

*На правах рукописи*

**Куликова Юлия Алексеевна**



**УТИЛИЗАЦИЯ НЕКОНДИЦИОННЫХ  
ОТХОДОВ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Специальность 1.6.21. Геоэкология*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Пашикевич Мария Анатольевна*

**Официальные оппоненты:**

*Сапронова Жанна Ануаровна*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», кафедра промышленной экологии, заведующий кафедрой;

*Антонинова Наталья Юрьевна*

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория экологии горного производства, заведующий лабораторией.

**Ведущая организация** – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **30 июня 2025 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 30 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

С развитием промышленного и сельскохозяйственного производств, транспорта и энергетики растёт потребность в минеральном сырье, что приводит к повышению темпов освоения и разработки полезных ископаемых. Это обуславливает рост количества отходов в объеме, многократно превышающем выход продукции. Согласно статистическим данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды» с 2019 года по 2023 год количество отходов добычи и переработки полезных ископаемых в Российской Федерации превысило 40 млрд тонн, при этом только в 2023 году их количество составило свыше 9,2 млрд тонн.

Одним из лидеров по образованию и накоплению минеральных отходов является чёрная металлургия, насчитывающая свыше 1500 предприятий в Российской Федерации, причём 70% из которых являются градообразующими. По данным Росстата в 2024 году в России было произведено 51,2 млн тонн чугуна и 70,7 млн тонн стали, что привело к образованию свыше 70 млн тонн сопутствующих отходов – доменных и сталеплавильных шлаков.

При выплавке 1 тонны чугуна образуется 0,4-0,6 тонн доменного шлака, а при выплавке 1 тонны стали – 0,1-0,2 тонн сталеплавильного шлака. По данным Росприроднадзора в 2023 году количество образовавшихся шлаков доменного производства составило 8,4 млн тонн, а вторично использовалось лишь 49,2%; количество образования шлаков сталеплавильного производства составило 7,8 млн тонн, количество их переработки – 66,7%.

В настоящее время доминирующим методом обращения с отходами черной металлургии является их наземное складирование, что ведет к возникновению неблагоприятных экологических последствий. Складирование осуществляется открытым способом, вследствие чего происходит поступление загрязняющих веществ в атмосферный воздух, подземные и поверхностные воды, а также в почвогрунты, что в свою очередь приводит к деградации компонентов биосферы.

Одной из основных технологий складирования шлаковых масс является слив его расплава в шлаковые ямы с дальнейшим водным охлаждением. При взаимодействии расплава с водой происходит выделение сероводорода – загрязняющего вещества, относящегося ко 2 классу опасности. Кроме того, после охлаждения мелкодисперсные шлаковые частицы разносятся ветром на прилегающие территории, водорастворимые и подвижные формы металлов вымываются ливневыми и талыми водами, загрязняя почву и проникая в грунтовые и поверхностные водоемы. Помимо этого, под хранение шлаковых масс ежегодно изымаются тысячи гектаров земель.

Актуальность темы обусловлена рядом нерешенных проблем, связанных с многотоннажным образованием отходов, их наземным складированием и, как следствие, возникновением неблагоприятных экологических ситуаций, что создает необходимость увеличения объемов его утилизации.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Проблемы складирования отходов техногенного происхождения и их трансформации под воздействием внешних условий нашли отражение в трудах таких ученых и специалистов как Б.А. Бачурин, А.М. Гальперин, А.И. Семячков, М.А. Пашкевич, А.С. Данилов, Х.Ю. Шеф, Т.В. Карчагина. Особое внимание уделяется отходам черной металлургии в работах К.Г. Пугина, Л.И. Леонтьева, Я.И. Вайсмана, В.А. Бигеева, К. Асиу и других.

Вопросами образования техногенных массивов доменного производства задавались Е.Б. Хоботова, Б.С. Тлеугабулов, Н.Н. Клименко, И. Юксель, особенностями формирования доменных шлаков и негативного воздействия шлакоотвалов на природные компоненты – Н.П. Валуев, С.В. Брызгалов, В.Н. Макарова, В.Ф. Торосян, Ю. Лю. Существующие направления вторичного использования доменных шлаков обширно описаны в трудах А.А. Паламарчук, Е.П. Набоко, Б.С. Юшкова, О.Н. Калинихина, М. Б. Парсонса. К основным направлениям вторичного использования шлака относится его применение в качестве активной минеральной добавки или заполнителя в гражданском, промышленном и дорожном строительстве (С.А. Дергунов, Д.О. Кобзев, Р. Артир), изготовление теплоизоляционных материалов на его основе (О.Е. Сысоев, С.М. Кузнецов, С. Ван), а также

его применение для нейтрализации кислых почв и повышения их плодородия при рекультивации нарушенных земель (И.П. Беланов, Н.Б. Наумова, Г. Динь).

Тем не менее, ресурсного потенциала складированного отвального доменного шлака по существующим направлениям утилизации недостаточно. В этой связи, несмотря на изученность вопроса, необходима разработка экологически эффективного и экономически выгодного комплексного решения проблемы утилизации некондиционного шлака доменного производства.

**Объект исследований** – техногенные массивы черной металлургии, представленные отходами доменного производства (доменным шлаком).

**Предмет исследований** – процессы утилизации доменного шлака в качестве активной минеральной добавки при стабилизации фильтрата полигонов ТКО.

**Цель работы** – снижение техногенной нагрузки на компоненты природной среды от объектов размещения отвальных доменных шлаков и полигонов ТКО.

