

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-203-213>  
УДК 627.8

Поступила в редакцию 18.11.2024  
Received 18.11.2024

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. Н. Казимирская, А. В. Лихачева

*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В статье обобщены возможные варианты использования мелкодисперсных железосодержащих отходов производства, к которым относятся окалина, пыль систем очистки, шлаки и пр. Такие отходы характеризуются разным составом и периодически в небольших количествах образуются на многих предприятиях, что затрудняет их сбор и переработку. Для анализа возможности использования данных отходов в качестве сырьевых материалов проанализированы научные работы, в том числе включенные в базы Scopus и Web of Science. Показано, что разработанные к настоящему времени в зарубежных странах технологии позволяют использовать мелкодисперсные железосодержащие отходы в качестве сырья в различных отраслях промышленности с получением целевых продуктов: кирпича и радиационно-защитных функциональных композитов, бетонных смесей, сорбентов, коагулянтов и пигментов.

**Ключевые слова:** железосодержащий отход; сырье; переработка; метод; повторное использование.

**Для цитирования:** Казимирская Е. Н., Лихачева А. В. Использование мелкодисперсных железосодержащих отходов производства в качестве сырьевых материалов // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 203–213.

## RECYCLING OF FINE IRON-CONTAINING INDUSTRIAL WASTE AS RAW MATERIALS

E. N. Kazimirskaya, A. V. Likchachova

*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The article summarizes the possible options for the use of fine iron-containing production wastes, which include scale, dust from cleaning systems, sludge, slag and others. Such wastes are characterized by different composition, periodically, in small quantities are formed at many enterprises, which makes it difficult to collect and process them. To analyze the possibility of using these wastes as raw materials, scientific papers, including those included in Scopus and Web of Science databases, have been analyzed. It is shown that the technologies developed to date in foreign countries allow to use fine iron-containing wastes as raw materials in various industries to obtain target products: bricks and radiation-protective functional composites, concrete mixtures, sorbents, coagulants and pigments.

**Keywords:** iron-containing waste; raw materials; processing; method; recycling.

**For citation:** Kazimirskaya E. N., Likchachova A. V. Recycling of fine iron-containing industrial waste as raw materials. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 203–213.

**Введение.** Одним из приоритетных направлений развития промышленного комплекса Республики Беларусь является наращивание производства металлопродукции, производимой металлургическими и машиностроительными предприятиями.

За последние пять лет в стране отмечается устойчивый рост производства металлопроката и изделий из черных и цветных металлов. Например, годовое производство металлопродукции республиканским унитарным предприятием «Белорусский металлургический завод» составило около 2,3 млн т стали (2023 г.) [1], что составляет 15 % прироста объема производства к уровню прошлого года. Для наращивания темпов экономического развития страны на ближайшую перспективу запланирован дальнейший рост потребления металлопродукции на внутреннем рынке, а также увеличение производства экспортно ориентированной продукции (порядка 60 % производимой продукции реализуется на российском рынке), производимой как Белорусским металлургическим заводом, так и ведущими машиностроительными предприятиями [2].

В то же время анализ структуры экспортно-импортных поставок черных металлов Республики Беларусь показывает, что импортная составляющая постоянно преобладает над экспортной [3]. При этом с ростом производства металлопродукции неуклонно увеличивается количество образующихся отходов. Так, в Республике Беларусь за 2023 г. образовалось 131,41 тыс. т железосодержащих отходов, из которых неиспользованными осталось 25,74 тыс. т (около 20 %) [4]. В данной статье рассмотрены возможные варианты использования образующихся в Республике Беларусь (мелкодисперсных) железосодержащих отходов (ЖСО) в качестве сырьевых материалов.

ЖСО серьезно нарушают производственную среду и приводят к огромной трате ресурсов. Они занимают большие производственные территории, содержат тяжелые металлы и другие токсичные компоненты, которые могут выщелачиваться естественным путем, вызывая загрязнение почвы и воды и влияя на качество окружающей среды [5].

В настоящее время действия в области использования отходов обычно ограничиваются переработкой побочных продуктов, содержащих строго установленный и постоянный состав (переработка лома черных и цветных металлов, сталь в кусковой форме, опилки стальные незагрязненные и др.). Однако неостребованными остаются мелкодисперсные ЖСО, отличающиеся непостоянным составом. Данные отходы образуются в небольшом количестве на различных стадиях обработки металлических изделий и не только, что затрудняет их сбор. Поэтому эти отходы хранятся на территории предприятий, на которых они образовались, и (или) вывозятся на захоронение на полигоны твердых коммунальных отходов, а ценные компоненты, содержащиеся в отходах, остаются неиспользованными.

Развитие промышленных предприятий и наращивание темпов производства приводят к тому, что, с одной стороны, с каждым годом количество невозвратных металлосодержащих отходов (в том числе мелкодисперсных) увеличивается на десятки тысяч тонн [6], а с другой стороны, быстрая индустриализация увеличивает спрос на металлы. В связи с этим остро встает вопрос изучения альтернативных источников металлов, в том числе способов максимально эффективного использования промышленных отходов, содержащих ценные компоненты.

Проведенные ранее сравнения составов отходов и природного сырья, рассматриваемые в статье [7], показали, что мелкодисперсные металлосодержащие отходы (ММСО) характеризуются более высокой влажностью (в среднем 70–90 %) и совместным присутствием в них соединений меди, никеля, цинка и хрома, которое в природном сырье не встречается. Однако при этом содержание основных элементов в шламах и осадках изменяется в широких пределах и может достигать до 74 %, что значительно выше, чем в руде, используемой в качестве сырья для получения металлов.

Таким образом, многие виды ММСО можно рассматривать как вторичное сырье, грамотное использование которого позволит не только окупить затраты на его сбор и переработку и снизить воздействие на компоненты окружающей среды, но и получить значительную прибыль [7].

