



Решение экологических проблем накопления твердых бытовых отходов переработкой золы, образующейся при их сжигании. Обзор

Р. А. Исмаилова¹✉, Э. Н. Алиев¹, С. А. Герайбейли²

¹Научно-исследовательский институт «Геотехнологические проблемы нефти, газа и Химия»
Баку, Азербайджан, e-mail: ruqiyya.ismailova@mail.ru

²Азербайджанский Государственный университет Нефти и Промышленности
Баку, Азербайджан

Поступила в редакцию: 11.10.2024 г. после доработки: 15.11.2024 г. принята в печать: 26.11.2024 г.

Аннотация – В условиях стремительного роста объемов твердых бытовых отходов (ТБО) и связанных с этим серьезных экологических проблем, становится очевидной необходимость совершенствования системы управления отходами, которая является одной из наиболее значимых проблем, стоящих перед человечеством в настоящее время. Предложенная статья представляет собой аналитический обзор, посвященный снижению негативного воздействия на окружающую среду от накопления ТБО посредством вовлечения золы сжигания ТБО в производство строительных материалов. С точки зрения экологической оценки качества получаемого продукта, уделено особое внимание вопросу подготовки летучей золы (золы-уноса) предварительной очисткой от присутствующих в ней хлоридов, диоксинов, тяжелых металлов. Показано влияние параметров процесса на эффективность детоксикации золы. Помимо способов раздельного извлечения перечисленных вредных компонентов представлен комбинированный способ восстановления растворимых солей летучей золы, удаления тяжелых металлов и снижения диффузии диоксинов. Представлены технологии, иллюстрирующие возможность использования подготовленной золы-уноса и кубовой золы сжигания ТБО для использования ее в строительных материалах.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, зола сжигания ТБО, летучая зола, вторичная переработка, строительные материалы.

Utilization and biodegradation of wastes

Solving environmental problems of solid municipal waste accumulation by recycling ash generated during their combustion – a review

Rugiya A. Ismailova¹✉, Elshan N. Aliyev¹, and Samira A. Garaybeyli²

¹Scientific Research Institute of Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry, Baku,
Republic of Azerbaijan, e-mail: ruqiyya.ismailova@mail.ru

²Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Republic of Azerbaijan

Received: October 11, 2024; Revised: November 15, 2024 Accepted: November 26, 2024

Abstract – The rapidly growing amount of solid waste and the accompanying serious environmental problems require improvement of the waste management system, which is one of the main problems that humanity currently faces. The proposed article is an analytical review devoted to reducing the negative impact on the environment during solid waste disposal by involving solid waste incineration ash in the production of building materials. From the standpoint of environmental assessment of the quality of the resulting product, attention is paid to the issue of preparing fly ash by preliminary cleaning it from chlorides, dioxins, and heavy metals. The correlation of process parameters affecting the efficiency of ash detoxification is shown. In addition to the methods of separate extraction of the listed harmful components, a combined method for restoring soluble salts of fly ash, removing heavy metals and reducing dioxin diffusion is presented. Technologies are presented that illustrate the interest in using prepared fly ash and vat ash from solid waste incineration for recycling into building materials.

Keywords: municipal solid waste (MSW), MSW incineration ash, recycling, building materials

ВВЕДЕНИЕ

Мировое сообщество обеспокоено негативным воздействием промышленных отходов не только на природные ресурсы, но и на биосферу. Усовершенствование технологий, направленных на рациональное использование природных ресурсов не всегда обеспечивает безотходное производство.

Помимо промышленных отходов серьезную экологическую проблему связывают с накоплением твердых бытовых отходов (ТБО), особенно в крупных мегаполисах. Мировой объем образующихся в городах ТБО за 2016 г. составил около 2,1 миллиарда тонн, тогда как, согласно прогнозу Всемирного банка, к 2050 году ожидается увеличение этого показателя до порядка 3,4 миллиарда тонн [1].

Состояние современной мировой экономики и рост населения планеты обусловили повышение спроса на товары и продукты питания, увеличив тем самым накопление общей массы ТБО на полигонах. Эти отходы заслуживают особого внимания. ТБО сопровождают деятельность человека и образуются вблизи мест проживания населения, оказывая негативное влияние на окружающую среду на местном, региональном и глобальном уровнях [2].

На рисунке 1 представлено распределение накопления ТБО и численность населения по странам. Из рисунка видно, что на первом месте по количеству накопленных ТБО находятся США, затем идут Китай и Индия, хотя по численности населения в этом ряду США стоят на третьем месте.

Особо опасными считаются нерегулируемые открытые свалки бытовых отходов, угрожающие окружающей среде и здоровью человека. Отсутствие или неправильная утилизация скопившегося огромного количества мусора на свалках, сопровождающееся разложением, приводит к тяжелым последствиям в виде выбросов диоксида углерода (CO_2) и монооксида углерода (CO), вызывая парниковый эффект. Образующиеся при гниении выбросы H_2S негативно

вливают на органы дыхания. В зависимости от природы присутствующих в отходах загрязняющих веществ, вредное воздействие на людей может проявляться в виде острой интоксикации, эндокринной токсичности, мутагенности и снижения иммунитета у детей. Выбросы NO_x вызывают фотохимический смог, приводя к образованию кислотных дождей и фитотоксичности. Подземные воды загрязняются свалочным фильтратом, вызывая деградацию почвы [3].

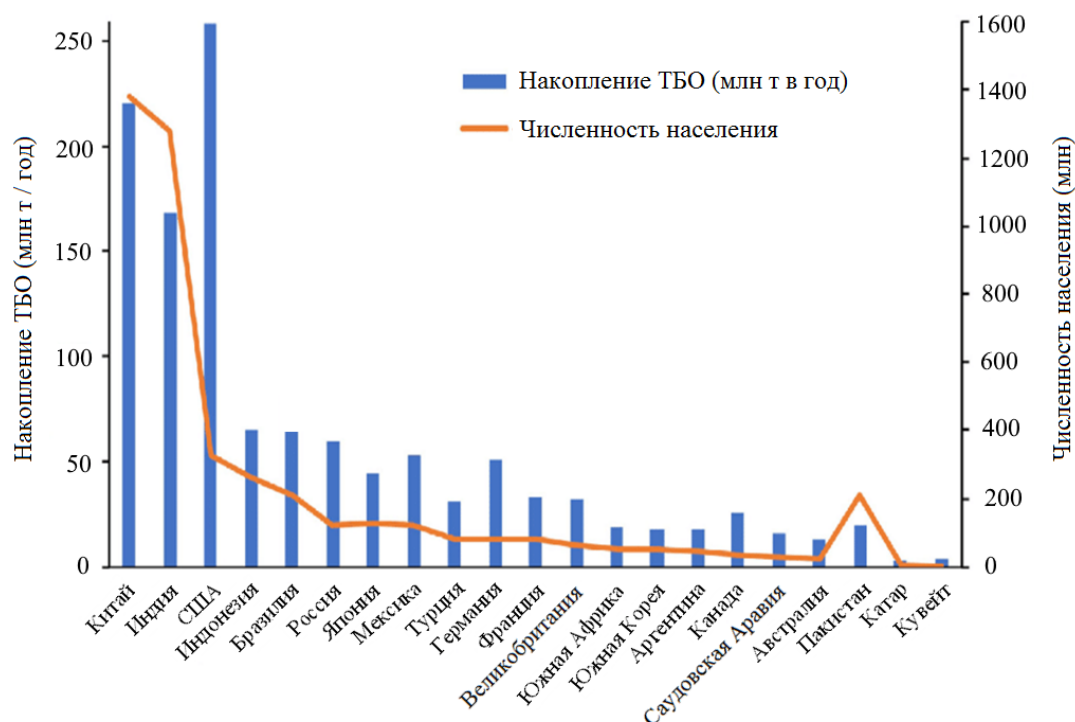


Рис.1. Накопление ТБО и численность населения по странам.

Fig. 1. Accumulation of solid municipal waste by region.

Во многих странах с целью минимизации объема ТБО используются высокотемпературные технологии их переработки. Эти методы включают такие процессы, как сжигание, пиролиз и газификация (рис. 2) [4].

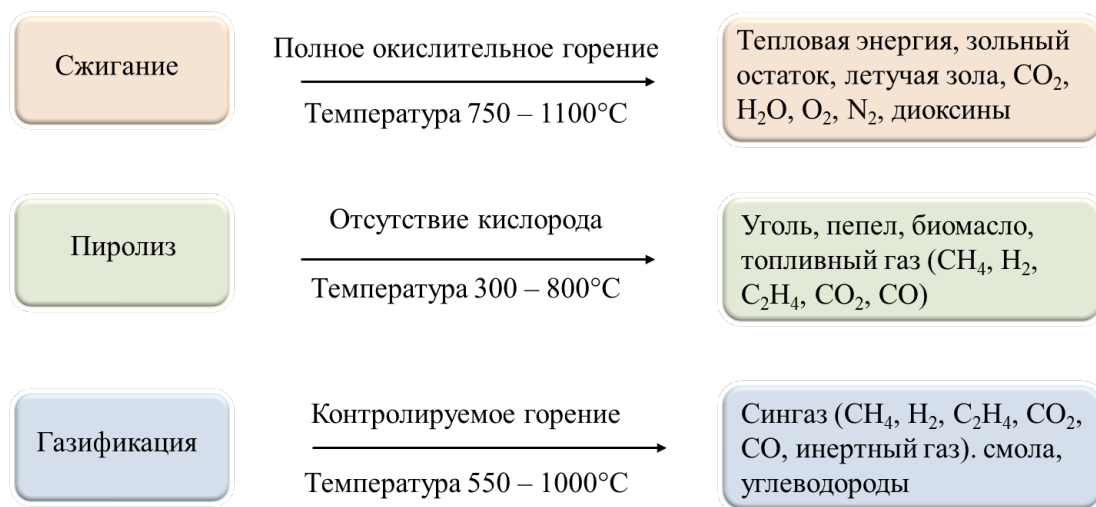


Рис. 2. Методы термической обработки ТБО.