**Идея работы** – утилизацию некондиционного доменного шлака следует производить путём его использования в качестве активной минеральной добавки для стабилизации фильтрата полигонов ТКО.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ системы обращения с отходами доменного производства в России и за рубежом, включая оценку актуальных технологий их утилизации, принятых в отечественной и зарубежной практике.
2. Мониторинг техногенных массивов доменного производства, как источников негативного воздействия на компоненты окружающей среды.
3. Оценка состава и свойств заскладированных отходов для установления механизмов их трансформации в техногенном массиве доменного производства.

4. Анализ существующих способов снижения негативного воздействия фильтрата полигонов ТКО на природную среду и обоснование выбора доменных шлаков в качестве активной минеральной добавки для его стабилизации.

5. Изучение в лабораторных условиях процессов стабилизации фильтрата полигонов ТКО для определения дозы и гранулометрического состава вносимых отходов.

6. Разработка технологического решения по использованию некондиционных шлаков доменного производства в качестве активной минеральной добавки для стабилизации фильтрата полигонов ТКО и оценка его эколого-экономической эффективности.

#### **Научная новизна работы:**

1. Установлен механизм возникновения эндогенных возгораний, сопровождающихся выделением газообразных продуктов неполного горения, при складировании шлаков доменного производства на территории техногенного массива, сформированного разнородными отходами.

2. Установлены зависимости срока отвердевания смеси при стабилизации фильтрата полигонов ТКО от дозы внесения и гранулометрического состава доменного шлака, используемого в качестве активной минеральной добавки, для формирования промежуточных изоляционных слоев на объектах размещения твердых коммунальных отходов.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности по пунктам:

9. Динамика, механизмы, факторы и закономерности развития опасных природных, природно-техногенных и техногенных процессов, оценка их активности, опасности и риска проявления. Разработка методов и технологий оперативного обнаружения и прогноза возникновения катастрофических природно-техногенных процессов, последствия их проявления и превентивные мероприятия по их снижению, инженерная защита территорий, зданий и сооружений.

17. Ресурсосбережение, санация и рекультивация земель, утилизация отходов производства и потребления, в том числе возникаю-

щих в результате добычи, обогащения и переработки полезных ископаемых, строительной, хозяйственной деятельности и эксплуатации ЖКХ. Геоэкологическое обоснование безопасного размещения, хранения и захоронения токсичных, радиоактивных и других отходов.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Выполнена оценка состава и свойств отходов доменного производства, размещаемых на территории техногенного массива, сформированного разнородными отходами во второй половине 20 века.

2. Выявлена возможность использования некондиционного доменного шлака в качестве активной минеральной добавки при стабилизации фильтрата полигонов ТКО.

3. Разработано технологическое решение совместной утилизации отходов производства чугуна и фильтрата полигонов ТКО.

4. Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию в проекте технической документации ООО «Компания ГрандПроект» при разработке мероприятий по утилизации фильтрата на полигоне твердых коммунальных отходов ООО «Полигон», г. Тверь, (акт о внедрении (использовании) результатов от 25.11.2024).

5. Результаты диссертационной работы подтверждены программой для ЭВМ № 2023685131 «Программа для расчета прочности бетонной смеси с использованием доменного шлака в составе» от 23.11.2023 г.

**Методология и методы исследования.** Проведение исследований осуществлялось с использованием комплексных методов и подходов, заключающихся в анализе разработок зарубежных и российских авторов существующих направлений утилизации доменного шлака и методов очистки фильтрационных вод полигонов ТКО; проведении полевых мониторинговых исследований техногенных массивов доменного производства; проведении лабораторных исследований образцов отвальных доменных шлаков, фильтрата полигонов ТКО и процессов его стабилизации с использованием приборной базы Научного центра «Экосистема» Санкт-Петербургского горного университета (рентгенофлуоресцентная спектрометрия, рентгенов-

ская порошковая дифрактометрия, атомно-эмиссионная спектрометрия и высокоэффективная жидкостная хроматография); обработке полученных результатов.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Складирование шлаков доменного производства на территории техногенного массива, сформированного разнородными отходами, сопровождается протеканием процессов силикатного и известкового распадов, приводящих к разуплотнению шлаковых масс, что обеспечивает приток кислорода к ранее заскладированным отходам с возникновением эндогенных возгораний, сопровождающихся выделением газообразных продуктов неполного горения CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, NO, SO<sub>2</sub>.

2. Снижение техногенной нагрузки на компоненты природной среды от образования и накопления отходов доменного производства обеспечивается использованием отвального шлака, измельченного до крупности менее 0,6 мм, в качестве активной минеральной добавки при стабилизации фильтрата полигонов ТКО в массовом соотношении 1 : 1 : 0,027 (фильтрат : доменный шлак : коагулянт) с дальнейшим получением техногрунта.

3. Техногрунт, полученный на основе стабилизированного доменным шлаком фильтрата полигонов ТКО, имеющий истинную плотность 1,8-2,0 т/м<sup>3</sup> и коэффициент фильтрации 0,65-0,75 м/сут, подлежит использованию в качестве промежуточного изоляционного слоя в теле полигона при захоронении ТКО.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена обработкой полученных в результате проведенных полевых и лабораторных исследований данных с применением современных методов анализа, а также сходимостью экспериментальных данных с теоретическими исследованиями.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XVIII Международная научно-техническая конференция «Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-22)» (май 2022 года, г. Уфа); Всероссийская студенческая конференция с международным участием «Геоэкология: теория и прак-



тика» (ноябрь 2022 года, г. Москва); Международный научный симпозиум «Неделя Горняка-2023» (февраль 2023 года, г. Москва); XXXIV Молодежная научная школа-конференция, посвященная памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» (октябрь 2023 года, г. Санкт-Петербург); XXII Всероссийская научно-практическая конференция «Приоритетные и перспективные направления российской науки в условиях геополитической нестабильности», (сентябрь 2023 года, г. Рязань).