Изучение научных публикаций показывает, что исследователи во всем мире успешно находят пути решения сложившейся ситуации [8–26]. Однако свойства отходов очень многообразны, как и процессы их образования, приводящие к изменениям этих свойств и структуры. Это накладывает многочисленные ограничения на применимость конкретных методов и методик, показывает практическую невозможность создания универсальной технологии переработки металлосодержащих отходов. Зачастую извлечение или обработка отходов для дальнейшего использования по своей стоимости превышает затраты на получение металлов или материалов из природного сырья.

Существует несколько принципиально разных способов обращения с ММСО. Большая их часть подлежит хранению на территории предприятий и захоронению на полигонах. Главная причина такого подхода заключается в трудноизвлекаемости ценных компонентов, непостоянстве состава и экономической нецелесообразности, обусловленной тем фактом, что подобного рода отходы образуются в малом количестве на большинстве предприятий республики, затрудняя их сбор и переработку. В связи с этим в настоящее время весьма перспективными являются исследования, направленные на разработку методов, позволяющих наиболее полно извлекать металлы из отходов производства, что позволит нивелировать затраты, связанные со сбором и транспортировкой отходов на место их переработки. Перерабатывая ММСО, предприятия тем самым будут минимизировать их неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

Методы переработки металлосодержащих отходов условно можно классифицировать по возможности их использования:

- извлечение ценных компонентов из отходов либо в чистом виде, либо в результате перевода их в другие соединения, составляющие основу готовых продуктов;
- использование «как есть» (в виде добавок к различным материалам) и использование продукта для хозяйственных нужд;
- восстановление металлосодержащих соединений с получением шихтовых материалов.

Цель работы – изучить мировой опыт переработки ММСО, в частности ЖСО, которые на данный момент не имеют практически реализованных вариантов использования в Республике Беларусь.

**Данные и методы исследования.** Обзор основан на анализе научных работ, в том числе включенных в базы Scopus и Web of Science. Поиск осуществлен по ключевым словам и фразам: «переработка отходов», «переработка промышленных отходов», «переработка железосодержащих отходов». Предпочтение отдано работам, опубликованным в течение последних пяти лет (2019–2024 гг.), либо наиболее значительным трудам в исследуемой области.

**Результаты и их обсуждение.** На основе анализа научных работ составлена схема способов возможной переработки ЖСО (рис. 1).



Рис. 1. Способы переработки железосодержащего сырья

Fig. 1. Methods for processing iron-containing raw materials

Стоит отметить, что некоторые из рассмотренных способов (см. рис. 1) могут быть применены для переработки мелкодисперсных ЖСО, характеризующихся непостоянным составом.

Использование альтернативных сырьевых ресурсов, представленных мелкими (менее 10 мм) частицами отходов (ЖСО первой категории), малоэффективно или затруднительно, поэтому предварительная подготовка их к переработке предусматривает окускование.

В зависимости от вида частиц окускование осуществляется агломерацией, окомкованием или брикетированием.

В результате окускования частиц получают:

- при агломерации – агломерат крупностью 5–40 мм [27];
- при окомковании – окатыши крупностью в основном 5–14 мм [27];
- при брикетировании – брикеты разной геометрической формы, необходимых габаритов и массы.

Из общего объема производства окускованного сырья большую часть (порядка 70 %) составляет агломерат.

Подготовленные вышеуказанным образом ЖСО используются в качестве сырья при производстве продукции металлургической промышленности.

Ко второй категории относятся дисперсные и мелкодисперсные железосодержащие многокомпонентные отходы, менее ценные материалы с точки зрения использования их в качестве шихтовых: окалина, аспирационная пыль, шламы и т. п. Содержание железа ( $Fe_{общ.}$ ) в таких отходах, как правило, не превышает 70 %, а доля оксидов или других соединений металлов (карбидов, нитридов, сульфидов, сложных минералов и т. п.) составляет от 10 до 100 %, причем в них, как правило, одновременно присутствуют соединения целой группы металлов и неметаллов. Эта категория материалов до настоящего времени остается практически невостребованной.

Таким образом, объектом исследования в статье является изучение способов переработки ЖСО второй категории.

ЖСО, представляющие собой оксидные материалы, к которым относятся окалина, пыль систем очистки, шламы и другие материалы, переработка которых затруднена ввиду их загрязненности и меньшего содержания железа в сравнении с концентрированным металлургическим сырьем, могут быть использованы в качестве сырьевых ресурсов.

В таблице приведен сравнительный анализ состава минеральных руд и металлосодержащих отходов по содержанию в них железа общего.

**Сравнительный анализ состава железосодержащих минералов и отходов****Comparative analysis of the composition of iron-containing minerals and waste**

Минерал			Отход	
Название	Содержание железа, %	Ценность минерала по содержанию железа	Название	Содержание железа, %
Магнетит [28]	72,4	Богатые (>60 %)	Электросталеплавильный шлам [29]	30,0–55,0
Железистые кварциты [28]	25,6	Бедные (<40 %)	Шлам индукционной печи [29]	31,0
Магномагнетит [28]	65,0–68,0	Богатые (>60 %)	Пыль газоочисток электросталеплавильных печей [30]	32,7–35,2
Титаномагнетит [28]	55,0–67,0	Богатые (>60 %)	Шлам мокрого пылеулавливания при очистке вентиляционных выбросов [30]	33,9–38,7
Гематит [28]	70,0	Богатые (>60 %)	Окалина [31]	69,0–73,0
Гетит [28]	62,9	Богатые (>60 %)	Пыль аспирационная [31]	59,0
Лимонит [28]	52,0–62,9	Средние (40–60 %)	Пыль металлическая горячей и холодной резки проката [31]	60,8
Сидерит [28]	48,3	Средние (40–60 %)		

Основным способом переработки ЖСО является их использование в качестве шихтовой добавки при производстве бетоносмесей, керамических изделий и других композиционных материалов.

Так, целью работы [8] являлось исследование возможности включения хвостов, образующихся при обогащении железной руды (железорудных хвостов), в качестве заполнителя в холодные асфальтобетонные смеси. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3510201 «Смесь окалина и сварочного шлака».