Fig. 2. Methods of thermal treatment of solid municipal waste.

Несмотря на значительное уменьшение объема ТБО, термической обработке присущи такие негативные факторы как образование твердого зольного остатка (зола ТБО) и летучей золы (зола-уноса) с токсичными газообразными продуктами, требующие определения места захоронения и детоксикации, что не позволяет полностью решить экологические проблемы, связанные с накоплением ТБО.

Новая модель экономики замкнутого цикла предусматривает использование отходов производства первичной продукции в качестве сырья для производства нового продукта [5].

В этой связи целью предлагаемого аналитического обзора является анализ научных достижений последних лет, в области утилизации, как твердого зольного остатка, так и летучей золы, образующихся в результате сжигания ТБО, путем их вторичной переработки.

СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ ЗОЛЫ-УНОСА ОТ СЖИГАНИЯ ТБО КО ВТОРИЧНОЙ УТИЛИЗАЦИИ

Наращивание мощностей мусоросжигательных заводов привело к быстрому росту образования зольных отходов, включающих донную золу в камере сгорания и летучую золу, выходящую через дымовую трубу с газообразными продуктами. Эти отходы от сжигания бытового мусора приводят к экологическим и санитарным проблемам.

Содержащиеся в летучей золе от сжигания ТБО хлориды, тяжелые металлы и диоксины, способные мигрировать и накапливаться в атмосфере, представляют серьезную угрозу здоровью человека и окружающей среде. Для обеспечения эффективности утилизации летучей золы ТБО вторичной переработкой в продукцию полезную для различных отраслей, необходимо предусмотреть ее предварительную подготовку.

Дехлорирование. В связи с тем, что присутствие хлоридов в летучей золе занижает эффект деградации диоксинов, первоначально проводят дехлорирование.

Содержащийся в летучей золе ТБО хлор можно разделить на водорастворимый, существующий в форме CaCl_2 , KCl , NaCl и CaClOH , и водонерастворимый, существующий в форме соли Фриделя ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) и AlOCl . Водорастворимый хлор, составляющий около 59–93% от общего содержания хлора в летучей золе, удаляют выщелачиванием водой, водонерастворимый хлор удаляют прокаливанием остатка водного выщелачивания, преобразуя в хлоралюминат кальция ($11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2$) [6].

Известно, что эффект дехлорирования зависит от таких факторов как значение pH растворителя, температура, а также соотношение хлорсодержащих соединений и растворителя.

Интересные результаты представлены в работе [7], в которой для конкретного состава золы-уноса ТБО при выявленных оптимальных значениях температуры, соотношения твердой и жидкой фаз, выщелачивания изучено

влияние растворителей с разными физико-химическими свойствами на процесс дехлорирования:

- сверхчистой воды (СЧВ),
- фильтрата, полученного на этапе обезвоживания необработанных твердых бытовых отходов (ФТБО) и
- гидролизата фильтрата твердых бытовых отходов (ГФТБО).

Показатели одностадийного и трехстадийного выщелачивания показаны на рисунке 3 [7].

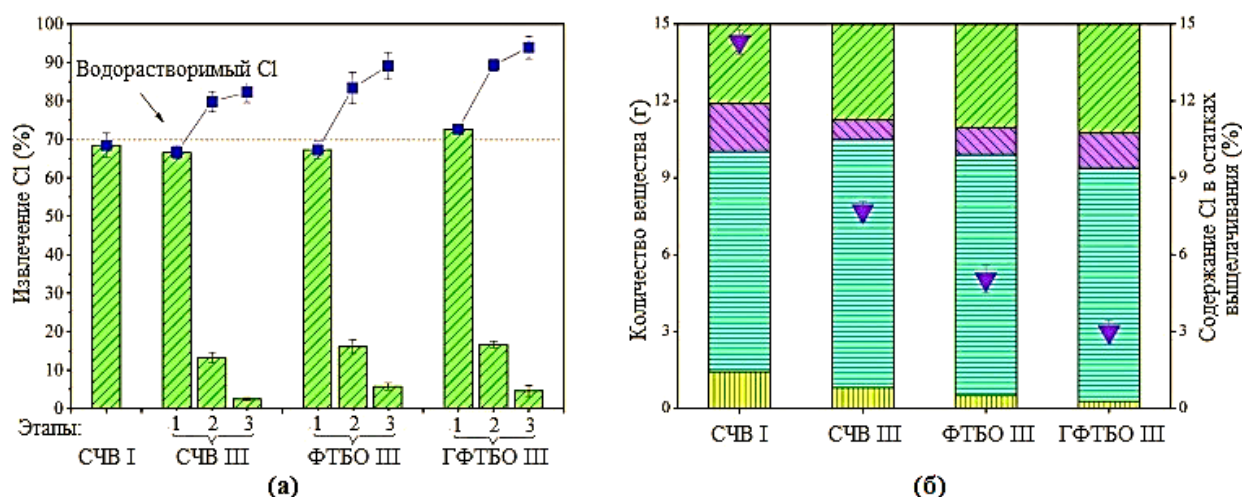


Рис. 3. Скорость удаления Cl и содержание Cl в остатке.

(а) – дехлорирующий эффект различных растворителей: извлечение Cl на разных этапах; ■ суммарное извлечение Cl.

(б) – изменение массы летучей золы после выщелачивания: извлечение Cl (%); количество Cl в остатке выщелачивания; удаление других веществ; количество других веществ в остатке выщелачивания; ▼ количество Cl в остатке.

Fig. 3. Cl removal rate and Cl content in residue.

(a) dechlorination effect of different leaching solvents on fly ash: Cl removal rate in different step; ■ Cumulative Cl removal rate.

(b) Change in fly ash mass after leaching experiments: Cl removal (%); Cl quantity in the leaching residue; other substances removal; other substances quantity in the leaching residue; ▼ content of Cl in residue.

Как показали исследования со сверхчистой водой эффект дехлорирования трехступенчатого выщелачивания выше, чем одноступенчатого и составил 82,7% удаления хлора. В этой связи для ФТБО и ГФТБО исследовано трехступенчатое дехлорирование, позволившее извлечь соответственно 89,7% и 94,3% хлора от общего количества.

Разложение диоксинов. Механизм. Создание технологий, направленных на решение экологических проблем, связанных с присутствием диоксинов в золе-уноса ТБО основаны на теоретических и экспериментальных результатах, объясняющих механизм разложения диоксинов (полихлорированные дибензо-п-диоксины (ПХДД), полихлорированные дибензофураны (ПХДФ) и др.)

На рисунке 4 представлены структурные формулы ПХДД и ПХДФ.

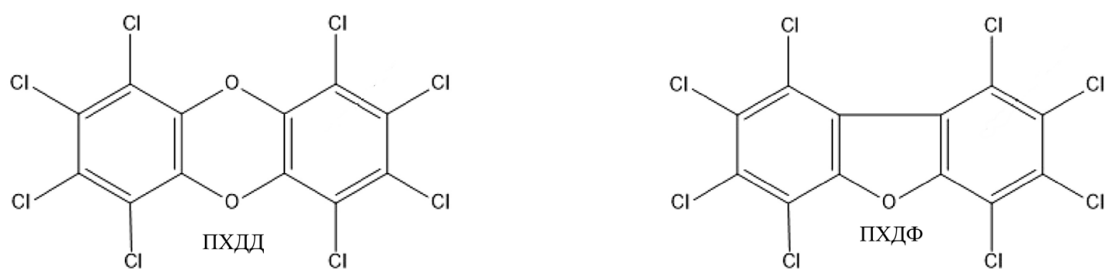
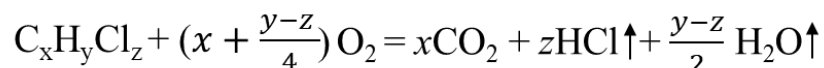


Рис. 4. Структурные формулы ПХДД и ПХДФ

Fig.4. Structural formulas of PCDD and PCDF

При нагревании хлор- и бромсодержащих органических веществ максимум образования диоксинов приходится на 600–800°C.

Высокотемпературное разложение диоксинов начинается при температуре выше 850°C, а полное разложение происходит при $\geq 1250^\circ\text{C}$. В общем виде этот процесс может быть представлен следующей химической реакцией:



Существует два основных пути разложения диоксинов в летучей золе ТБО. Первый путь – это процесс дехлорирования, т. е. разрыв одной или нескольких связей С–Cl в молекулярной структуре перхлорированных диоксинов с образованием низкохлорированных диоксинов. Ниже приведены химические реакции на примере ПХДД и ПХДФ (рис. 5 а, б).

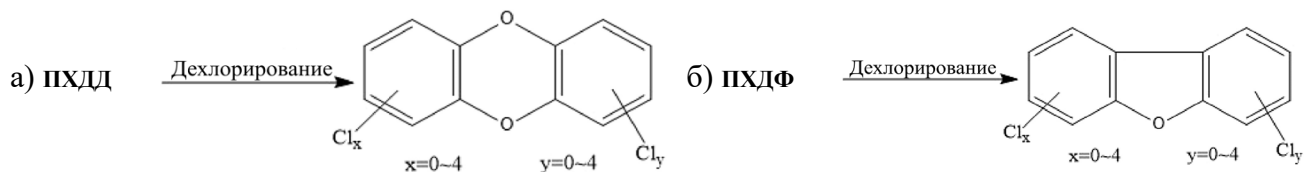


Рис. 5. Реакция дехлорирования а) ПХДД, б) ПХДФ.

Fig. 5. Dechlorination reaction of а) PCDD, б) PCDF.

Установлено, что высокотемпературное разложение сопровождается разрывом связи С–О (раскрытие цикла), С–Cl. Присутствие кислорода при высокотемпературной обработке приводит к прямому окислению диоксинов с образованием CO_2 , H_2O и HCl . Этот метод считается наиболее перспективным, но требует расхода большого количества энергии (рис. 6).