**Реализация результатов работы.** Диссертационное исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе отечественной и зарубежной научной литературы по теме исследования; проведении мониторинга техногенного массива доменного производства; проведении полевых исследований по установлению причин трансформации техногенного массива и отбора проб для дальнейшего лабораторного анализа; обосновании невозможности использования отвального доменного шлака по существующим направлениям его утилизации; проведении лабораторных исследований по определению состава отвального доменного шлака; проведении лабораторных исследований по определению состава фильтрата полигонов ТКО, а также необходимой дозы внесения доменного шлака при его стабилизации; разработке технологического решения по утилизации отходов производства чугуна; оценке эколого-экономической эффективности предлагаемого средозащитного мероприятия.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях

– в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 163 наименования. Диссертация изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка, 30 таблиц, 6 приложений.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., профессору Пашкевич М.А. за научное руководство над работой. За помощь в проведении исследований и ценные научные консультации директору НЦ «Экосистема» к.т.н., доценту Матвеевой В.А., сотрудникам НЦ и всему коллективу кафедры геоэкологии Горного университета.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрена проблема образования и накопления отходов производства и потребления, в частности отходов черной металлургии. Описаны особенности формирования шлаков доменного и сталеплавильного производств, приведены основные негативные аспекты воздействия техногенных массивов доменного производства на компоненты природной среды и рассмотрены существующие в мире направления их утилизации. Исходя из результатов проведенного анализа, были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** рассмотрена проблема складирования металлургического шлака. Представлены результаты мониторинга техногенного массива доменного производства, а также полевых и лабораторных исследований. По результатам проведенных исследований установлено, что складирование шлака способом естественного охлаждения без применения воды в качестве хладагента сопровождается протеканием процессов распада. Это приводит к значительному увеличению отходов в объеме и их разуплотненному состоянию. Как

следствие, происходит приток кислорода к материалам, склонным к окислению, и дальнейшее нагревание слоев массива до температур 180-220°C. Нагрев массива инициирует возникновение эндогенных возгораний и выделение газообразных продуктов неполного горения, представленных угарным газом, углеводородами, оксидами азота и диоксидом серы.

**В третьей главе** представлены результаты исследования возможности применения отвального доменного шлака в качестве вторичного ресурса по существующим направлениям утилизации. Установлено, что ресурсного потенциала отвального доменного шлака недостаточно для его вторичного использования по существующим направлениям, что обуславливает необходимость создания альтернативного способа его утилизации. Обоснована возможность использования отвального доменного шлака в качестве активной минеральной добавки при стабилизации фильтрата полигонов ТКО с дальнейшим получением техногрунта. Приведены результаты теоретических исследований особенностей формирования фильтрата и основных методов его очистки, а также в лабораторных условиях определен его состав. Представлены итоги экспериментов по установлению дозы вносимого в фильтрат доменного шлака, а также обосновано дополнительное применение коагулянта для снижения сроков отвердевания материала. Полученный техногрунт проанализирован на токсичность с дальнейшим установлением класса опасности отхода.

**Четвертая глава** посвящена разработке комплексного средозащитного мероприятия, направленного на утилизацию некондиционного отвального доменного шлака. Предложено применение полученного техногрунта в качестве изоляционного материала на полигонах захоронения ТКО. По результатам теоретических исследований были установлены требования, предъявляемые к изоляционному материалу. Для обоснования возможности использования полученного техногрунта были определены его физико-механические свойства: истинная и насыпная плотности, пористость, коэффициент фильтрации и растворимость. В итоге доказана эколого-экономическая эффективность внедрения данного средозащитного мероприятия.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по диссертации.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Складирование шлаков доменного производства на территории техногенного массива, сформированного разнородными отходами, сопровождается протеканием процессов силикатного и известкового распадов, приводящих к разуплотнению шлаковых масс, что обеспечивает приток кислорода к ранее заскладированным отходам с возникновением эндогенных возгораний, сопровождающихся выделением газообразных продуктов неполного горения  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$ .**

Производственный объект, на котором проводились исследования, является крупнейшим предприятием чёрной металлургии в Российской Федерации по получению конечного металлургического продукта. В результате его деятельности ежегодно образуется более 2,0 млн тонн сталеплавильных и более 3,0 млн тонн доменных шлаков. Из общего количества образующихся отходов доменного производства менее 50% утилизируется, в то время как оставшаяся часть шлака является непригодной для вторичного использования по существующим направлениям и накапливается в техногенных массивах.

В связи с ухудшением экологической обстановки в зоне воздействия металлургического комбината за счет выделения серосодержащих газов при водяном способе охлаждения шлакового расплава был внедрен способ естественного воздушного остывания шлака. Устройство траншей для слива шлаковых масс было осуществлено на территории техногенного массива, сформированного разнородными отходами (шлаками доменного и сталеплавильного производств, отходами коксохимического производства, металлоломом, боем огнеупоров, промасленной ветошью и строительным мусором) во второй половине 20 века.

Спустя 10 месяцев после ввода в эксплуатацию производственного объекта были установлены неравномерные вертикальные деформации массива, превышающие 50 см. В целях установления причин пучения материала были проведены мониторинговые полевые и лабораторные исследования, включающие в себя отбор и анализ залегающих в техногенном массиве отходов.

Для корректного установления мест отбора проб была проведена ночная тепловизионная съемка техногенного массива, слив шлака на который не проводился в течение трех месяцев, с применением беспилотного летательного аппарата (рисунок 1). Анализ показал, что на рассматриваемом участке наблюдается неравномерное остывание отходов в техногенном массиве. Для отбора проб было произведено шнековое бурение скважин на максимальную глубину 12 м с минимальным шагом 1 м. Дополнительно производилось измерение температуры материала по глубине залегания (рисунок 2), а также анализ отходящих при бурении скважин газов.