Уход за асфальтовым покрытием требует большого количества материалов, и с экологической точки зрения очень важно пытаться искать альтернативные материалы, улучшающие механические качества дорожного покрытия. Установлено, что в качестве таких компонентов целесообразно использовать материалы, характеризующиеся микроповерхностью. К таковым могут быть отнесены некоторые ЖСО.

Железорудные хвосты, проанализированные в работе [8], состояли из таких минералов, как кварц и гематит. Песчаный гранулированный материал был включен в качестве измельченного заполнителя, в то время как железорудные хвосты были добавлены в качестве частичной замены мелких природных заполнителей (щебня, гравия, кварцевого песка).

Результаты показали, что смеси, содержащие железорудные хвосты, соответствуют требованиям, предъявляемым к качеству материалов, используемых для строительства автомобильных дорог. С экологической точки зрения, потенциальное использование мелкодисперсных ЖСО снижает потребление природных ресурсов и позволяет получать асфальтобетонные смеси, по качеству не уступающие холодным смесям.

Еще одним альтернативным сырьем, используемым в качестве добавки к бетоносмесям, являются железные опилки, которые считаются отходами, образующимися в процессе металлообработки в виде мелкого порошка. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3510806 «Металлоотходы (куски, крошка, стружка, высечка и т. п.) при обработке проката черных металлов».

В исследовании [9] железные опилки использовали для определения их пригодности в качестве мелкодисперсного заполнителя при производстве бетона. Замена всех или части мелких заполнителей железными опилками приводит к значительным экологическим преимуществам, так как позволяет решить проблему нехватки заполнителей при производстве бетоносмесей, используемых на различных строительных площадках, и уменьшая экологические проблемы, связанные с накоплением этих материалов на территории предприятий металлообработки.

В работе [10] показано, что из мелкодисперсных ЖСО можно получить жаростойкий бетон, который в дальнейшем можно применять в качестве огнеупора. Для получения жаростойкого бетона использовали следующие техногенные сырьевые материалы: в качестве химического связующего – ортофосфорную кислоту  $H_3PO_4$ ; в качестве кальцийсодержащего компонента – ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома; в качестве алюмосодержащего компонента – шлак от выплавки безуглеродистого феррохрома; в качестве железосодержащего компонента – феррит-кальциевый шлак [10]. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь

и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3990102 «Шлаки сталеплавильные специальные синтетические известково-глиноземистые отработанные». Благодаря использованию ортофосфорной кислоты в качестве связующего автору удалось утилизировать до 85 % техногенного сырья и получить жаростойкие композиты (бетоны) с высокими физико-механическими показателями, что способствовало утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для получения жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих.

Также ЖСО могут успешно применяться в качестве шихтовой добавки при производстве керамических изделий. В работах [11, 12] исследования посвящены получению кирпича из богатых железом металлургических отходов, включающих медный шлак, прокатную окалину, пыль и железные хвосты, образующиеся при измельчении черных металлов и обогащении полезных ископаемых. Аналогичными отходами, образующимися на территории Республики Беларусь и не используемыми на данный момент, можно рассматривать 3550600 «Шлам медный», 3510202 «Окалина от зачистки закалочных баков», 3510201 «Смесь окалины и сварочного шлака». Проведены различные испытания для изучения физико-механических характеристик, прочности и выщелачивания тяжелых металлов из полученного кирпича. Результаты показывают повышенную пористость и потери при обжиге образцов кирпича при увеличении дозирования отходов. Однако снижение кажущейся пористости и потерь при обжиге образцов кирпича наблюдается при увеличении дозирования прокатной окалины и пыли черных металлов. Все образцы кирпича, содержащие отходы металлургического производства, соответствуют требованиям к прочности на сжатие и водопоглощению.

Другим перспективным направлением переработки ЖСО является получение на их основе радиационно-защитных функциональных композитов (РЗФК) [13]. Это направление особенно актуально для Республики Беларусь ввиду развития в нашей стране атомной энергетики и, как следствие, необходимости изоляции радиационно загрязненных отходов.

В исследовании [13] предложена новая технология получения низкоуглеродистых РЗФК с включением богатых железом промышленных отходов в качестве прекурсоров и тяжелых заполнителей. Анализ исследуемых свойств такого отхода, как стальной шлак, показал, что щелочно-активные компоненты, находящиеся в составе промышленного отхода, вступают в реакцию со щелочью-активатором с образованием большого количества геополимерных гелей, а это приводит к улучшению межфазной переходной зоны. Аналогичным отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3990102 «Шлаки сталеплавильные специальные синтетические известково-глиноземистые отработанные». Выявлено, что экранирующие свойства гамма-излучения получаемых РЗФК на 21,2 % лучше, чем у обычного композита, что обусловлено высокой плотностью заполнителей из промышленных отходов и плотной микроструктурой РЗФК. При этом выбросы диоксида углерода и энергопотребление при получении композитов снижены на 64,4 % за счет замены природных тяжелых заполнителей промышленными отходами. Таким образом, указанное новое решение является перспективным способом по переработке промышленных отходов, тем самым способствуя переходу экономики страны к экономике замкнутого цикла.

Стоит отметить, что после предварительной обработки ЖСО возможно их использование в качестве шихтового материала. Переработка твердых отходов, таких как железосодержащая пыль, в окатыши является важным этапом в обращении с этими материалами, поскольку полученные окатыши могут быть использованы в качестве вторичных железосодержащих источников в процессе производства сплавов чистых металлов. Для реализации процесса применяют разное оборудование (вагранки, тигельные печи, дуговые печи постоянного тока, установки электрошлакового переплава и др.), но наиболее эффективным способом переработки сильноокисленных металлоотходов, согласно [14], является применение ротационных печей. Так, в исследовании [15] предложена технология переработки железосодержащей пыли в окатыши с использованием подобного оборудования – вращающейся печи. Аналогичными отходами, образующимися на территории Республики Беларусь и не используемыми на данный момент, можно рассматривать 3510104 «Железосодержащая пыль окатышей» и 3510106 «Пыль железосодержащая с дробью».