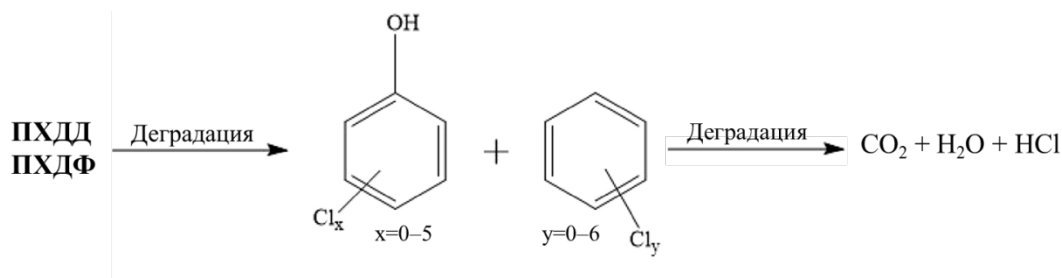


Рис. 6. Реакция дегградации ПХДД и ПХДФ.

Fig. 6. Degradation reaction of PCDD and PCDF

Гидротермальное разложение диоксинов происходит в основном двумя путями: гидролизом и свободнорадикальной реакцией. При недостатке кислорода и отсутствии других добавок гидролиз считается основным путем разложения, который в основном разлагает молекулы воды и органические вещества.

В атмосфере воздуха и кислорода гидротермальная реакция будет производить высокоактивные гидроксильные радикалы, окисляющие диоксины с образованием CO_2 , H_2O , органических кислот и других промежуточных продуктов. Метод хотя и позволяет снизить расходы на энергию, но при этом возникает необходимость очистки сточных вод [8].

Опубликованы результаты исследований по удалению диоксинов из золы-уноса ТБО низкотемпературной термической обработкой [9]. Установлено, что на эффективность разложения диоксинов влияет совокупность нескольких параметров процесса, но особенно температура и время обработки.

Наилучшие показатели, полученные при 400°C , показаны на рисунке 7 [9].

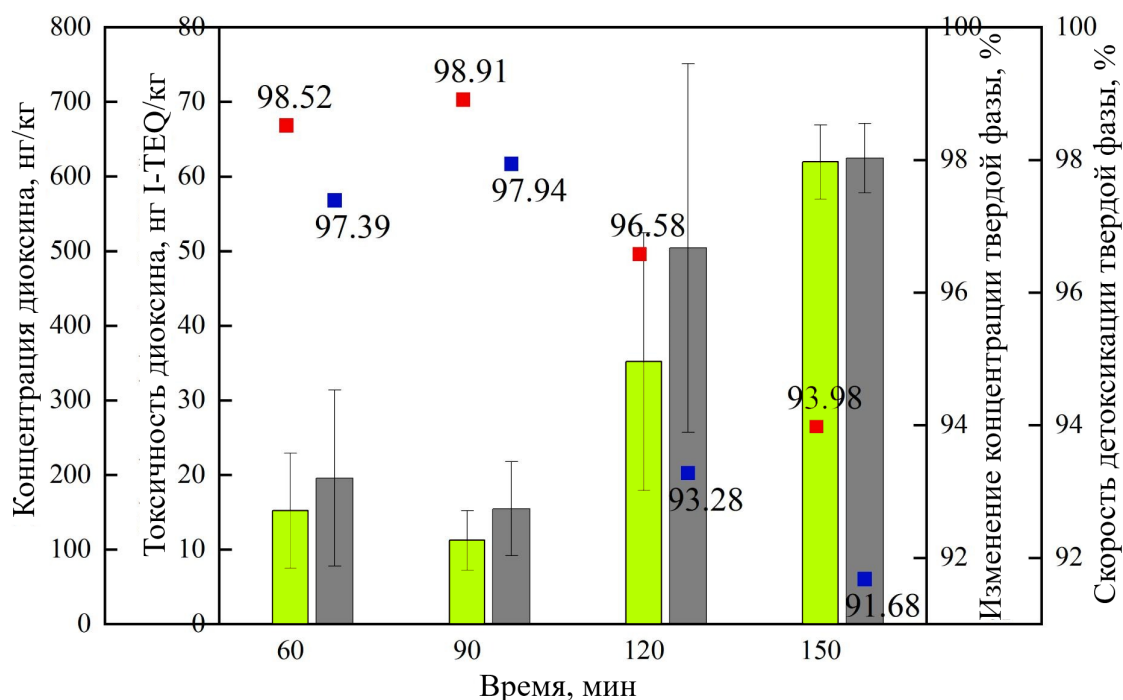


Рис. 7. Влияние времени обработки при 400°C на концентрацию диоксина.

■ концентрация диоксина (нг/кг); ■ токсичность диоксина (нг I-TEQ/кг);
■ изменение концентрации твёрдой фазы (%); ■ изменение детоксикации твёрдой фазы (%).

Fig. 7. Determination of the processing time at 400°C for the stability of dioxine Effect of treatment time at 400°C on the dioxine concentration.

■ dioxin concentration (ng/kg); ■ dioxin toxicity (ng I-TEQ/kg); ■ change in solid phase concentration (%); ■ change in solid phase detoxification (%).

Авторами работы [9] установлено, что наилучшими условиями для детоксикации диоксинов является 400°C , 90 мин и присутствие 1% O_2 . Длительное воздействие приводит к разложению присутствующих в золе гидроксильных групп, являющихся поставщиками кислорода, способствуя

вторичному образованию диоксидов. При 150°C с увеличением времени реакции синтез диоксинов не столь активен, а присутствие кремния, фосфора и алюминия ингибирует образование диоксинов.

Удаление тяжелых металлов. Тяжелые металлы из золы-уноса ТБО могут быть извлечены двумя путями: посредством стабилизации/затвердевания (S/S) и методом разделения. В первом случае использование отвердителей на основе цемента позволяют получить экологически приемлемые материалы для захоронения, но со временем они могут разложиться, переходя вновь в растворимые соединения. Для химической стабилизации используют такие неорганические агенты как известь, соли железа, фосфаты, карбонаты, сульфиды, а также органические агенты, включая тиомочевину, органические фосфонаты и органические полимерные хелатирующие агенты, способные переводить тяжелые металлы в нерастворимую форму [10].

Основные методы выделения тяжелых металлов представлены химическим выщелачиванием, биовыщелачиванием, электрохимическим разделением и термическим разделением. Наиболее перспективным методом считается термическое разделение прокаливанием при 700–1200°C, восстановительное разделение при 700–1000°C, разделение хлорированием при 700–1000 °C и разделение расплавленных солей при 600–800°C [11].

Технологии детоксикации золы-уноса ТБО не ограничиваются перечисленными методами, пополняясь новыми разработками, некоторые из которых представлены ниже.

Собранную пылесборником золу-уноса предварительно обрабатывают гашеной известью, высушивая при температуре 100–110°C в течение 24 часов. Добавляют олеиновую кислоту в массовом соотношении 1–2:1. Образовавшийся водонепроницаемый слой на поверхности зольной пыли, высвобождает водорастворимые тяжелые металлы. Обработанную золу уноса смешивают с остатком десульфуризации дымового газа, подвергая зольную пыль карбонизации, добавляют деионизированную воду, отстаивают, сушат в течение 20–39 мин при температуре 150–160°C и используют в качестве наполнителя или строительного материала [12].

Предлагается использовать комбинированный способ восстановления растворимых солей летучей золы, удаление тяжелых металлов и снижение диффузии диоксинов (рис. 8). Способ включает промывку водой для дехлорирования летучей золы и сочетание карбонизации со скоростью аэрации 100 мл/мин с керамической мембранной фильтрацией для отделения растворимых солей [13].

Авторы работы [13] сообщают, что предлагаемый метод обеспечивает удаление Pb и Zn до 100%. Частицы полученного осадка CaCO_3 имеют размер в среднем около 4 мкм, поверхность с большой пористостью, с высоким содержанием тяжелых металлов и диоксинов. Содержание диоксина в восстановленной смешанной соли снизилось. Токсичный эквивалент диоксина составил 3,228,11 мг/кг.



Рис. 8. Комбинированный способ детоксикации золы-уноса ТБО

Fig. 8. Combined method of detoxification of solid municipal waste fly ash

Представляется интересным использование сырья растительного происхождения для получения адсорбента, обеспечивающего очистку летучей золы от присутствующих вредных загрязнителей [14]. В состав адсорбента входят следующие компоненты, масс. ч.:

- | | |
|------------------------------|-----------|
| – кристаллы нановолокна люфы | 1–10; |
| – зола рисовой шелухи | 30–100; |
| – гидроксид натрия | 4–10; |
| – вода | остальное |

Кристалл нановолокна люфы обладает уникальной пористой многоуровневой структурой с большой удельной поверхностью, имеет гидрофильную и липофильную химическую структуру, и хорошие кислотно-щелочные свойства. Молекулярная структура кристалла обогащена хелатными и ОН-группами, обеспечивая высокую адсорбционную способность относительно тяжелых металлов и органических загрязнителей.

Приготовление предлагаемого адсорбента включает смешение золы рисовой шелухи, содержащей порядка 95% аморфного SiO_2 , с гидроксидом натрия, перемешивание, активацию раствора в течение 2–6 часов при

температуре 80–160°C, затем добавление кристалла нановолокна люфы и ультразвуковое перемешивание смеси при 500 об/мин в течение 30–60 минут. К полученной массе добавляют летучую золу при мольном соотношении 90:100 и перемешивании в течение 3–15 мин, затем помещают в формы.

Как показали исследования максимальный уровень нейтрализации (удаления) для Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} Cr^{3+} составил 99,7%, 99,5%, 99,4%, 98,7% и 99,5%.

Достижения разработанных современных технологий этапа подготовки золы-уноса ТБО открывают возможности ее использования в производстве строительных материалов.