Температура отходов, слагающих техногенный массив, в скважинах бурения №1, №2, №3 и №11 существенно превышала фоновые значения, зарегистрированные в скважинах №6 и №ТР3, где складирование шлака ранее не производилось, и местами достигала 200°C. Анализ отходящей при бурении скважин газовой смеси указал на присутствие в составе таких компонентов, как NO, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, а также H<sub>2</sub>O в виде пара и углеводородов C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> в концентрациях, многократно превышающих фоновые значения, установленные для атмосферного воздуха на бортах техногенного массива (CO – 187 мг/м<sup>3</sup>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> – 133 мг/м<sup>3</sup>, NO – 2,4 мг/м<sup>3</sup> и SO<sub>2</sub> – 14 мг/м<sup>3</sup>). Максимальная температура отходящей газовой смеси была зарегистрирована в скважине №2 и составила 72°C, что на 47°C выше температуры окружающего воздуха. В процессе бурения регистрировалась влажность отходящих газов в диапазоне 70-100%, наблюдался вынос мелких частиц с паром, что свидетельствовало о протекании в слоях техногенного массива процессов эндогенного горения и тления материалов.

Анализ компонентного состава заскладированных отходов в техногенном массиве методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии позволил установить содержание основных соединений, представленных в таблице 1. Результаты исследования указывают на неоднородность материала, а также наличие в образцах углерода в диапазоне 6-10% по массовой доле, что свидетельствует о присутствии остатков недогоревшего в доменной печи кокса.

Наличие двухкальциевого силиката 2CaO·SiO<sub>2</sub> в шлаке и его переход при длительном остывании без применения воды в качестве

хладагента из  $\beta$ -формы в  $\gamma$ -форму обуславливает протекание процесса силикатного распада. Процесс распада сопровождается растрескиванием материала и его увеличением в объеме на 10-12%. Помимо силикатного распада шлаки склонны к известковому и магнезильному распадам. Они обусловлены увлажнением свободных включений оксидов кальция и магния, что приводит к увеличению в объеме данных включений, набуханию шлака на 20% и его растрескиванию. Представленная реакция также является экзотермической, что приводит к разогреву материала до 100°C. Также шлакам присущи сульфидные распады, связанные с реакцией соединений марганца и железа с сульфидной серой во влажной среде с образованием сульфидов металлов и дальнейшим их переходом в гидраты, что сопровождается увеличением объема на 24 и 38%, соответственно. Процессы распада могут быть искусственно завершены при грануляции шлака мокрым, полусухим или сухим способами. При складировании шлака в техногенных массивах процессы распада могут сохраняться до нескольких десятков лет.

Таким образом, при складировании отходов доменного производства в техногенных массивах способом естественного воздушного охлаждения происходят процессы распада, характерные для металлургических шлаков. Процессы распада сопровождаются растрескиванием заскладированного шлака и приводят к его разуплотнению, что способствует проникновению кислорода из атмосферного воздуха к заскладированным ранее разнородным отходам, в частности, отходам коксохимического производства, склонных к окислению. Окисление горючего материала в свою очередь инициирует процесс нагрева заскладированных отходов, что приводит к возникновению эндогенного возгорания в теле массива с выделением газов неполного горения и дальнейшим тлением материала, что объясняет длительное сохранение высоких температур в теле массива. В этой связи, для ликвидации рассмотренной неблагоприятной экологической ситуации на предприятии было принято решение разобрать шлакоотвал с последующей утилизацией заскладированных отходов. Кроме того, ежегодно на предприятии накапливается до 1,6 млн тонн отходов доменного производства, утилизация которых не производится по ряду экономических и технологических причин.

**2. Снижение техногенной нагрузки на компоненты природной среды от образования и накопления отходов доменного производства обеспечивается использованием отвального шлака, измельченного до крупности менее 0,6 мм, в качестве активной минеральной добавки при стабилизации фильтрата полигонов ТКО в массовом соотношении 1 : 1 : 0,027 (фильтрат : доменный шлак : коагулянт) с дальнейшим получением техногрунта.**

К основным методам обращения со шлаками доменного производства относится их использование в качестве вяжущего компонента в цементной промышленности и заполнителя при производстве бетонов. Реже шлак используется в качестве теплоизоляционного материала, нейтрализатора кислых почв и удобрения при рекультивации нарушенных земель. Проблемой существующих направлений использования доменного шлака является содержание в нем компонентов, ухудшающих качество конечного продукта на его основе. Для использования шлаков в строительной отрасли процессы распада в них должны быть завершены. В сельском хозяйстве применение шлака при рекультивации нарушенных земель возможно только после предварительной оценки его фитотоксичности и установления содержания в нем тяжелых металлов. Ресурсного потенциала отвального доменного шлака по существующим направлениям его вторичного использования недостаточно. Это подтверждает необходимость разработки нового экологически эффективного и экономически целесообразного направления утилизации шлака.

Проведённые теоретические исследования указали на перспективы использования доменного шлака в качестве активной минеральной добавки при стабилизации фильтрата полигонов ТКО – жидкого отхода, образующегося в результате протекания в теле массива биологических и физико-химических процессов разложения под воздействием инфильтрующихся атмосферных осадков, а также за счет собственной влажности отходов. Перечень загрязняющих веществ в фильтрате достаточно широк и включает в себя различные неорганические соединения ( $\text{NH}_4$  759  $\pm$  114 мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{SO}_4$  252  $\pm$  38 мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{Cl}_2$  6075  $\pm$  911 мг/дм<sup>3</sup> и т.д.), тяжелые металлы (Cd 0,267  $\pm$  0,045 мг/дм<sup>3</sup>, Cr 2,31  $\pm$  0,60 мг/дм<sup>3</sup>, Zn 6,5  $\pm$  0,65 мг/дм<sup>3</sup>, Ni 0,40  $\pm$  0,08

мг/дм<sup>3</sup>, Мп  $0,20 \pm 0,03$  мг/дм<sup>3</sup> и др.), а также ряд токсичных трудно-окисляемых растворенных органических веществ (ХПК  $17200 \pm 1950$  мгО<sub>2</sub>/л, БПК<sub>20</sub>  $4750 \pm 950$  мгО<sub>2</sub>/л). Миграция фильтрата наносит непоправимый ущерб компонентам природной среды – поверхностным и подземным водам, почвенному покрову, флоре и фауне.