Использование вращающейся печи представляет собой пирометаллургический метод переработки, который может быть использован для получения окатышей (металлического железа) из оксидов железа с попутным удалением таких элементов, как Zn, Pb, K и Na, что позволяет перерабатывать указанные материалы.

Кроме того, существует альтернативный метод, предусматривающий совместно с биоуглем (отход производства энергии) восстановление железа окисленного, содержащегося в таком отходе, как агломерационная пыль до железа металлического. Аналогичным отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3510104 «Железосодержащая пыль окатышей». Железосодержащая пыль, пыль окатышей, пыль железосодержащая с дробью и т. д. (железосодержащая пыль), представляют собой твердые отходы, содержащие железо, которые серьезно нарушают производственную среду и приводят к огромной трате ресурсов. Однако частицы пыли, как правило, имеют довольно мелкий размер, что затрудняет переработку данного отхода. Учитывая эту особенность, в исследовании [16] предлагается получать железо

прямого восстановления (железный порошок высокой чистоты) с использованием такой мелкозернистой пыли, что позволит достичь экономических, технических и экологических преимуществ.

После физико-химической обработки ЖСО их можно использовать в качестве целевого продукта. Так, в работе [17] предлагается использовать железный шлам для получения магнитных фотокатализаторов. Аналоговыми отходами, образующимися на территории Республики Беларусь и не используемыми на данный момент, можно рассматривать 3550200 «Шлам металлошлифовальный», 3551200 «Шламы сталелитейные», 3551800 «Шлам железосодержащий».

Магнитные фотокатализаторы представляют собой особый тип фотокатализаторов, наполненных магнитными материалами, такими как Fe, Co, Ni и т. д. Однако приготовление магнитных фотокатализаторов, как правило, требует использования добавок и проведения дополнительных процедур, что приводит к значительному увеличению затрат на подготовку. В работе [17] магнитные фотокатализаторы получали методом пиролиза с использованием железного шлама без каких-либо добавок. Эффективность получаемых фотокатализаторов оценивали на предмет деградации тетрациклина, при этом максимальная эффективность деградации в течение 5 ч составила 95,3 % при концентрации тетрациклина 10 мг/дм<sup>3</sup> (pH = 7,0). Были изучены морфология, состав, структура и фотоэлектрические свойства полученных фотокатализаторов. Проведенные в работе [17] исследования открывают новые возможности для повторного использования железосодержащих шламов.

Еще одним примером использования ЖСО в качестве катализаторов является их применение в процессе Анаммокса [18]. Технологии типа Анаммокс основаны на двух самостоятельных микробиологических процессах: частичной нитрификации, которая включает окисление половины содержащегося в сточных водах аммония до нитрита, и анаэробном окислении аммония нитритом до молекулярного азота.

В исследовании [18] была продемонстрирована возможность использования отходов железа в качестве катализаторов. Перед использованием оксидное железо предварительно восстанавливали до металлического, что обеспечивало увеличение эффективности удаления азота на 15–35 % по сравнению с контрольным образцом, в котором катализатор не использовали. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3510202 «Окалина от зачистки закалочных баков».

Осуществление процесса Анаммокса с использованием в качестве катализаторов восстановленных ЖСО позволит одновременно обеспечить энергоэффективное удаление азота из сточных вод и повторное использование ЖСО как ценного ресурса.

В случаях когда использование непосредственно ЖСО невозможно по техническим или экономическим показателям, данные отходы можно использовать в качестве источников железа. Значит, предварительно извлеченное из данных отходов железо подлежит использованию для получения целевого продукта. Примерами подобного рода целевых продуктов могут служить пигменты, коагулянты, сорбенты и др. Так, в работе [19] предлагается использовать ЖСО производства титановых белил для получения аккумуляторного фосфата железа (III).

Извлечение железа из побочного продукта сульфата железа для получения аккумуляторного фосфата железа (III) представляет собой перспективный подход к решению проблемы утилизации отходов, одновременно обеспечивая прекурсор для новых энергетических батарей. Кроме того, железный купорос также возможно использовать в производстве желтых и красных железосодержащих пигментов и как коагулянт при очистке водопроводной воды. Избыток купороса также можно прокаливать с известью и получать таким образом «окатыши» – сырье для выплавки чугуна в вагранках, индукционных печах и др. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 5152000 «Сульфат железа (зеленая соль)».

Альтернативным способом использования извлеченного из отходов железа общего является получение на его основе сорбентов. В работе [20] с помощью модифицированного метода Массара из железной окалины получены магнитные сорбенты для удаления ионов тяжелых металлов и органических загрязнителей из сточных вод. В качестве сырья для получения магнитных сорбентов использована окалина от зачистки закалочных баков, которой в 2023 г. в Республике Беларусь образовалось 530 т. При этом данный отход не используется, что приводит к его накоплению на промышленных территориях предприятий.

Полученные в лабораторных условиях магнитные сорбенты обладали заданными магнитными свойствами, что позволяло управлять и контролировать их нахождение в обрабатываемой среде. Исследования показали, что полученные магнитные сорбенты отличались более чистым составом в сравнении с используемым для их получения отходом, и представляли собой частицы магнетита. Полученные сорбенты показали сравнительно высокие значения сорбционной емкости по отношению к тяжелым металлам (Cu, Mn, Fe), а также по отношению к метиленовому голубому. Кроме того, в работе [20] представлен механизм сорбции загрязняющих веществ полученными сорбентами. Проведенные исследования подтверждают, что данный способ переработки ЖСО служит перспективным направлением их использования, а сами отходы являются ценным сырьем.