Рассматривая возможность использования летучей золы ТБО при введении ее в состав строительных материалов взамен обычного портландцемента, авторы [15] рекомендуют обращать внимание не только на соответствие ожидаемой степени выщелачивания тяжелых металлов и разложения диоксинов нормативным требованиям. Предлагается также оценить степень вредного воздействия используемых в процессе производства ресурсов на окружающую среду. В этой связи, авторами смоделирован процесс производства красного кирпича с введением в состав сырья летучей золы, включающий промывку водой и стабилизацию тяжелых металлов с использованием как фосфорной кислоты, так и дигидрофосфата аммония, извлеченного из отработанного огнетушителя. Оценка экологической нагрузки на окружающую среду при сопоставлении использования обеих стабилизаторов, подтвердила преимущества использования дигидрофосфата аммония.

Частицы золы-уноса имеют различные формы и очень слабо связаны между собой, между частицами существуют поры, что обуславливает легкость вымывания присутствующих в ней тяжелых металлов, которые наносят вред окружающей среде. В этой связи разработан способ переплава золы-уноса ТБО в присутствии консолидирующего агента [16]. В состав агента входят следующие компоненты, в масс. ч.:

- глинистые минералы 10–40;
- полевошпат 30–60;
- сульфат алюминия 1–10;
- порошок талька 1–15;
- молотое стекло 5–35;
- борная кислота 1–5.

Компоненты консолидирующего агента высушивают, доводя влажность глинистого минерала до значения ниже 10%, а других ниже 3%, перемешивают, измельчают и гомогенизируют. Золу-уноса, смешивают с консолидирующим агентом в массовом соотношении 1: (0,5–2), затем осуществляют компрессионное формование при 850–1100°C в течение 1 часа в блоки. При спекании консолидирующего агента с золой образуется система твердое тело-жидкость, при этом образование жидких хлоридов тяжелых металлов при

сплавлении способствует более высокой скорости затвердевания тяжелых металлов.

Эффективным решением проблемы удаления тяжелых металлов из золы-уноса авторы работы [17] считают использование разработанного элюента, содержащего лимонную кислоту и натриевую соль этилендиамина тетрауксусной кислоты, взятые в соотношении (2–4):1. Растворением предложенного элюента в деионизированной воде готовят растворитель с концентрацией 0,1 моль/л, который совместно с золой в соотношении 3:1 помещают в шаровой фрезерный бак, вращающийся со скоростью 300 об/мин. в течение 1 часа, выполняя центробежное разделение на твердую фазу и раствор элюента, содержащего тяжелые металлы. Осуществление извлечения тяжелых металлов мокрым перемалыванием в шаровой мельнице способствует повышению эффективности процесса.

ВТОРИЧНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ТБО ПЕРЕРАБОТКОЙ ЗОЛЫ – УНОСА

Рынок строительных материалов испытывает потребность в новых более экологических материалах, обладающих хорошими эксплуатационными свойствами, и производство которых не наносило бы вред окружающей среде.

Аналогичность химического состава золы ТБО химическому составу портландцемента предопределила его широкое вторичное использование в производстве многих сопутствующих строительству материалов.

Химический состав золы ТБО имеет свою географию. Например, зола мусоросжигательных установок Китая, Италии, Португалии, Сингапура, Испании, Таиланда, Великобритании и Нидерландов имеет компонентный состав в интервалах, показанных на рисунке 9 [18].

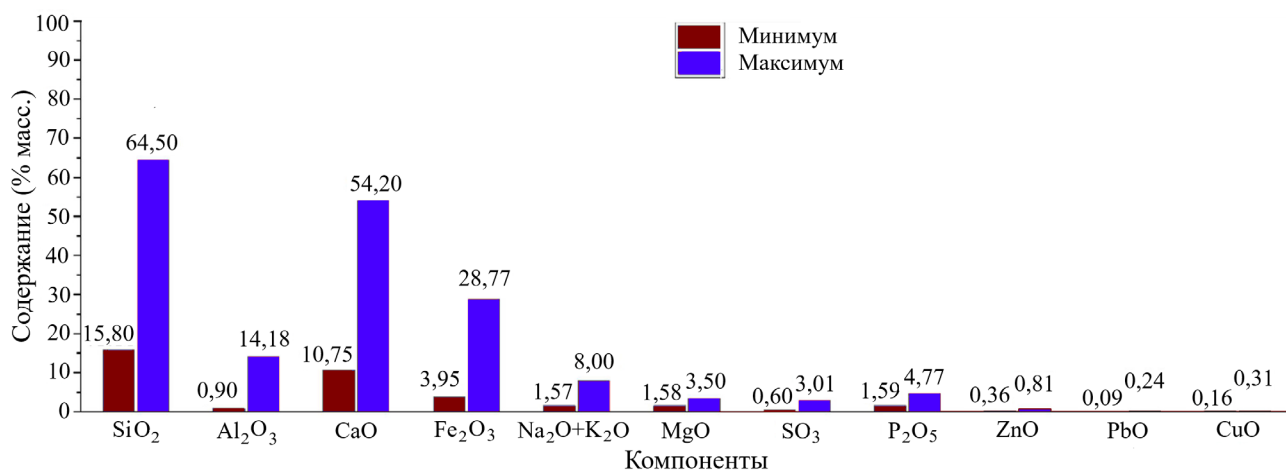


Рис. 9. Диапазоны содержания компонентов золы ТБО.

Fig. 9. Ranges of content of components of MSW ash.

Содержание SiO₂ и Al₂O₃ в золе ТБО, содержание которых составляет свыше 70%, способны подвергаться гидратации с последующей пуццолановой реакцией, что придает золе ТБО гелеобразующую активность, позволяющую укрепить цементную матрицу за счет заполнения пор [19]. В этой связи

растущий спрос на заполнители в цементных материалах позволяет рассматривать золу ТБО в качестве альтернативы природным наполнителям.

Примером повторного использования летучей золы ТБО с предварительной подготовкой может служить технология получения геополимера, используемого в качестве строительного материала [20]. Предварительная подготовка летучей золы заключается в многократной отмывке водой для удаления растворимых хлорных солей, переводя ион хлора в жидкую фазу. Очистку летучей золы от диоксида осуществляют метакаолином. Приготовленный щелочной активатор из NaOH и $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,5\text{SiO}_2$ в определенном соотношении смешивают с очищенной золой в течении 5 мин и заполняют формы для получения кирпичей, выдерживая при комнатной температуре в течении 24 часов [20].

При низких значениях модуля FAG-1 – FAG-3 (отношении молей SiO_2 и Na_2O в щелочном активаторе 0,4; 0,6; 0,8) на поверхности кирпичей ясно видны трещины. При значениях модуля 1,0 и более поверхность кирпичей однородная и не имеет повреждений после падения с двух метровой высоты.

Известно использование золы-уноса в качестве минеральной добавки для приготовления сухой строительной смеси, раствор которой используют для оштукатуривания зданий распылением [21]. Сухую смесь получают смешением следующего сырья в массовых частях:

- | | |
|---|------------|
| – цемент, предпочтительно обычный портландцемент | 12–18; |
| – песок, с диаметром частиц от 0,5 до 0,25 мм | 40–50; |
| – летучая зола ТБО | 1–6; |
| – задерживающий воду загуститель, простой эфир крахмала | 0,05–0,2; |
| – замедлитель, предпочтительно глюконат натрия | 0,05–0,1; |
| – гидрофобизирующая добавка, абиетат натрия | 0,01–0,05; |
| – агент против растрескивания, древесное волокно | 0,02–0,05. |

Полученный строительный раствор легко разбрызгивается, дает хорошо смазывающуюся поверхность, повышая эффективность штукатурных работ.

Синергетическая обработка углеродсодержащих твердых отходов совместно с летучей золой мусоросжигания в присутствии добавок, взятых в массовом соотношении 1–15:3–10:2–10, осуществлена в плавильном оборудовании при температуре 1500–2000°C и давлении 0,025–0,080 МПа в присутствии воздуха или кислорода [22]. Углеродсодержащий твердый отход выбирают из ряда: шлак газификации угля, отработанный активированный уголь, отработанные шины, отработанный графит и т.д. В качестве добавки использованы оксиды магния, кальция, кремния или железа в любом сочетании. Полученный неорганический продукт может быть использован для производства микрокристаллического стекла и вспененной керамики.

Одним из примеров решения проблемы долговечности железобетонных конструкций защитой бетона от повреждения в условиях пониженных температур является создание ускорителя отверждения бетона, содержащего для усиления эффекта отверждения зольную пыль сжигания ТБО [23].

Ускоритель, обладающий противоморозным эффектом содержит следующие компоненты, масс. %:

- зольная пыль 35–55;
- активатор 5–15
- сульфоалюминатный цемент 35–50

Активатор может включать один или более веществ, являющихся формиатом кальция или алюминия, силикатом лития. Ускоритель получают смешением порошкообразных компонентов в течение 15 мин. Количество синергиста составляет 6–10% от массы цементирующего материала в распыленном бетоне. Как показали испытания, использование зольной пыли в качестве основного компонента ускорителя отверждения совместно с жидкостью на основе сульфата алюминия способствует стимуляции коагуляции, повышая прочностные характеристики бетона в условиях низких температур.

Большое содержание оксида кальция в золе-уносе мусоросжигания обусловило ее утилизацию совместно с отходом производства алюминия электролизом [24]. Получение алюмината кальция включает термическую обработку смеси исходных компонентов, взятых в следующих соотношениях, масс. %:

- зола-унос мусоросжигания 40–50
- алюминиевая зола 40–50
- агент денитрификации 5–15
- средство фиксации фтора 10–40

В качестве средства фиксации фтора может быть использовано негашеная известь, карбонат кальция или гидроксид кальция. Агент денитрификации выбирают из гидроксида натрия, карбоната натрия и буры.

Ингредиенты перемешивают, нагревают в печи при температуре 1000–1300°C в течение 10–60 мин для удаления азота. Затем осуществляют плавление при температуре 1400–1600°C в течение 20–120 мин с получением алюмината кальция, используемого в качестве связующего при производстве огнеупорных материалов.