Очистка фильтрата является сложным и крайне дорогостоящим процессом. Данный фактор обуславливает необходимость разработки альтернативных методов снижения негативного воздействия фильтрата на природную среду, одним из которых является технология его литификации (отвердевания).

Экспериментальные исследования по литификации фильтрата начинались с внесения в фильтрат измельчённого шлака, в результате чего была установлена его низкая гидравлическая способность. Причиной неудачного эксперимента явилось высокое содержание в фильтрате органических соединений. Следовательно, для отвердевания фильтрат подлежит предварительной обработке.

Проведённые исследования показали, что осаждение растворимых в фильтрате органических веществ достигается его обработкой коагулянтами, причём  $Al_2(SO_4)_3$  проявляет наилучшую коагулирующую способность по сравнению с  $Ca(OH)_2$ ,  $FeCl_3$  и  $Fe_2(SO_4)_3$ . Предварительная коагуляция запускает второй этап – непосредственное отвердевание смеси. При проведении исследований осуществлялся подбор эффективного количества внесения доменного шлака. Было установлено, что добавление шлака свыше 1 части на 1 часть фильтрата и 0,033 частей  $Al_2(SO_4)_3$  не оказывает существенного влияния на срок отвердевания материала (рисунок 3). Для дальнейших исследований шлак добавлялся к фильтрату в массовом соотношении 1:1.

Следующим этапом проводился подбор эффективного количества внесения  $Al_2(SO_4)_3$  по сроку отвердевания материала (рисунок 4). Было установлено, что добавление  $Al_2(SO_4)_3$  в количестве менее 0,027 частей недостаточно для связывания смеси на основе 1 массовой части фильтрата и 1 части доменного шлака. При этом добавление коагулянта свыше 0,027 частей не снижает времени отвердевания смеси. Для дальнейших исследований было принято массовое соотношение фильтрата и коагулянта 1:0,027.



Таким образом, была подобрана оптимальная по времени отвердевания рецептура материала в массовом соотношении 1 : 1 : 0,027 (фильтрат, доменный шлак, сульфат алюминия). По истечении 7-14 дней с начала эксперимента материал полностью твердеет и готов к дальнейшему использованию.

Дополнительно была установлена зависимость срока отвердевания материала от размера частиц вносимого доменного шлака. При внесении доменного шлака размером частиц менее 0,6 мм наблюдалось наименьшее время схватывания материала (рисунок 5).

Далее лабораторными и расчётным методом проводилось определение класса опасности полученного материала. Полученный материал по результатам биотестирования имеет IV класс опасности. Валовые концентрации тяжелых металлов не превышают предельно допустимые концентрации в почвах населенных пунктов за исключением мышьяка, водорастворимой и подвижной форм которого обнаружено не было, что свидетельствует о его низкой миграционной способности. Значения БПК<sub>20</sub> и ХПК в вытяжке из полученного материала снизились более чем в 25 раз по сравнению с показателями для фильтрата.

**3. Техногрунт, полученный на основе стабилизированного доменным шлаком фильтрата полигонов ТКО, имеющий истинную плотность 1,8-2,0 т/м<sup>3</sup> и коэффициент фильтрации 0,65-0,75 м/сут, подлежит использованию в качестве промежуточного изоляционного слоя в теле полигона при захоронении ТКО.**

Захоронение отходов ТКО на полигонах проводится поочередно с изолирующими материалами с целью снижения пожароопасности отходов и препятствия выделения вредных газообразных веществ в атмосферный воздух. Материал должен быть газо- и водонепроницаемым, хорошо уплотняться и не должен обладать свойствами летучести, пыления и слеживаемости. В настоящее время в качестве изолирующего материала применяются природные грунты. Согласно инструкции по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО возможно применение промышленных отходов IV класса опасности при удовлетворении следующим требованиям: содержание токсичных веществ в водной вытяжке из отхода менее чем в фильтрате; размер фракций не более 250 мм.

Проведённые исследования показали, что техногрунт на основе доменного шлака и фильтрата полигонов ТКО имеет IV класс опасности. Содержание токсичных веществ в водной вытяжке из техногрунта ниже, чем в фильтрате. Структура материала однородная с размером фракций менее 2 мм, насыпная плотность составляет 1,28-1,48 т/м<sup>3</sup>, а истинная плотность 1,8-2,0 т/м<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации техногрунта 0,65-0,75 м/сут, что свидетельствует о его достаточной водопроницаемости. Растворимость полученного материала не превышает 3% по массе.

На сегодняшний день расчетное количество образующегося фильтрата на рассматриваемом полигоне ТКО, расположенного в Липецкой области в 10 км от рассматриваемого металлургического комбината и функционирующего с 2024 года, составляет 88 тыс. м<sup>3</sup> в год. Фильтрат собирается по дренажной системе и направляется в пруд-накопитель для дальнейшей очистки.