Другим примером получения сорбентов на основе ЖСО является работа [21], в которой отходы стальной пыли двух разных сталелитейных заводов использовали для обеззараживания воды. В качестве модельного загрязнителя применяли анионный краситель эриохром черный Т (ЭЧТ). Частицы стальной пыли показали высокое сродство к красителю ЭЧТ (100%-е удаление) при  $\text{pH} = 2,0$  и концентрации красителя  $20 \text{ мг/дм}^3$ . Кинетические данные были лучше описаны моделью псевдовторного порядка, указывающей на хемосорбционные взаимодействия. Результаты изотерм показали хорошее соответствие модели изотермы Ленгмюра, предполагающей адсорбцию ЭЧТ на частицах стальной пыли в монослой. Максимальная адсорбционная емкость составила  $100,2 \text{ мг/г}$ . Исследования показали, что частицы стальной пыли могут быть напрямую использованы в качестве потенциально недорогого и перерабатываемого адсорбирующего материала для очистки водных потоков, загрязненных красителем. В качестве аналоговых отходов можно рассматривать 3510104 «Железосодержащая пыль окатышей» и 3510106 «Пыль железосодержащая с дробью».

Также известен способ синтеза магнитных сорбентов, представляющих собой магнитные цеолиты, полученные из летучей золы и ЖСО в сверхкритической воде для удаления элементарной ртути из дымовых газов [22]. Цеолитизация летучей золы приводит к образованию более активных центров галогенов на поверхности материалов. Основной кристаллической фазой синтетического магнитного цеолита является канкринит ( $\text{Na}_6\text{Ca}[\text{CO}_3(\text{AlSiO}_4)_6] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). В качестве аналогового отхода можно рассматривать 3510203 «Смесь окалина и сварочного шлака».

Другим продуктом, получаемым из извлеченного из отходов железа, являются коагулянты. Данные соединения применяются в практике очистки сточных вод при процессах осветления и обесцвечивания.

Стружка стальная, загрязненная органическими веществами, является опасным отходом, который сложно перерабатывать из-за высокого содержания смазочно-охлаждающих жидкостей в составе отхода, и сегодня его обычно отправляют для захоронения на полигоны или складывают в несанкционированных местах (свалках). В качестве аналоговых отходов можно рассматривать 3510801 «Металлоотходы (обрезь, немерные концы, недокат, стружка и т. д.) обработки проката», 3552903 «Шлам стали в смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)». Стружка может содержать до 80 % железа и представляет собой потенциальное вторичное сырье для производства реагентов, таких как хлорид железа (III) и др., которые могут быть использованы для очистки сточных вод. В работе [23] представлен новый гидрометаллургический подход к переработке стальной стружки с получением хлорида железа (III) путем селективного отделения железа от других тяжелых металлов, входящих в состав отхода. Целью данной работы являлось достижение селективного отделения металлов от смазочно-охлаждающей жидкости и абразивов путем выщелачивания. Результаты показали, что растворы хлорида железа (III) чистотой 99 % могут быть получены из стальной стружки за одну стадию выщелачивания.

Полученные растворы хлорида железа ( $\text{FeCl}_3$ ) являются товарным продуктом и могут использоваться в качестве коагулянтов при очистке природных и сточных вод. Благодаря альтернативному применению стружки повышается ее потенциальная ценность. Это способствует вторичной переработке отхода, делает его захоронение менее привлекательным и таким образом обеспечивает более рациональное обращение с данным отходом.

Также когулянты получали из шлама шлифовального [24]. В качестве аналоговых отходов можно рассматривать 3550200 «Шлам металлошлифовальный и шлам, загрязненный смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ)» и 3552903 «Шлам стали в смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)». Коагулянт получали путем обработки шлифовального шлама серной кислотой. Особенность предлагаемого в данной работе метода заключалась в постадийном добавлении серной кислоты, что привело к увеличению выхода целевого продукта, кристаллического сульфата железа. Образующийся в процессе получения коагулянта сернокислый маточный раствор и промывные воды авторы предлагают использовать для собственных нужд очистных сооружений, связанных с обезвреживанием эмульсионных сточных вод и восстановлением хромосодержащих сточных вод.

Кроме коагулянтов и сорбентов, получаемых из извлеченного из отходов железа, также получают пигменты. В работе [25] авторы предлагают получать красные пигменты из железного купороса. При этом получают пигменты с требуемыми свойствами, а также побочный продукт – сульфат натрия, который предлагают использовать в качестве удобрения в сельском хозяйстве. В работе [26] показано, что для получения красного пигмента могут быть использованы такие мелкодисперсные ЖСО, как окалина, шлам и скрап. Однако объектом исследований в указанной работе выступает сталеплавильный шлак, который также может быть использован в качестве сырья для получения пигментов, применяемых в строительной промышленности.

Как видно из обзора, возврат в производство мелкодисперсных ЖСО полностью зависит от их начального состава и способа последующей обработки. Комбинируя различные методы, можно комплексно подойти к переработке отходов различных классов, а также смешанных отходов, получая на их основе материалы, востребованные в различных отраслях промышленности (рис. 2).

В большинстве случаев, используя современные методы переработки отходов, можно обеспечить полное обезвреживание и многократное использование в технологических процессах ценных ресурсов, которые сейчас хранят на территории предприятий или захоранивают на полигонах.



Рис. 2. Область применения материалов, полученных из железосодержащих отходов производства

Fig. 2. The scope of application of materials obtained from fine iron-containing wastes

**Закключение.** Приведенные результаты изучения научных публикаций показывают, что мелко-дисперсные ЖСО, представляющие собой оксидные материалы, к которым относятся окалина, пыль систем очистки, шламы и прочие, могут быть использованы в качестве сырья в различных отраслях промышленности с получением целевых продуктов:

- 1) кирпича и РЗФК;
- 2) бетонных смесей;
- 3) сорбентов;
- 4) коагулянтов;
- 5) пигментов.

Проведенный анализ показал, что переработка ЖСО является перспективным направлением их использования в качестве ценного сырья для различных отраслей промышленности как Республики Беларусь, так и других стран. Совершенствование системы обращения с ними будет способствовать переходу экономики страны к замкнутому циклу.