Утилизация золы-уноса мусоросжигания реализована совместной переработкой с твердыми отходами, образующимися в процессе обогащения железной руды для извлечения железа (хвосты железа), и шламом из установки очистки городских сточных вод [25]. Полученный легкий заполнитель имеет следующий состав, масс. %:

- зола-унос ТБО 25–27
- шлам 20–50
- хвосты железа 20–40

Предварительно дехлорированную золу-уноса с массовым содержанием хлора до 2% и шлам сушат, измельчают, перемешивают с измельченными хвостами железа, смесь гомогенизируют, подвергают старению в течение 7

дней, после чего выполняют гранулирование. Цилиндрические гранулы, округляют, сушат при температуре 200°C и помещают в печь для спекания при 1250°C в течении 20 мин. Спеченный материал ввиду низкой плотности является легким заполнителем для производства строительных материалов.

Плазменное плавление смеси золы-уноса и отвального шлака (отход выплавки стали из железной руды) позволяет получить нанокристаллическое стекло [26]. При массовом содержании каждого компонента 30–70% и общем количестве 100% при температуре плавления 1200–1800°C при использовании в качестве газа воздуха получают стеклянный шлак. К стеклянному порошку добавляют вспенивающий агент, стабилизатор пены и щелочной активатор.

В качестве стабилизатора пены может быть использована смесь триэтаноламина с додецилбензолсульфонатом натрия в количестве 1–6 % от массы стеклянного порошка. Смесь для отверждения выдерживают в течении 2–24 часов при температуре 20–100°C. Роль щелочного активатора выполняет смесь гидроксида натрия с жидким стеклом в соотношении 1–2:5–1 и используется в количестве 10–20% от массы базового стеклянного порошка. Для полученного нанокристаллического стекла характерны низкая плотность, высокая температурная стойкость, устойчивость относительно коррозии, что открывает доступ к широкому использованию с одновременной утилизацией вредных отходов.

Многоступенчатой кислотной обработкой золы-уноса получают нитевидные кристаллы сульфата кальция [27]. Зола дробят, добавляют воду и перемешивают до получения суспензии. Затем при температуре 40°C по каплям прибавляют соляную кислоту, представляющую отход производства с концентрацией 15%. Вновь добавляют дистиллированную воду, перемешивают в течение 30 мин и проводят вакуумную фильтрацию. К фильтрату по каплям добавляют 10% раствор сульфида натрия, доводя pH до 4,5. От образовавшегося коричневого осадка сульфидов тяжелых металлов вакуумным отсосом отделяют фильтрат, к которому добавляют последовательно раствор гипохлорита натрия, перекись водорода для аэрации с последующей фильтрацией бесцветного раствора сульфата кальция. Длина нитевидных кристаллов сульфата кальция от 80 до 200 мкм, а диаметр в диапазоне 5–15 мкм.

Нитевидные кристаллы обладают высокой прочностью, что позволяет использовать эту неорганическую соль в качестве армирующего материала для производства огнезащитных и строительных композитов.

Показана возможность утилизации золы-уноса ТБО совместным использованием ультрадисперсного железосодержащего песка с содержанием Fe₂O₃ от 12 до 15% и зольной пыли (побочный продукт сжигания порошкообразного угля в теплоэлектростанциях) для получения высокопрочного низкоуглеродистого материала [28]. Компоненты сырья взяты в следующих частях, масс.:

– ультрадисперсный песок	80–100
– зола-унос ТБО	10–30
– зольная пыль	0–15

– щелочной активатор

6–10

Щелочной активатор представляет собой гидроксид натрия с концентрацией 95% и жидкое стекло с модулем 2,3. Массовое соотношение SiO_2 и Na_2O равно 1,6–2,0. Средний размер ультрадисперсных частиц железного песка 20–40 мкм.

Как показали испытания, повышение степени прокаливания сопровождается незначительной степенью снижения прочности на сжатие. Высокотемпературное сопротивление приготовленного цементирующего материала значительно выше, чем обычного портландбетона.

ВТОРИЧНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ТБО ПЕРЕРАБОТКОЙ ШЛАМА СЖИГАНИЯ

Производство цемента является одним из промышленно важных направлений строительного сектора, потребляющего большое количество глинистых запасов Земли. Использованию обычного портландцемента, мировое производство которого составляет порядка 0,5 т на человека в год, сопутствуют выбросы большого количества парникового газа, а именно диоксида углерода (CO_2), приводящего к изменению климата и другим негативным последствиям для окружающей среды [29–31].

В последнее время опубликовано значительное число исследований, направленных на создание технологий получения комплексного цемента, которые предусматривают введение различных наполнителей природного происхождения либо отходы производства, что позволит снизить выбросы CO_2 и получить цемент с желаемым качеством [32].

Предпринимаемые усилия по уменьшению экологических проблем, возникающих при производстве цемента, позволили разработать состав клинкера заменой части глины на шлак ТБО [33]. Исходное сырье содержит следующие компоненты в массовых частях:

– известняк	87,0–92,0%,
– глина	3,0–6,5%,
– шлак ТБО	1,0–4,0%,
– зола цветных металлов	2,0–5,0%.

Замена части глины на шлак ТБО позволит уменьшить выделение CO_2 при обжиге клинкера при одновременном снижении количества ТБО.

Повышение осадочной текучести цементных растворов достигнуто использованием измельченной золы сжигания ТБО в качестве микронаполнителя как отдельно, так и совместно с природными наполнителями. Приготовленные составы цементного раствора с максимальным содержанием золы 10%, а также заменой на альтернативный микронаполнитель в количестве 2,5% приведены в таблице 1 [34].

Таблица 1. Составы цементного раствора (%) по массе**Table 1.** Cement mortar compositions (%) by weight

Марка	Цемент	Зола ТБО	Молотый кварц	Мета-каолин	Молотое стекло	Микрокремнезем	Наполнитель
М1	35						65
М2	35		5				60
М3	35	5					60
М4	35	2,5	2,5				60
М5	30	10					60
М6	30	7,5	2,5				60
М7	30	7,5		2,5			60
М8	30	7,5			2,5		60
М9	30	7,5				2,5	60

Изменение содержания золы в смеси наполнителя позволило увеличить осадочную текучесть цементного раствора с 50 мм до 90–120 мм с небольшим изменением для каждого образца в течение 90 минут по сравнению с контрольным образцом М1.

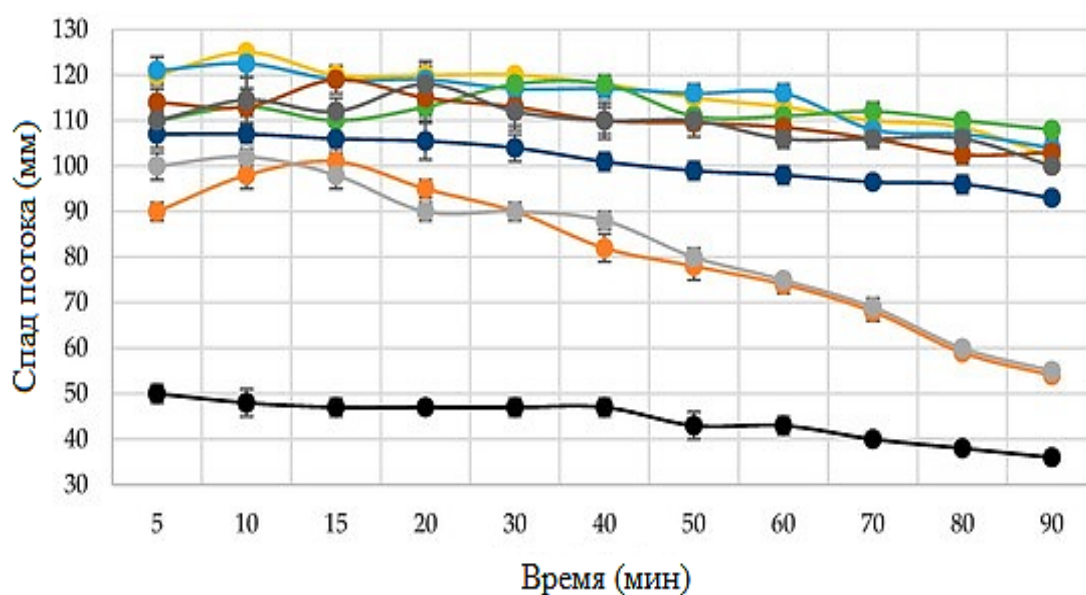


Рис.10. Изменение текучести цементного раствора в зависимости от состава использованного микронаполнителя.

Fig.10. Change in the fluidity of cement mortar depending on the composition of the microfiller used

Повышение значения подвижности для составов с содержанием золы ТБО 7,5% и 10,0% (М5–М9) авторы связывают с потерей сцепления наполнителя с цементом. Однако, при использовании только золы ТБО наблюдалось водоотделение цементного теста, что возможно было избежать добавкой используемых природных наполнителей в составах М4, М6–М9 за счет их высокой площади поверхности.

Исследована возможность использования золы ТБО, образующейся при сжигании кирпича, осколков стекла и керамических осколков для приготовления цементно-щебневого основания дорожного покрытия [35]. Приготовленные цементные составы марки СВМ в качестве наполнителя включали смесь щебня с разным гранулометрическим составом и золу ТБО с массовой долей золы 25, 38 и 50%. Для сравнения выбраны цементные композиты марки СБВ с массовой долей золы 50, 75 и 100% в смеси с крупными гранулами щебня. Результаты испытания на возможность замены части щебня золой ТБО представлены на рисунке 11 [35].