Для приготовления литификата на объем 88 тыс. м<sup>3</sup> в год необходимо 131 тыс. тонн доменного шлака и 3,54 тыс. тонн сульфата алюминия. Складируемый в техногенных массивах отвалный доменный шлак транспортируется на участок литификации, расположенный на полигоне ТКО, где подвергается дроблению до фракций размером менее 0,6 мм. Фильтрат после сбора по дренажной системе из пруда-накопителя также поступает на участок литификации, где осуществляется производство техногрунта. Материалы последовательно поступают в барабанный смеситель (фильтрат, коагулянт, доменный шлак), где перемешиваются и после достижения однородной массы направляются на участок отвердевания. Полученный техногрунт может быть использован для нужд полигона в качестве изоляционного материала (рисунок 6). Уплотнение полигона производится при накоплении слоя ТКО высотой 2 м слоем 0,15-0,25 м техногрунта. В теплое время года изоляция осуществляется ежедневно, в холодное – один раз в трое суток. Образование техногрунта на основе литификата составит 365,7 тыс. тонн, что полностью закроет потребность полигона в изоляционном материале.

Таким образом, данная технология позволит утилизировать 7,7-9,7% от складированного доменного шлака рассматриваемого ме-

таллургического комбината только при использования на данном полигоне ТКО. Экономическая выгода при сокращении затрат на покупку грунта и отсутствия поступления в почву загрязняющих веществ с фильтратом полигонов ТКО составит 14,5 млн руб. в год при капитальных затратах 4,2 млн руб. и эксплуатационных ежегодных вложениях 5,7 млн руб.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации предлагается комплексное решение актуальной научной задачи – утилизации отвальных доменных шлаков, накапливаемых в техногенных массивах.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Установлено, что на предприятиях чёрной металлургии в России ежегодно образуется более 8 млн тонн доменных шлаков с вторичным использованием менее 50%, что приводит к возникновению неблагоприятных экологических ситуаций в местах их размещения и создает необходимость увеличения объемов его утилизации.

2. На основе результатов комплексного мониторинга полигона складирования доменных шлаков на территории техногенного массива, сформированного разнородными отходами, выявлено протекание процессов силикатного и известкового распадов, приводящих к разуплотнению шлаковых масс, что обеспечивает приток кислорода к ранее заскладированным отходам с последующим возникновением эндогенных возгораний, сопровождающихся выделением газообразных продуктов неполного горения CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, NO, SO<sub>2</sub>.

3. Проведёнными исследованиями установлена необходимость устранения неблагоприятной экологической ситуации, сложившейся на территории техногенного массива, путём ликвидации шлакоотвала с последующей утилизацией заскладированных отходов.

4. Установлена целесообразность применения доменного шлака в качестве активной минеральной добавки для стабилизации фильтрата полигонов ТКО, а также доза вносимого шлака для достижения минимальных сроков отвердевания материала в массовом соотношении 1 : 1 : 0,27 (фильтрат, доменный шлак, коагулянт).

5. Доказана рентабельность применения полученного техногрунта IV класса опасности при послойной изоляции отходов, складированных на полигонах ТКО.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований, направленных на расширение областей использования полученного техногенного грунта.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Пашкевич, М.А. Исследование негативных последствий складирования золошлаковых отходов / М.А. Пашкевич, Ю.А. Куликова // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т.14. – №3. С. 1-10.

2. Пашкевич, М.А. Современные тенденции управления отходами доменного производства / М.А. Пашкевич, Ю.А. Куликова // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т.14. – №6. – С. 1-13.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

2. Pashkevich, M.A. Monitoring and assessment of the negative impact of technogenic massives of the mineral and raw complex / Pashkevich M.A., Kulikova Yu.A. // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2023. – № 9-1. – PP. 231-247. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_231

3. Pashkevich, M.A. Lithification of leachate from municipal solid waste landfills with blast furnace slag / Pashkevich M.A., Kulikova Yu.A. // Journal of Mining Institute. – 2024. – V.267. – PP. 477-487. EDN: CSHCSM

*Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:*

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023685131 Российская Федерация. Программа для расчета прочности бетонной смеси с использованием доменного шлака в составе. Заявка № 2023684266: заявл. 15.11.2023; опубл. 23.11.2023 / М.А. Пашкевич, И.П. Сверчков, Ю.А. Куликова; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с.

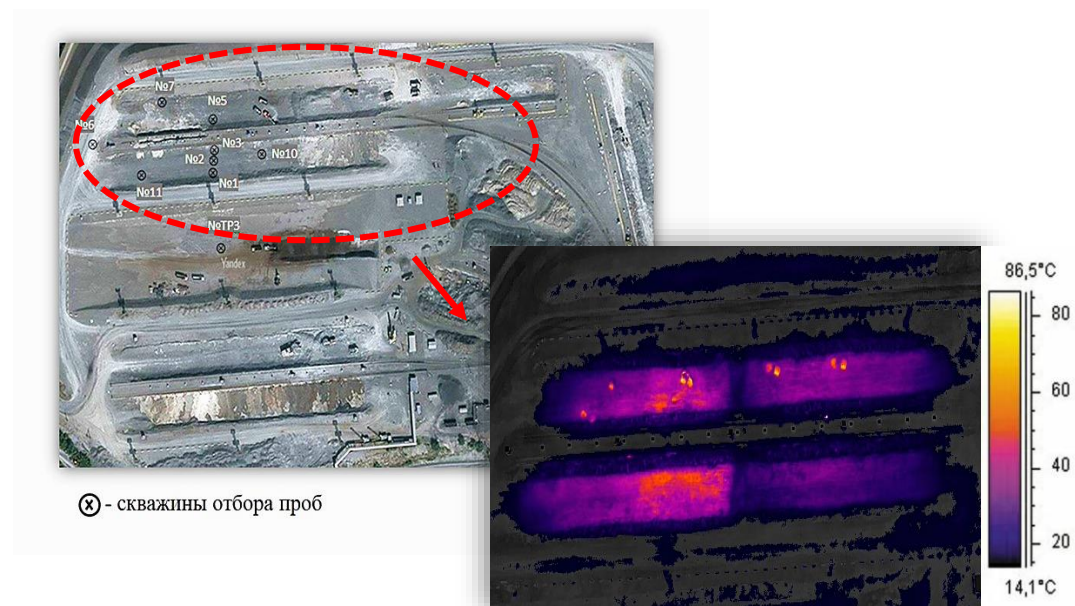


Рисунок 1 – Точки бурения скважин по результатам ночной тепловизионной съемки с применением БПЛА