#### Список использованных источников

1. Белорусский МЗ по итогам 2023 года увеличит выпуск стали на 15 % // Металлургический бюллетень. – URL: <https://www.metalbulletin.ru/news/black/10176405/> (дата обращения: 29.10.2024).
2. Освоение и разработка новых видов продукции. БМЗ об основных задачах на 2025 год // Интернет-портал BELTA.BY. – URL: <https://belta.by/economics/view/osvoenie-i-razrabotka-novyh-vidov-produktsii-bmz-ob-osnovnyh-zadachah-na-2025-god-690444-2025/?ysclid=m8e8hr9tjp860647906> (дата обращения: 18.03.2025).
3. Внешняя торговля товарами // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/vneshnyaya-torgovlya/vneshnyaya-torgovlya-tovarami/> (дата обращения: 18.03.2025).
4. Отходы // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovmestnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/i-othody/> (дата обращения: 29.10.2024).
5. Туктарова, И. О. Анализ существующих методологических подходов к проблеме установления границ почвенного загрязнения основными поллютантами и металлсодержащими наночастицами в районах расположения несанкционированных свалок / И. О. Туктарова, Р. А. Болотов // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 193–200. – URL: [https://nanobuild.ru/ru\\_RU/journal/Nanobuild-3-2021/193-200.pdf](https://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-3-2021/193-200.pdf) (дата обращения: 18.03.2025).
6. Наличие, образование и движение отходов по видам экономической деятельности // Экологический портал Республики Беларусь. – URL: <https://ecoportal.gov.by/otkhody/nalichie-obrazovanie-i-dvizhenie-otkhodov/otkhody-po-vidam-ekonomicheskoy-deyatelnosti/> (дата обращения: 17.05.2025).
7. Элементный и фазовый состав гальванических шламов, осадков очистных сооружений машиностроительных и приборостроительных предприятий Республики Беларусь / В. Н. Марцуль, А. В. Лихачева, О. С. Залыгина [и др.] // Природные ресурсы. – 2013. – № 1. – С. 113–118.



8. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures / R. Freddy, A. Guimarães, A. Vivoni, R. Schroder // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 266. – Part B. – P. 57–65.
9. Rotary hearth furnace for steel solid waste recycling: Mathematical modeling and surrogate-based optimization using industrial-scale yearly operational data / J. Kim, M. Cho, M. Jung [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 464. – P. 125–133.
10. Абдрахимов, В. З. Использование металлургических кальций-, алюминий- и железосодержащих шлаков в производстве жаростойкого бетона на основе ортофосфорной кислоты / В. З. Абдрахимов // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 82–95.
11. Recycling of metallurgical wastes in ceramics: A sustainable approach / Y. Er, M. Sutcu, O. Gencel [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 349. – P. 45–52.
12. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity / R. Li, Y. Zhou, C. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 213. – P. 43–50.
13. Iron-rich industrial waste enhanced low-carbon radiation shielding functional composites / Y. Xia, D. Shi, R. Zhao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 449. – P. 97–104.
14. Ровин, С. Л. Конструктивные особенности ротационных печей / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2020. – № 4. – С. 49–59.
15. Novel approach to recycling of steel swarf using hydrometallurgy / T. Ottink, N. Viececi, M. Foreman, M. Petranikova // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2022. – Vol. 185. – P. 235–241.
16. Synergistic conversion of iron ore sintering dust and waste biochar to produce direct reduction iron and syngas: Gasification, reduction behavior and thermodynamic analysis / L. Wang, Y. Yang, Y. Ou [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 434. – P. 27–31.
17. Self-endowed magnetic photocatalysts derived from iron-rich sludge and its recycling in photocatalytic process for tetracycline degradation / X. Liu, H. Wang, Ch. Wang [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2024. – Vol. 395. – P. 146–151.
18. A new concept of waste iron recycling for the enhancement of the anammox process / W. Liu, T. Li, J. Wang [et al.] // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 307. – Part 4. – P. 78–86.
19. Extraction of iron from waste titanium whitewash to produce  $\text{LiFePO}_4$  batteries / Y. Jiang, C. Peng, K. Zhou [et al.] // *Clean Production*. – 2023. – Vol. 415. – P. 137–145.
20. Казимирская, Е. Н. Железосодержащие отходы как вторичный материальный ресурс / Е. Н. Казимирская, А. В. Лихачева // Импортзамещение, научно-техническая и экономическая безопасность : сб. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения – 2022». – Минск : БГТУ, 2022. – Т. 1. – С. 157–161.
21. Comparative adsorption of Eriochrome black T onto recyclable steel dust wastes: Isotherm, kinetics and thermodynamic studies / M. Manzar, M. Alshabib, U. Alam [et al.] // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2022. – Vol. 645. – P. 59–65.
22. Rapid synthesis of magnetic zeolite materials from fly ash and iron-containing wastes using supercritical water for elemental mercury removal from flue gas / L. Ma, L. Han, Sh. Chen [et al.] // *Fuel Processing Technology*. – 2019. – Vol. 189. – P. 39–48.
23. A novel recycling and reuse method of iron scraps from machining process / P. Li, X. Li, F. Li // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 266. – P. 79–85.
24. Соколов, Л. И. Получение железосодержащего коагулянта из отходов шлифовального производства / Л. И. Соколов, К. Л. Соколов // *Системные технологии*. – 2023. – Т. 4, № 49. – С. 154–160.
25. Шаматов, С. А. Получение сульфата натрия и железоксидного пигмента на основе железного купороса / С. А. Шаматов, И. У. Рахманов // *Scientific Journal Impact Factor*. – 2021. – Vol. 1, № 4. – P. 1478–1482.
26. Рузавин, А. А. Синтез красного железоксидного пигмента на основе конвертерного сталеплавильного шлака для строительной индустрии / А. А. Рузавин // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 19–27.
27. Металлургия чугуна : учеб. для вузов / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев [и др.] ; под ред. Ю. С. Юфина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Академкнига, 2004. – 774 с.
28. Классификация железных руд // Горнодобывающий ресурс России «Rosmining». – URL: <https://rosmining.ru/wp-content/uploads/2022/05/-zheleznyh-rud-.pdf?ysclid=m9jr9njtom735205766> (дата обращения: 16.04.2025).
29. Урбанович, Н. И. Анализ состава и технологий переработки дисперсных железосодержащих отходов / Н. И. Урбанович, С. В. Корнеев // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 4. – С. 66–69.
30. Переработка железосодержащих пылевидных отходов металлургического производства в пигмент для окраски строительных материалов / В. Б. Федосеев, А. Д. Зорин, Е. Н. Федосеева [и др.] // *Бутлеровские сообщения*. – 2013. – Т. 42, № 9. – С. 94–102.
31. Ровин, С. Л. Классификация и свойства дисперсных металлоторходов / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2015. – Т. 79, № 2. – С. 5–13.