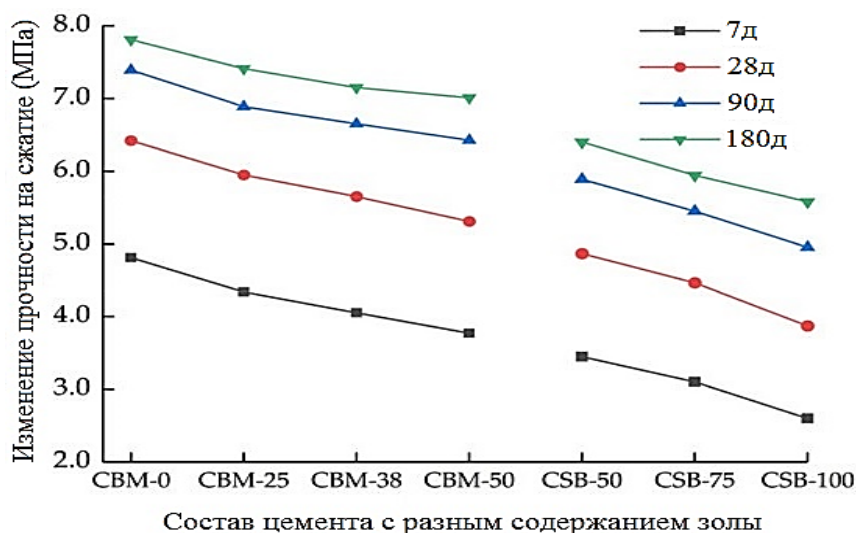


Рис.11. Изменение прочность цементных составов на сжатие в зависимости от состава наполнителя и времени отверждения.

Fig.11. Change in compressive strength of cement compositions depending on the composition of the filler and curing time.

Как видно из рисунка 11 прочность на сжатие с 7 по 28 день увеличивается достаточно ощутимо, что объясняется интенсивностью гидратации начального отверждения смеси, а затем постепенно замедляется. Через 180 дней для смеси наполнителя с 0%, 25%, 38% 50% содержанием золы ТБО в группе СВМ прочность на сжатие увеличилась на 62%, 71%, 76% и 81% соответственно по сравнению с 7 дневной выдержкой. При содержании золы ТБО в смеси наполнителя 50, 75 и 100% прочность на сжатие через 180 дней в группе СБВ увеличилась на 85, 91, и 114%. Усиление эффекта поздней стадии отверждения цемента авторы объясняют замедлением пуццолановой реакции.

Крупные гранулы щебня в группе СВМ, встраиваются друг в друга, образуя каркас, обуславливающий прочность на сжатие композиции. Увеличение прочности на сжатие в группе СВМ авторы работы [35] объясняют внутренним сцеплением цементных составов.

Интересные результаты получены заменой природного песка золой ТВО (донная зола) при приготовлении строительного раствора [36]. Проведена оценка влияния размера зерен (крупная 4,75–0,6, средняя 0,6–0,3, мелкая 0,6–0,3 мм фракции) и количества используемой золы взамен песка (10, 20, 30%).

Результаты испытания твердости строительных растворов, выдержанных 28 дней, представлены на рисунке 12 [36].

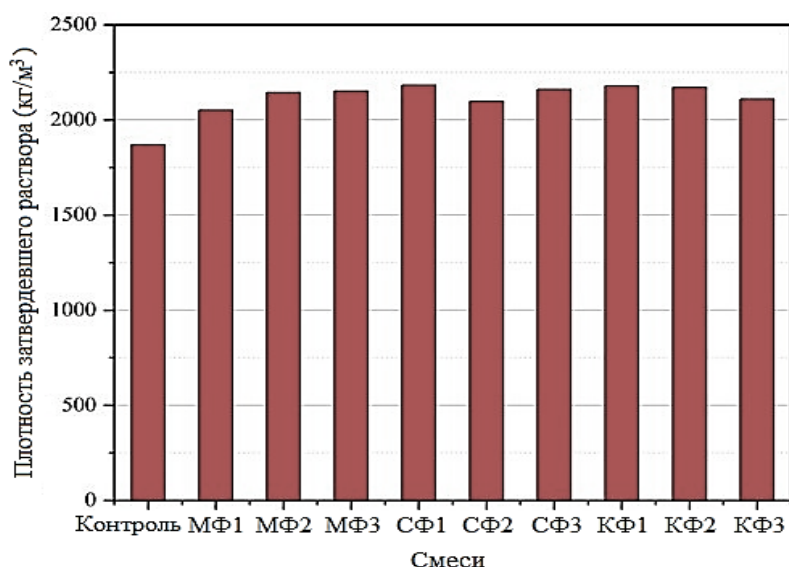


Рис. 12. Зависимость плотности раствора от размера частиц золы (МФ – мелкая фракция, СФ – средняя и КФ – крупная) и количества используемой золы взамен песка: 1–10%, 2–20%, 3–30% .

Fig. 12. Dependence of the solution density on the size of the Bottom ash granules (МФ – fine sand, СФ – medium, КФ – coarse) and the amount of ash used instead of sand: 1–10%, 2–20%, 3–30%.

Из рисунка 12 видно, что замена песка на фракции золы ТБО (мелкая, средняя или крупная) в количестве 10%, 20% или 30% приводит к увеличению плотности затвердевшего раствора по сравнению с контрольным (без замены песка на золу ТБО). Определение прочности на сжатие, на изгиб, а также устойчивости к раствору гидроксида натрия, также выявили увеличение значения этих показателей по сравнению с контрольным раствором.

Таким образом, зола ТБО может использоваться в качестве замены песка при разработке высокоэффективного строительного раствора.

Предложен способ получения керамического изделия с использованием в качестве сырья кубовой золы сжигания ТБО, отходы производства необожженного сырого керамического материала и третьего компонента, выбранного из группы отходов силикат алюминиевого происхождения: стекла, глиноземного красного шлама, золы биомассы, песка и др.

Процесс приготовления керамического материала отражен на рис. 13 [37].

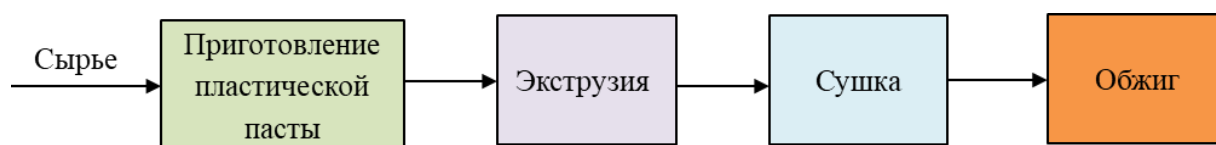


Рис. 13. Производство керамического изделия.

Fig. 13. Production of ceramic products.

В процесс подготовки сырья входит магнитное извлечение металлов, присутствие которых может привести к образованию полости в керамической матрице во время обжига за счет более высокого коэффициента термического расширения по сравнению с другими составляющими матрицы. Выбранные компоненты сырья перед формованием смешивают в соответствующем соотношении. Исходное сырье может быть в виде сухих порошков, паст или суспензий. Смешивание сырья с водой продолжают в диапазоне от 0,25 до 4 часов до образования требуемой пластичности массы, необходимой для экструзии. Температура сушки 100–150°C, температура обжига 800–1400°C в зависимости от состава керамического материала.

С целью уменьшения накопления шлака ТБО путем его использования в строительном секторе предложено использовать шлак ТБО в качестве гидравлического связующего в композициях для дорожного покрытия [38]. Перед использованием в цементных материалах рекомендуется золу сжигания выдерживать в естественных условиях для обеспечения связывания тяжелых металлов. Шлам, образующийся сжиганием ТБО при температуре 1000–1200°C выдерживают на открытом воздухе от шести месяцев, затем отделяют от металлических включений, высушивают до постоянного веса при температуре 105±3°C и измельчают в шаровой мельнице. Гидравлическое связующее готовят смешением сухих компонентов, взятых в следующих пропорциях по весу, %:

- шлак ТБО 55–65%;
- цемент ЦЕМ II/ А-Ш 42.5 Н 30–45%;
- негашеная известь CL90 1–10%;

Показатели плотности и прочности на сжатие лучших образцов полученных композиций гидравлического связующего после 7, 28 и 56 дней отверждения показаны в табл. 2 [38].

Таблица 2. Физико-механические свойства образцов пастообразной массы гидравлического связующего

Table 2. Physical and mechanical properties of samples of pasty mass of hydraulic binder

Образец, % по весу			Плотность, кг/м ³			Прочность на сжатие, МПа		
Цемент	Негашеная известь	ТБО	7 д	28 д	56 д	7 д	28 д	56 д
35	5	60	1794	1797	1807	10,2(0,4)	19,4(0,2)	25,5(2,1)
40	0	60	1780	1785	1800	12,2(1,0)	20,6(0,6)	26,3(2,3)

Предлагаемый состав позволяет снизить накопление кубовой золы ТБО, при этом уменьшить расход глиняных ресурсов, обеспечивая предъявляемое требование к качеству клинкера.

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ СЖИГАНИЯ ТБО СОВМЕСТНОЙ ПЕРЕРАБОТКОЙ ШЛАКА И ЗОЛЫ-УНОСА

Вторичное использование тандема шлака и золы-уноса ТБО открывает новый путь комплексной вторичной переработки вредных отходов сжигания бытового мусора.

Использование в качестве наполнителя золы-уноса установки для сжигания бытового мусора показано на примере получения цементной смеси, для получения которой в качестве сырья взяты следующие компоненты, масс. %:

– зола-уноса мусоросжигающей электростанции	50
– десульфированный гипс	5
– шлаковый порошок	35
– порошковый активатор	1
– твердые отходы мусоросжигающей электростанции	10–40

Использование мелкодисперсных частиц золы-уноса в качестве наполнителя позволяет сделать бетон компактнее, облегчить его, а также увеличить потребность цементной смеси в воде, по сравнению с минеральными порошками, для получения возможности регулирования прочности бетона [39].

Предлагается технология совместной утилизации шлака и летучей золы-уноса ТБО, предварительно подвергнутой выщелачиванию концентратом, представляющим собой концентрированные органические сточные воды после мембранной очистки фильтрата установки мусоросжигания ТБО. Компоненты смеси с массовым соотношением шлак: летучая зола равно 1:(25–55) подвергают тепловой обработке при 850–1050°C в течение 1–5 ч. Схема установки для реализации процесса представлена на рисунке 14 [40].

