.005.
24 Bhajantri, V., Krishna, P. and Jambagi, S. (2018) A Brief Review on Fly Ash and Its Use in Surface Engineering. *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., **1943**. https://doi.org/10.1063/1.5029604.
25 Optimization of Fly-Ash in Concrete: A Statistical Approach. https://www.researchgate.net/publication/323759509_OPTIMIZATION_OF_FLY-ASH_IN_CONCRETE_A_STATISTICAL_APPROACH.
26 Konovalova, N., Pankov, P., Petukhov, V., Fediuk, R., Amran, M. and Vatin, N.I. (2022) Structural Formation of Soil Concretes Based on Loam and Fly Ash, Modified with a Stabilizing Polymer Additive. *Materials*, MDPI, **15**. https://doi.org/10.3390/MA15144893.
27 Capasso, I., Lirer, S., Flora, A., Ferone, C., Cioffi, R., Caputo, D. and Liguori, B. (2019) Reuse of Mining Waste as Aggregates in Fly Ash-Based Geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **220**, 65–73. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.164.
28 Bhaskara Rao, B. and Kumar, V. (2019) Use of Fly Ash in Mining Sector. *Waste Valorisation and*

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Recycling, Springer, Singapore, 167–178. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2784-1_16.
29 Ram, L.C. and Masto, R.E. (2010) An Appraisal of the Potential Use of Fly Ash for Reclaiming Coal Mine Spoil. *Journal of Environmental Management*, **91**, 603–617. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2009.10.004.
30 Weinberg, R., Coyte, R., Wang, Z., Das, D. and Vengosh, A. (2022) Water Quality Implications of the Neutralization of Acid Mine Drainage with Coal Fly Ash from India and the United States. *Fuel*, Elsevier, **330**, 125675. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.125675.
31 Szerement, J., Szatanik-Kloc, A., Jarosz, R., Bajda, T. and Mierzwa-Hersztek, M. (2021) Contemporary Applications of Natural and Synthetic Zeolites from Fly Ash in Agriculture and Environmental Protection. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, **311**. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127461.
32 Khaleque, A., Alam, M.M., Hoque, M., Mondal, S., Haider, J. Bin, Xu, B., Johir, M.A.H., Karmakar, A.K., Zhou, J.L., Ahmed, M.B. and Moni, M.A. (2020) Zeolite Synthesis from Low-Cost Materials and Environmental Applications: A Review. *Environmental Advances*, Elsevier Ltd, **2**. https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2020.100019.
33 Basu, M., Bhadoria, P.B.S. and Mahapatra, S.C. (2007) Role of Soil Amendments in Improving Groundnut Productivity of Acid Lateritic Soils. *International Journal of Agricultural Research*, Academic Journals Inc., **2**, 87–91. https://doi.org/10.3923/IJAR.2007.87.91.
34 Murugan, S. and Vijayarangam, M. (2013) Effect of Fly Ash in Agricultural Field on Soil Properties and Crop Productivity - A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, IJERT-International Journal of Engineering Research & Technology, **2**. https://doi.org/10.17577/IJERTV2IS120157.
35 Basu, M., Mahapatra, S.C. and Bhadoria, P.B.S. (2006) Exploiting Fly Ash as Soil Ameliorant to Improve Productivity of Sabai Grass (Eulaliopsis Binata (Retz.) C.E. Hubb) under Acid Lateritic Soil of India. *Asian Journal of Plant Sciences*, **5**, 1027–1030. https://doi.org/10.3923/AJPS.2006.1027.1030.
36 Jala, S. and Goyal, D. (2006) Fly Ash as a Soil Ameliorant for Improving Crop Production - A Review. *Bioresource Technology*, Elsevier Ltd, **97**, 1136–1147. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2004.09.004.
37 Singh, L.P. and Siddiqui, Z.A. (2003) Effects of Fly Ash and Helminthosporium Oryzae on Growth and Yield of Three Cultivars of Rice. *Bioresource Technology*, **86**, 73–78. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00111-6.
38 Basu, M., Pande, M., Bhadoria, P.B.S. and Mahapatra, S.C. (2009) Potential Fly-Ash Utilization in Agriculture: A Global Review. *Progress in Natural Science*, Elsevier, **19**, 1173–1186. https://doi.org/10.1016/J.PNSC.2008.12.006.
39 Effect of Fly Ash Application on Soil Properties: A Review. https://www.researchgate.net/publication/292305206_Effect_of_Fly_Ash_Application_on_Soil_Properties_A_Review.
40 Turan, C., Javadi, A.A., Vinai, R. and Beig Zali, R. (2022) Geotechnical Characteristics of Fine-Grained Soils Stabilized with Fly Ash, a Review. *Sustainability*, **14**, 16710. https://doi.org/10.3390/SU142416710.
41 Siwila, S. and Kapesa, E. (2022) Treatment of Domestic Greywater Using Fly Ash as an Adsorbent Incorporated in a Slow Sand Filtration System. *Water Practice and Technology*, IWA Publishing, **17**, 961–973. https://doi.org/10.2166/WPT.2022.047.
42 Ajorloo, M., Ghodrat, M., Scott, J. and Strezov, V. (2022) Heavy Metals Removal/Stabilization from Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash: A Review and Recent Trends. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Springer, **24**, 1693–1717. https://doi.org/10.1007/S10163-022-01459-W.
43 Wang, Q. (2021) Study on the Effect of Fineness and Dosage of Fly Ash on Mechanical Properties of Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, **787**. https://doi.org/10.1088/1755-1315/787/1/012009.
44 Dash, S., Mohanty, I. and Gupta, P. Durability and Water Absorption Properties of Fly Ash Based Pervious Concrete: A Case Study. https://www.researchgate.net/publication/363133273_Durability_and_Water_Absorption_Properties_of_Fly_Ash_based_Pervious_Concrete_A_Case_Study.
45 Popławski, J. (2020) Influence of Biomass Fly Ash Blended with Bituminous Coal Fly Ash on the