## References

1. *Belorusskij MZ po itogam 2023 goda uvelichit vy'pusk stali na 15 %* [Belarusian Steel Works to increase steel output by 15 % in 2023]. Available at: <https://www.metalbulletin.ru/news/black/10176405/> (accessed 29 November 2024).
2. *Osvoenie i razrabotka novy'x vidov produkcii. BMZ ob osnovny'x zadachax na 2025 god* [Mastering and development of new types of products. BMP on the main tasks for 2025]. Available at: <https://belta.by/economics/view/osvoenie-i-razrabotka-novyh-vidov-produktsii-bmz-ob-osnovnyh-zadachah-na-2025-god-690444-2025/?ysclid=m8e8hr9tjp860647906> (accessed 18 March 2025) (in Russian)

3. *Vneshnyaya trgovlya tovarami* [Foreign trade in goods]. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/vneshnyaya-torgovlya/vneshnyaya-torgovlya-tovarami/> (accessed 18 March 2025). (in Russian)
4. *Otxody* [Waste]. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovmestnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/i-othody/> (accessed 29 November 2024). (in Russian)
5. Tuktarova I. O., Bolotov R. A. *Analiz sushchestvuyushchih metodologicheskikh podhodov k probleme ustanovleniya granic pochvennogo zagryazneniya osnovnymi polyutantami i metalsoderzhashchimi nanochasticami v rajonah raspolozheniya nesankcionirovannykh svalok* [Analysis of existing methodological approaches to the problem of establishing the boundaries of soil pollution by basic pollutants and metal-containing nanoparticles in areas of unauthorized landfills]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal = Nanotechnology in Construction: An online scientific journal*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 193–200 (accessed 18 March 2025). (in Russian)
6. *Ob utverzhdenii, vvedenii v dejstvie obshchegosudarstvennogo klassifikatora Respubliki Belarus'. postanovlenie Ministerstva prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus', 09 dekabrya 2019 goda, № 3-T* [On approval, enactment of the national classifier of the Republic of Belarus : Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, December 09, 2019, No. 3-T] *ETALON. Zakonodatel'stvo Respubliki Belarus'. Nac. Centr pravovoj inform. Resp. Belarus'* [ETALON. Legislation of the Republic of Belarus. National Center for Legal Information. Republic of Belarus]. Minsk, 2024. (in Russian)
7. Marcul' V. N., Lihacheva A. V., Zalygina O. S., Shibeka L. A., Romanovskij V. I. *Elementnyj i fazovyj sostav gal'vanicheskikh shlamov, osadkov ochistnykh sooruzhenij mashinostroitel'nyh i priborostroitel'nyh predpriyatij Respubliki Belarus* [Elemental and phase composition of galvanic sludge, sediments of sewage treatment plants of machine-building and instrument-making enterprises of the Republic of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2013, no. 1, pp. 113–118 (in Russian)
8. Freddy R., Guimarães A., Vivoni A., Schroder R. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 266, part B, pp. 57–65.
9. Kim J., Cho M., Jung M., Kim J., Yoon Y. Rotary hearth furnace for steel solid waste recycling: Mathematical modeling and surrogate-based optimization using industrial-scale yearly operational data. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 464, pp. 125–133.
10. Abdrakhimov V. Z. *Ispol'zovanie metallurgicheskix kal'cij-, alyuminij- i zhelezosoderzhashchix shlakov v proizvodstve zharostojkix betonov na osnove ortofosfornoj kisloty* [Use of metallurgical calcium-, aluminum- and iron-containing slags in the production of heat-resistant concrete on the basis of orthophosphoric acid]. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 82–95. (in Russian)
11. Yusuf Er, Mucahit Sutcu, Osman Gencel, Ermedin Totiç, Ertugrul Erdogmus, Vedat Veli Cay, Muhammad Junaid Munir, Syed Minhaj Saleem Kazmi. Recycling of metallurgical wastes in ceramics: A sustainable approach. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 349, pp. 45–52.
12. Runfeng Li, Yang Zhou, Cuiwei Li, Shibo Li, Zhenying Huang. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 213, pp. 43–50.
13. Yan Xia, Daquan Shi, Ruolin Zhao, Kunyang Yu, Minghao Liu, Hengjun Mei, Lei Xu, Yading Zhao, Lei Wang. Iron-rich industrial waste enhanced low-carbon radiation shielding functional composites. *Journal of Cleaner production*. 2024, vol. 449, pp. 97–104.
14. Rovin S. L., Rovin L. E. *Konstruktivny'e osobennosti rotacionny'x pechej* [Design features of rotary furnaces]. *Lit'e i metallurgiya = Casting and Metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 49–59. (in Russian)
15. Thomas Ottink, Nathalia Viecei, Mark R. St J. Foreman, Martina Petranikova. Novel approach to recycling of steel swarf using hydrometallurgy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, vol. 185, pp. 235–241.
16. Lin Wang, Yongbin Yang, Yang Ou, Peiyao Tang, Chen Liu, Qiang Zhong, Yan Zhang, Lingyun Yi, Qian Li, Zhucheng Huang, Tao Jiang. Synergistic conversion of iron ore sintering dust and waste biochar to produce direct reduction iron and syngas: Gasification, reduction behavior and thermodynamic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2024, vol. 434, pp. 27–31.
17. Xixiang Liu, Hengyi Wang, Chenxu Wang, Liyang Zhao, Honghui Pan, Yan Liu, Liying Liang, Chuanqi Zhao, Shiyong Huang. Self-endowed magnetic photocatalysts derived from iron-rich sludge and its recycling in photocatalytic process for tetracycline degradation. *Bioresource Technology*, 2024, vol. 395, pp. 146–151.
18. Wenru Liu, Tianhao, Jianfang Wang, Yaoliang Shen, Xiaoming Ji, Dianhai. A new concept of waste iron recycling for the enhancement of the anammox process. *Chemosphere*, 2022, vol. 307, part 4, pp. 78–86.
19. Yang Jiang, Changhong Peng, Kangeng Zhou, Zheng Hu, Guopeng Zhang, Yehuizi Wu, Jinzhong Zhang, Wei Chen. Extraction of iron from waste titanium whitewash to produce LiFePO<sub>4</sub> batteries. *Clean Production*, 2023, vol. 415, pp. 137–145.
20. Kazimirskaya E. N., Likhacheva A. V. *Zhelezosoderzhashchie othody kak vtorichnyj material'nyj resurs* [Iron-containing waste as a secondary material resource]. *Importozameshchenie, nauchno-tekhnicheskaya i ekonomicheskaya bezopasnost. Sbornik statej V Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Minskije nauchnye chteniya – 2022»* [Proc. of the V Int. sci. and tech. conf. "Minsk scientific readings – 2022"]. Minsk, 2022, vol. 1. pp. 157–16. (in Russian)
21. Mohammad Saood Manzar, Muntathir Alshabib, Umair Alam, Muhammad Nawaz, Mukarram Zubair, Anamália Ferreira Silva, Nuhu Dalhat Mu'azu, Lucas Meili, Emre Çevik, Hissah A. Alqahtani. Comparative adsorption of Eriochrome black T onto recyclable steel dust wastes: Isotherm, kinetics and thermodynamic studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, vol. 645, pp. 59–65.
22. Lingjun Ma, Lina Han, Shuai Chen, Jiangliang Hu, Liping Chang, Weiren Bao, Jianchen Wang. Rapid synthesis of magnetic zeolite materials from fly ash and iron-containing wastes using supercritical water for elemental mercury removal from flue gas. *Fuel Processing Technology*. 2019. vol. 189. pp. 39–48.