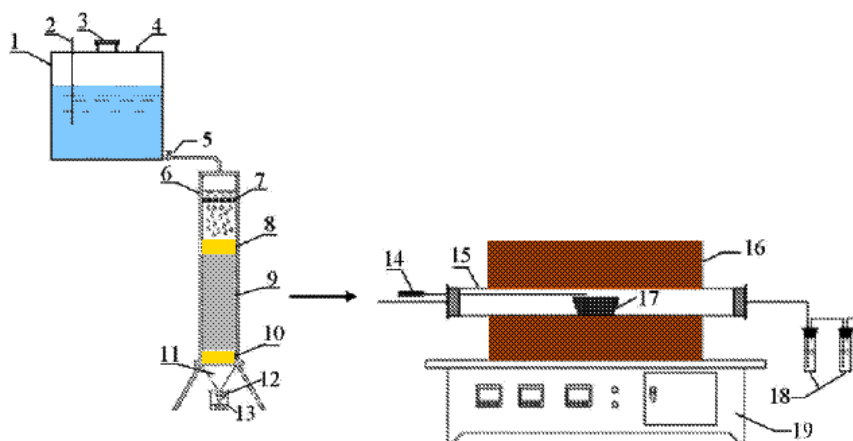


Рис. 14. Установка для совместной утилизации шлака и золы-уноса ТБО.

Fig. 14. Plant for combined utilization of slag and fly ash from solid municipal waste.

Установка включает: 1–резервуар для хранения мембранного концентрата, 2–труба для впуска воздуха, 3–впускное отверстие смеси, 4–выпускное отверстие, 5–клапан управления потоком, 6–колонка летучей золы, 7–блок распределения воды, 8–первый слой кварцевого песка, 9–слой летучей золы, 10–второй слой кварцевого песка, 11–буферная зона фильтрата,

12–запорный клапан, 13–приемная емкость, 14–термопара, 15–нагревательная печь, 16–теплоизоляционный слой корпуса печи, 17–нагревательная емкость, 18–блок очистки хвостовых газов, 19–регулятор температуры печи.

Концентрация тяжелых металлов в остатке после выщелачивания не превышает предельно допустимые нормы, а остаток после термической обработки может быть использован при производстве строительных материалов.

Другой способ обезвреживания золошлаковых отходов, образующихся при сжигании ТБО, заключается в термообработке смеси подовой и летучей золы, взятых в соотношении 7:3, к которой добавлено 2% гашеной извести от массы смеси, в электропечи 3-фазного переменного тока. Электропечь запускается электродуговым разрядом. Затем после прекращения разряда происходит плавление смеси за счет резистивного нагрева от протекания тока между электродами.

Перед подачей в печь шихту гранулируют, что позволяет уменьшить запыленность помещения, уменьшить объем продукта и увеличить теплопроводность за счет снижения содержания воздуха. Температура плавления в печи $\geq 1200^{\circ}\text{C}$. Расплавленную массу охлаждают, разливают в формы, кристаллизуют, гранулируют и разделяют по фракциям.

Отходящие дымовые газы после охлаждения очищают с помощью угольного фильтра и выбрасывают в атмосферу. Система газоочистки показана на рисунке 15 [41].

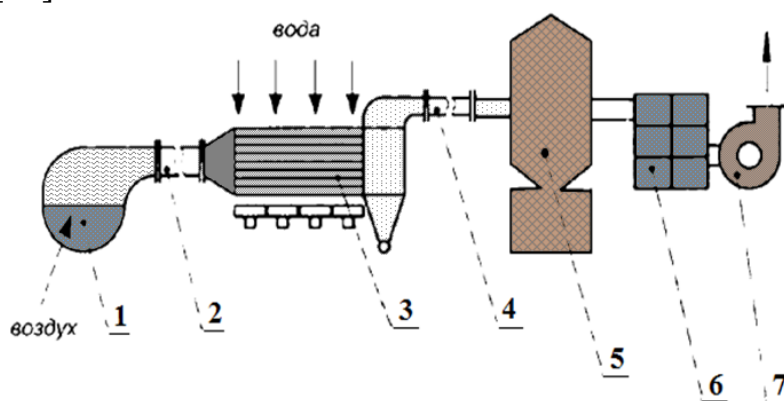


Рис.15. Система очистки отходящих дымовых газов.

Fig. 15. Flue gas cleaning system.

Система газоочистки включает: электропечь 1; водоохлаждаемый газопровод 2; водоохлаждаемый газохладитель 3; газопровод среднетемпературный 4; рукавный фильтр 5; фильтр угольный 6; вентилятор вытяжной 7.

Резкое охлаждение очищаемого пылегазового потока с 1200 до 200°C обеспечивает отсутствие диоксинов и вторичных вредных веществ в отходящем газовом потоке. В результате предложенной технологии получен экологически безопасный химически инертный шлак, используемый в строительной промышленности, а также устранена вероятность загрязнения атмосферы отходящими газами.

Разработана технология получения геополимера с использованием смеси зольных отходов, образующихся при сжигании ТБО [42]. Золу-уноса предварительно подщелачивают 2%-ным гидроксидом натрия и высушивают до содержания влаги менее 2%. Последующие операции получения геополимера включают перемешивание сухого остатка золы-уноса, донной золы, гипса, минерального порошка, жидкого стекла и гидроксида натрия, взятых в следующих количествах, масс. %:

– донный шлак	20–60
– золы-уноса	60–20
– минеральный порошок	17
– гипс	3,0
– гидроксид натрия	0,8
– жидкое стекло	2,0

Полуфабрикат подвергают активации в кольцевой мельнице до получения частиц с удельной поверхностью 400–500 м²/кг. Полученный продукт используют для добавления к цементу. Разработанный способ пригоден для получения облицовочного кирпича, обладающего достаточной твердостью и стойкостью к атмосферным явлениям.

Еще одно решение экологических проблем, связанных с накоплением золы от сжигания ТБО, заключается в её плавлении и преобразовании в инертный шлак непосредственно на мусоросжигательном заводе. Это позволяет значительно снизить объем золы.

Плавление осуществляют в плазменно-термической печи, представленной на рисунке 16 [43].

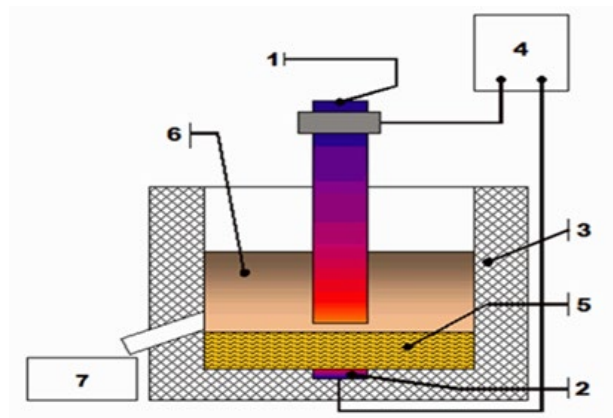


Рис. 16. Схема плазменно-термической печи, где: 1 - графитовый электрод (катод); 2 - подовый электрод (анод); 3 - корпус печи; 4 - источник питания электрического тока; 5 - ванна расплава; 6 - золошлаковый расплав; 7 - емкость для слива переплавленного шлака.

Fig. 16. Diagram of a plasma-thermal furnace, where: 1 - graphite electrode (cathode); 2 - hearth electrode (anode); 3 - furnace body; 4 - electric current power source; 5 - melt bath; 6 - ash and slag melt; 7 - container for draining remelted slag.

Печь запускают с помощью дугового разряда, между электродами. Протекание тока по электродам, электрической дуге и расплава смеси шлака с летучей золой обеспечивает резисторный нагрев для переплавки. Температура

расплава золы на сливе достигает 1350°C, достаточной для детоксикации диоксинов и фурана. Вторичная пыль, содержащая тяжелые металлы поступает в систему газоочистки. Утилизация золы ТБО переплавом непосредственно вблизи мусоросжигательного завода в печи, предлагаемой конструкции, позволит получить остеклованный экологически чистый шлам в виде крупного песка для использования в производстве строительных материалов.

Содержание активных кремниевых и алюминиевых соединений в золе ТБО определило главное направление ее утилизации, а именно, использование в цементном и бетонном производстве.

Возможность утилизации золы ТБО для расширения ассортимента продукции строительной отрасли, подтверждается разработанной технологией получения теплоизоляционной плиты [44]. Очищенную от металлических включений золу ТБО смешивают с порошком природного камня (промышленным твердым отходом) в массовом отношении (0,2–1):(0,2). К полученной смеси добавляют жидкое стекло, армирующий материал и воду в массовых частях:

– смешанный порошок	6
– жидкое стекло	2,5–12
– армирующий материал и вода	0,1–2

К смешанному раствору добавляют соляную кислоту, доводя pH до 1–4 в течение 10–15 мин, затем добавляют аммиачную воду, доводя pH до 8–11. Полученные смешанные золь-гели выливают в форму с волокнистым материалом, выдерживают при 15–60°C в течение 24–72 ч до образования гелеобразного материала. Затем добавляют этиловый спирт, погружают в проточную воду с температурой 10–45°C на 10–20 часов для затвердевания, после чего помещают в устройство для вакуумирования (0–0,02 Мпа), чтобы прижать к отвержденному телу геля соединения, содержащие кремний.

Полученная по такой технологии изоляционная плита не только обладает характеристиками энергосбережения, защиты окружающей среды и снижения выбросов, но также имеет ряд преимуществ: низкая теплопроводность, высокая термостойкость, коррозионная стойкость, устойчивость к старению, хорошая обрабатываемость, прочное соединение с цементными изделиями и т.п.

ВЫВОДЫ

Наблюдаемый экспоненциальный рост объемов твердых бытовых отходов (ТБО) по всему миру вызывает серьезные опасения относительно экологических последствий. Существующие методы уменьшения объемов ТБО, включая сжигание на открытых свалках, приводят к выбросу в атмосферу метана, углекислого газа и других парниковых газов, что способствует изменению климата.

Сжигание ТБО даже при использовании систем улавливания образующихся вредных газов сопровождается образованием золы-уноса и кубовой золы. Эти виды золы содержат тяжелые металлы, хлориды и диоксины,

которые могут мигрировать и накапливаться в атмосфере, представляя угрозу для здоровья человека и окружающей среды.