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Properties of Concrete. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, Czestochowa University of Technology, **9**, 89–96. https://doi.org/10.17512/BOZPE.2020.1.11.

46 Chousidis, N., Ioannou, I., Rakanta, E., Koutsodontis, C. and Batis, G. (2016) Effect of Fly Ash Chemical Composition on the Reinforcement Corrosion, Thermal Diffusion and Strength of Blended Cement Concretes. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **126**, 86–97. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.09.024.

47 Kumar, A. and Deep, K. (2022) Experimental Investigation of Concrete with Cementitious Waste Material Such as GGBS & Fly Ash over Conventional Concrete. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.11.297.

48 Afroz, S., Nguyen, Q.D., Zhang, Y., Kim, T. and Castel, A. (2022) Evaluation of Cracking Potential Parameters for Low to High Grade Concrete with Fly Ash or Slag. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **350**, 128891. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128891.

49 Ortiz-Salcedo, B.H., Paris, J.M., Ferraro, C.C., Minkara, R. and Riding, K.A. (2022) Evaluation of Chlorides in Fly Ash for Use in Concrete. *Cleaner Materials*, Elsevier, **5**, 100098. https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100098.

50 Lv, R., Liang, S., Li, X., Hou, H., Ke, Y., Li, X., Tang, M., Quan, J., Yuan, S., Hu, J. and Yang, J. (2022) Production of Water-Permeable Ceramic Bricks Derived from Fly Ash via a Simple Pellet Method: Mechanism of Mechanical Strength and Permeability. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **351**, 128989. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128989.

51 Wang, X., Zhu, K., Zhang, L., Li, A., Ullah, F., Chen, C., Huang, J. and Zhang, Y. (2021) Preparation of High-Quality Glass-Ceramics Entirely Derived from Fly Ash of Municipal Solid Waste Incineration and Coal Enhanced with Pressure Pretreatment. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **324**, 129021. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129021.

52 Paul, D., Suresh, M. and Pal, M. (2021) Utilization of Fly Ash and Glass Powder as Fillers in Steel Slag Asphalt Mixtures. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier, **15**, e00672. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00672.

53 Zimar, Z., Robert, D., Sidiq, A., Zhou, A., Giustozzi, F., Setunge, S. and Kodikara, J. (2022) Waste-to-Energy Ash for Treating Highly Expansive Clays in Road Pavements. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **374**, 133854. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133854.

54 Luo, Y., Zheng, S., Ma, S., Liu, C. and Wang, X. (2017) Ceramic Tiles Derived from Coal Fly Ash: Preparation and Mechanical Characterization. *Ceramics International*, Elsevier, **43**, 11953–11966. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2017.06.045.

55 Yadav, V.K., Gacem, A., Choudhary, N., Rai, A., Kumar, P., Yadav, K.K., Abbas, M., Khedher, N. Ben, Awwad, N.S., Barik, D. and Islam, S. (2022) Status of Coal-Based Thermal Power Plants, Coal Fly Ash Production, Utilization in India and Their Emerging Applications. *Minerals*, MDPI, **12**. https://doi.org/10.3390/MIN12121503.

56 Infographics of the Dynamics of Waste Generation in the Russian Federation. https://arvis.online/analitika/infografika/.

57 Report on the Sustainable Development of Gazprom Energoholding Group Production Companies 2018. https://energoholding.gazprom.ru/d/textpage/5c/92/18-19-sustainability-geh-report-rus.pdf.

58 Gazprom Group's Report on Sustainable Development Activities for 2021. https://sustainability.gazpromreport.ru/fileadmin/f/2021/sustainability-report-ru-2021.pdf.

59 Report on the Sustainable Development of the T PLUS Group for 2021. https://www.tplusgroup.ru/fileadmin/user_upload/T__ESG_report_smart_ru.pdf.

60 Report on Sustainable Development and Environmental Responsibility of Inter RAO for 2020. https://www.akm.ru/upload/akmrating/InterRAO_annual_report_2020.pdf.

61 UNIPRO Annual Report for 2021. https://rspp.ru/upload/uf/f67/id5osjmq40b9u7810g882dtj5r23t3fr/Юнипро ИО 2021.pdf.

62 Mohammed, B.S., Haruna, S., Wahab, M.M.A., Liew, M.S. and Haruna, A. (2019) Mechanical and Microstructural Properties of High Calcium Fly Ash One-Part Geopolymer Cement Made with Granular Activator. *Heliyon*, Elsevier, **5**, e02255. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2019.E02255.

63 State Report on the State and Environmental Protection of the Irkutsk Region in 2020. https://irkobl.ru/region/ecology/госдоклад.pdf.