| t °C | Скв. 1 | Скв. 2 | Скв. 3 | Скв. 5 | Скв. 6 | Скв. 7 | Скв. 10 | Скв. 11 | Тр. 3 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|-------|
| 1 м  | 180    | 220    | 95     | 72     | 33     | 64     | 55      | 106     | 33    |
| 2 м  | 160    | 172    | 151    | 64     | 30     | 51     | 71      | 110     |       |
| 3 м  | 137    | 150    | 135    | 61     | 27     | 82     | 57      | 103     |       |
| 4 м  |        | 133    | 110    |        | 28     | 78     | 72      | 60      |       |
| 5 м  |        | 130    |        |        | 28     | 62     | 69      | 56      | 30    |
| 6 м  |        | 125    | 65     |        | 28     |        | 68      | 50      |       |
| 7 м  |        | 120    |        |        | 28     | 54     | 55      | 60      |       |
| 8 м  |        | 120    | 60     |        |        | 56     | 48      | 55      | 28    |
| 9 м  |        | 120    |        |        |        |        |         | 56      |       |
| 10 м |        | 100    |        |        |        | 44     |         |         |       |
| 11 м |        | 90     | 60     |        |        |        |         |         |       |
| 12 м |        |        |        |        |        |        |         |         |       |

Материнские породы

Рисунок 2 – Температура заскладированных в техногенном массиве отходов по горизонтам залегания

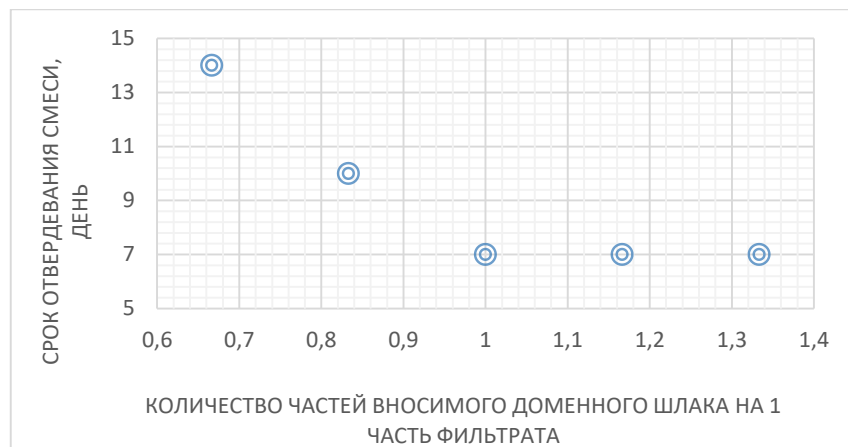


Рисунок 3 – Зависимость времени отвердевания материала от количества вносимого доменного шлака

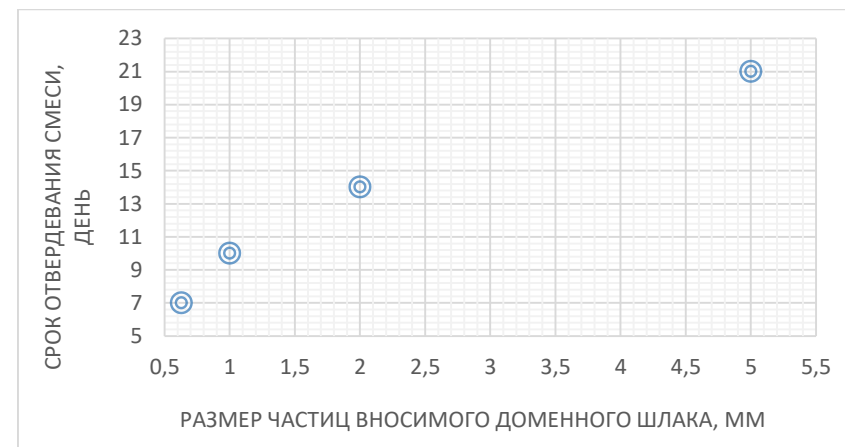


Рисунок 5 – Зависимость времени отвердевания материала от размера частиц вносимого доменного шлака

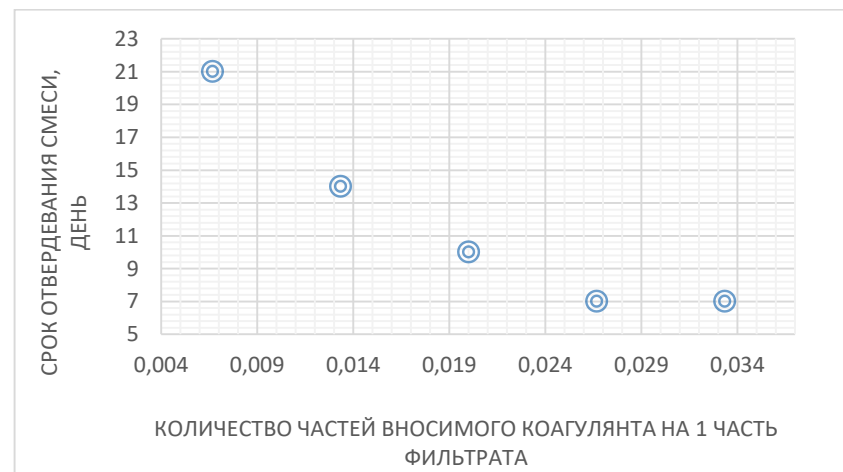


Рисунок 4 – Зависимость времени отвердевания материала от количества вносимого коагулянта  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Таблица 1 – Содержание основных компонентов заскладированных в техногенном массиве отходов