В связи с этим, решение проблемы утилизации золы, образующейся при сжигании ТБО, требует разработки эффективных методов преобразования ее в экологически безопасные продукты. Первым шагом к этому должно стать проведение предварительной подготовки золы для минимизации рисков, связанных с ее хранением и использованием.

Анализ разработок и изобретений, посвященных предварительной подготовке золы и отобранных из большого количества патентной информации, позволяет нам сделать вывод о растущем интересе к улучшению уже известных методов.

Например, было установлено, что такие параметры, как температура, соотношение твердой и жидкой фаз и время выщелачивания, влияют на эффективность дехлорирования водой. Кроме того, изучено влияние физико-химических свойств растворителей и предложена многоступенчатость процесса, что позволяет увеличить степень извлечения хлора из золы-уноса.

Для снижения негативного воздействия диоксинов важную роль сыграло понимание механизма их разложения. Были разработаны технологии высокотемпературной, гидротермальной и низкотемпературной обработки, которые повышают эффективность детоксикации золы-уноса. Однако эти методы не лишены недостатков. Если первый метод требует большого расхода энергии, то во втором возникает необходимость очистки сточных вод.

Выделение тяжелых металлов сводится к получению материалов экологически приемлемых для захоронения либо ресурсного использования.

Заслуживает внимания широкий спектр применения золы твердых бытовых отходов (ТБО) в производстве строительных материалов, таких как бетон с повышенными прочностными характеристиками, кирпичи из геополимера, красный кирпич, раствор для оштукатуривания зданий методом распыления, микрокристаллическое стекло и вспененная керамика, огнеупорные материалы, гидравлическое связующее и другие. Использование золы ТБО обеспечивает экологические преимущества и способствует развитию строительной промышленности.

На сегодняшний день разработанные технологии вторичной переработки ТБО, хотя и не обеспечивают полный переход к экономике замкнутого цикла в утилизации отходов, свидетельствуют о возможности смягчения их вредного воздействия на окружающую среду.

В условиях возрастающего спроса на строительные материалы и активного развития технологий переработки отходов, твердые бытовые отходы могут стать перспективным сырьем для строительной индустрии в ближайшем будущем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы / References:

1. Callun Keith Purchase , Dhafer Manna Al Zulayq , Bio Talakatoa O'Brien, Matthew Joseph Kowalewski , Aydin Berenjian, Amir Hossein Tarighaleslami, & Mostafa Seifan. (2021). Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits. *Materials (Basel)*, 15(1), 76. <https://doi.org/10.3390/ma15010076>.
2. Al-Ghouti, M.A.; Khan, M.; Nasser, M.S.; Al Saad, K.; & Heng, O.E. (2020). Recent advances and applications of municipal solid wastes bottom and fly ashes: Insights into sustainable management and conservation of resources. *Environ. Technol. Innov*, 21, 101267. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101267>.
3. Siddiqua, A., Hahladakis, J.N., & Al-Attiya W.Ah. (2022). An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 58514–58536. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21578-z>.
4. Ram, C., Kumar, A., & Rani, P. (2021). Municipal solid waste management: A review of waste to energy (Wt E) approaches. *Bio Resource*, 16(2), 4275–4320. <https://doi.org/10.15376/BIORES.16.2.RAM>.
5. Poluektov, T.Yu. (2022). Circular economy as a promising concept in the field of waste recycling. *Moscow Economic Journal*, 8, 106–132. [in Russ.]. https://doi.org/10.55186/2413046X_2022_7_8_491.
6. Shuo Yang, Amirhomayoun Saffarzadeh, Takayuki Shimaoka, & Takashi Kawano. (2014). Existence of Cl in municipal solid waste incineration bottom ash and dechlorination effect of thermal treatment. *J.of Hazardous Materials*, 267, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.045>.
7. Ming Gao, Menglu Wang, Chuanfu Wu, Xiaona Wang, Yufei Yang, Shu Liu, Takayuki Shimaoka, & Qunhui Wang. (2020). Dechlorination of fly ash by hydrolysate of municipal solid waste leachate. *RSC Advances*, 10(44), 26397–26406. <https://doi.org/10.1039/D0RA03113E>.
8. Li Weishi, Li Li, Wen Zhuoyu, Yan Dahai, Liu Meijia, Huang Qifei, Zhu Zhanheng. (2023). Degradation Mechanism of Dioxins in Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash by Low-Temperature Thermal Treatment . *J. Research of Environmental Sciences*, 36(6), 1227–1235. <http://dx.doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.04.07>.
9. Weishi Li, Li Li, Zhuoyu Wen, Dahai Yan, Meijia Liu , Qifei Huang , Zhanheng Zhu. (2023). Removal of dioxins from municipal solid waste incineration fly ash by low 2 temperature thermal treatment: Laboratory simulation of degradation and ash 3 discharge stages. *Waste Manag.* 1:168:45–53. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.044>.
10. Bingru Zhang, Weixiao Zhou, Huangpu Zhao, Zhipeng Tian, Fengting Li, Yinan Wu. (2016). Stabilization/solidification of lead in MSWI fly ash with mercapto dendrimer Chelator. *Waste Management*, 50, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.001>.
11. Dongyang He, Hongyun Hu, Facun Jiao, Wu Zuo, Changqi Liu, Hao Xie, Lu Dong, Xinye Wang. (2023). Thermal separation of heavy metals from municipal solid waste incineration fly ash: A review. *Chemical Engineering Journal*, 467, 143344. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143344>.
12. Pat. 113441532, CN, 2021
13. Xiaofan Huang, Lei Wang, Xiaotao Bi, Dahai Yan, Jonathan W.C. Wong, Yuezhao Zhu. (2024). A novel combined process for enhancing soluble salt recovery and reducing pollutant diffusion in municipal solid waste incineration fly ash. *J. of Cleaner Production*, 450, 141892. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141892>.

14. Pat. 20240059613, US, 2024.
15. Tseng-Hsian Lin, Hung-Jung Siao, Sue-Huai Gau, Jen-Hwa Kuo, Ming-Guo Li, Chang-Jung Sun. (2023). Life-Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash Recycling as a Feedstock for Brick Manufacturing. *Sustainability*, 15(13), 10284. <https://doi.org/10.3390/su151310284>
16. Pat. 117865643, CN, 2024.
17. Pat. 116549908, CN, 2023.
18. Boyu Chen, Priyadharshini Perumal, Farnaz Aghabeyk, Adeolu Adediran, Mirja Illikainen, Guang Ye. (2024). Advances in using municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as precursor for alkali-activated materials: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 204, 107516. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107516>.
19. Jurgita Malaiškienė, Edmundas Spudulis, Rimvydas Stonys. (2023). Effect of Milled Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash on Cement Hydration and Mortar Properties. *Materials*, 16(6), 2528. <https://doi.org/10.3390/ma16062528>.
20. Yueheng Chen, Ming Zhao, Yi Lv, Zhao Jia Ting, Sheng Zhao, Zibiao Liu, Xiang Zhang, Yuanda Yang, Yan You, Wenyi Yuan. (2023). Utilization of municipal solid waste incineration fly ash as construction materials based on geopolymerization. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19, 200162. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200162>
21. Pat.109748555, CN, 2019.
22. Pat. 115872600, CN, 2023.
23. Pat. 117945684, CN, 2024.
24. Pat. 113816410, CN, 2021.
25. Pat. 117164375, CN, 2023.
26. Pat. 114702244, CN, 2022.
27. Pat. 117385182, CN, 2023.
28. Pat. 117185686, CN, 2023.
29. Sanuja Samadith Panagoda, Hansa Ranasinghe, Vishwa Perera, Irukshi Sandunika, Gemal Tilanka, Saneeka Alwis, & Shashini Dilka. (2023). Cement Manufacturing Process and Its Environmental Impact. *J. Res. Technol. Eng.* 4(3), 161–168.
30. Kiwon Oh , Hongyan Ma , Haozhe Yi , Rui Kou , David Vollero , David Schmidenberg , & Yu Qiao. (2022). Structural parts based on Municipal-Solid-Waste incineration ashes. *J. Waste Management*, 150, 185–190. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.004>.
31. Roozbeh Feiz, Jonas Ammenberg, Leonard Baas, Mats Eklund, Anton Helgstrand & Richard Marshall. (2015). Improving the CO₂ performance of cement, part I: Utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *J. Clean. Prod.*, 98, 272–281. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.083>
32. Laura Annika Sormunen, Antti Kalliainen, Pauli Kolisoja, Riina Rantsi. (2017). Combining mineral fractions of recovered MSWI bottom ash: Improvement for utilization in civil engineering structures. *Waste Biomass Valorization*, 8, 1467–1478. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9656-4>
33. Pat. 113998910, CN, 2022.
34. Junchen Xiang, Jingping Qiu, Zehua Li, Junfeng Chen, Yuying Song. (2022). Ecofriendly treatment for MSWI bottom ash applied to supplementary cementing: Mechanical properties and heavy metal leaching concentration evaluation. *Construction and Building Materials*, 327, 127012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127012>.
35. Chenglin Shi, Jia Li, Shuang Sun, Hong Han. (2022). Research on Pavement Performance of Cement-Stabilized Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Base. *Materials*, 15(23), 8614. <https://doi.org/10.3390/ma15238614>.

36. Xiongwei Li, Yanwei Guo, Rahul Sharma, Amardeep Singh, Hao Zhang, Jiarui Zhang & Yu Fu. (2022). Utilization of Different Grain Size of Municipal Solid Waste Bottom Ash in High-Performance Mortars. *Sustainability*, 14(7), 4263. <https://doi.org/10.3390/su14074263>
37. Pat. 20210198151, US, 2024.
38. Pat. 404998, EP, 2022.
39. Pat. 113024143, CN, 2021
40. Pat. 20230303441, US, 2023.
41. Pat. 000 2814348, RU, 2024.
42. Pat. 117964261, CN, 2024.
43. Pat. 0002775593, RU, 2022.
44. Pat. 116986886, CN, 2023.