23. Ping Li, Xinran Li, Fengjun Li. A novel recycling and reuse method of iron scraps from machining process. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 266, pp. 79–85.
24. Sokolov L. I., Sokolov K. L. *Poluchenie zhelezosoderzhashhego koagulyanta iz otkodov shlifoval'nogo proizvodstva* [Preparation of iron-containing coagulant from grinding wastes]. *Sistemny'e tekhnologii = System Technologies*, 2023, vol. 4, no. 49, pp. 154–160. (in Russian)
25. Shamatov S. A., Rakhmanov I. U. *Poluchenie sul'fata natriya i zhelezooksidnogo pigmenta na osnove zheleznogo kuporosa* [Preparation of sodium sulfate and iron-oxide pigment on the basis of iron sulfate]. *Scientific journal Impact Factor*, 2021, vol. 1, no. 4, pp. 1478–1482. (in Russian)
26. Ruzavin A. A. *Sintez krasnogo zhelezooksidnogo pigmenta na osnove konverternogo staleplavil'nogo shlaka dlya stroitel'noj industrii* [Synthesis of red iron oxide pigment on the basis of converter steelmaking slag for the construction industry]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 19–27. (in Russian)
27. Wegman E. F., Zharebin B. N., Pokhvisnev A. N., e.a. *Metallurgiya chuguna* [Iron metallurgy]. Moscow, 2004, 774 p. (in Russian)
28. *Klassifikatsiya zhelezny'x rud* [Classification of iron ores]. Available at: <https://rosmining.ru/wp-content/uploads/2022/05/zheleznyh-rud-.pdf?ysclid=m9jr9njtom735205766> (accessed 16 April 2025). (in Russian)
29. Urbanovich N. I., Korneev S. V. *Analiz sostava i tekhnologii pererabotki dispersny'x zhelezosoderzhashhix otkodov* [Analysis of composition and processing technology of dispersed iron-containing waste]. *Lit'e i metallurgiya = Casting and Metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 66–69. (in Russian)
30. Fedoseev V. B., Zorin A. D., Fedoseeva E. N., Zanozina V. F., Zhebryakov E. V. *Pererabotka zhelezosoderzhashhix py'levidny'x otkodov metallurgicheskogo proizvodstva v pigment dlya okraski stroitel'ny'x materialov* [Processing of iron-containing dusty wastes of metallurgical production into pigment for coloring of building materials]. *Butlerovskie soobshheniya = Butler Communications*, 2013, vol. 42, no. 9, pp. 94–102. (in Russian)
31. Rovin S. L., Rovin L. E. *Klassifikatsiya i svoystva dispersny'x metallotkodov* [Classification and properties of dispersed metal waste]. *Lit'e i metallurgiya = Casting and Metallurgy*, 2015, vol. 79, no. 2, pp. 5–13. (in Russian)

#### Информация об авторах

Казимирская Екатерина Николаевна – аспирант кафедры промышленной экологии, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь). E-mail: kazimirskaaekaterina@gmail.com

Лихачева Анна Владимировна – кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленной экологии, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь). E-mail: alikhachova@mail.ru

#### Information about the authors

Ekaterina N. Kazimirskaya – Postgraduate student, Department of Industrial Ecology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus). E-mail: kazimirskaaekaterina@gmail.com

Anna V. Likhacheva – Ph. D. (Technics), Head of the Department of Industrial Ecology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus). E-mail: alikhachova@mail.ru