| Скважина | Компонент, %     |      |                                |      |                                |     |                  |
|----------|------------------|------|--------------------------------|------|--------------------------------|-----|------------------|
|          | SiO <sub>2</sub> | CaO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO | C <sub>общ</sub> |
| 1        | 23,0             | 17,7 | 14,4                           | 20,8 | 7,4                            | 0,8 | 8,1              |
| 2        | 28,3             | 21,3 | 16,6                           | 11,9 | 6,7                            | 1,3 | 9,4              |
| 3        | 17,0             | 28,7 | 13,7                           | 15,7 | 4,0                            | 1,1 | 8,6              |
| 5        | 34,7             | 24,2 | 9,2                            | 15,7 | 8,5                            | 0,5 | 4,3              |
| 6        | 27,3             | 26,2 | 19,4                           | 9,1  | 6,1                            | 1,0 | 10,4             |
| 7        | 25,2             | 19,7 | 22,8                           | 15,0 | 5,4                            | 1,3 | 7,3              |
| 10       | 27,0             | 17,5 | 21,9                           | 15,9 | 5,6                            | 0,8 | 8,1              |
| 11       | 21,6             | 29,0 | 18,1                           | 9,0  | 3,3                            | 1,5 | 6,6              |
| ТРЗ      | 23,8             | 27,1 | 23,6                           | 8,4  | 5,7                            | 1,2 | 8,9              |

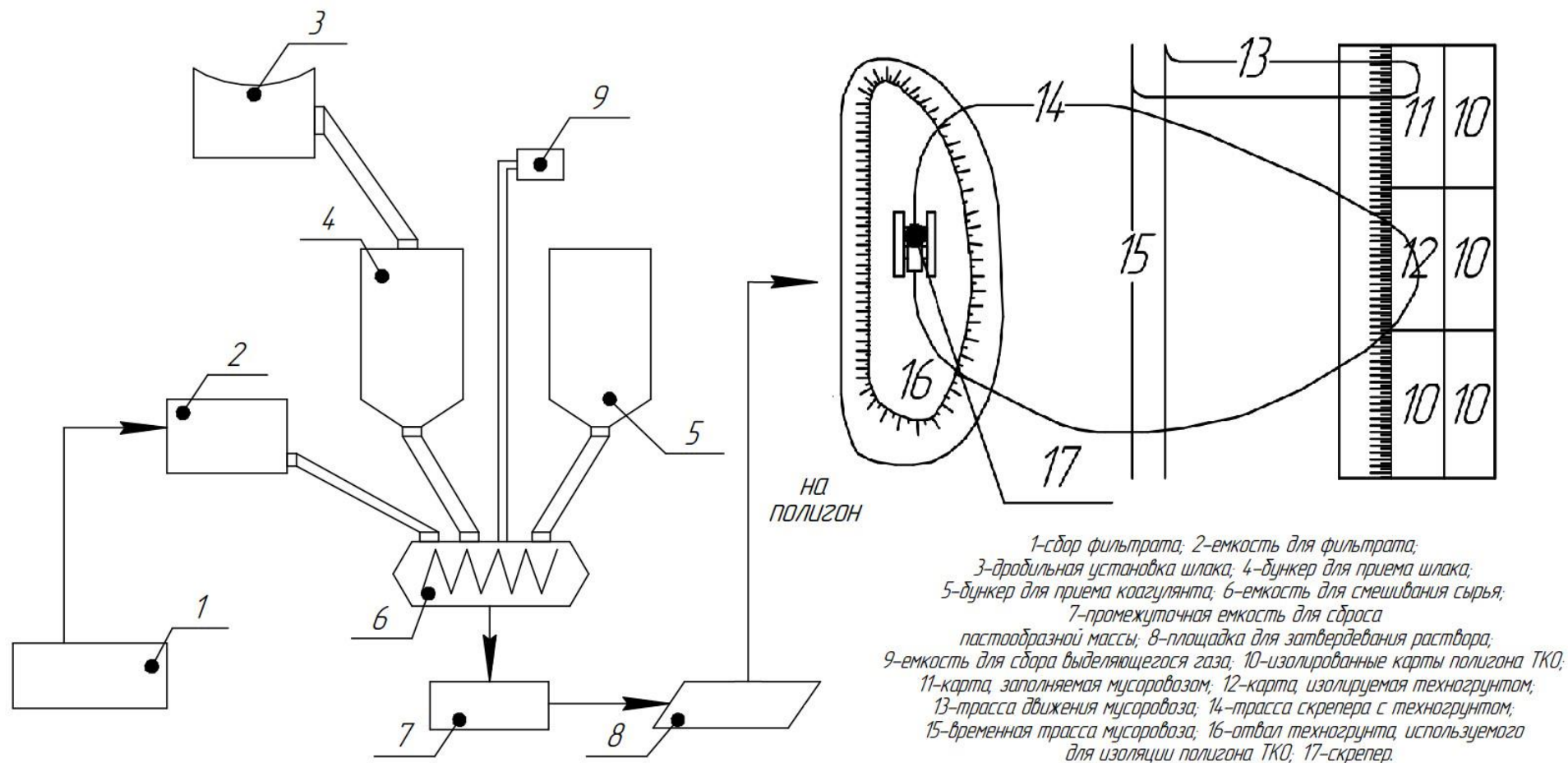


Рисунок 6 – Технология литификации фильтрата полигонов ТКО доменным шлаком