

На правах рукописи



ГОРЛОВА ОЛЬГА ЕВГЕНЬЕВНА

**РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ
ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ**

Специальность

25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Магнитогорск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный консультант	профессор, доктор технических наук Шадрунова Ирина Владимировна
Официальные оппоненты:	профессор, доктор технических наук Зелинская Елена Валентиновна , профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский университет», г. Иркутск профессор, доктор технических наук Морозов Валерий Валентинович , профессор кафедры общей и неорганической химии НИТУ «МИСиС», г. Москва доцент, доктор технических наук Шумилова Лидия Владимировна , профессор кафедры водного хозяйства, экологической и промышленной безопасности ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», г. Чита
Ведущая организация	ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского», г. Москва

Защита диссертации состоится «02» июля 2020 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.111.02 при ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Корнилов
Сергей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для существующего технологического уклада российской экономики характерны высокая материалоемкость и трудоемкость, экспортно-сырьевая направленность, большое удельное количество отходов (71,2 т отходов на 1 млн руб. ВВП в 2017 г.). Производственная деятельность в отраслях, связанных с добычей и переработкой минеральных ресурсов, формирует основной объем отходов производства – от 89 до 94% от общего объема образования. Объем утилизации и обезвреживания отходов добычи полезных ископаемых составляет около половины общего их образования, в основном за счет утилизируемых вскрышных и вмещающих пород IV и V классов опасности, следствием чего является накопление на поверхности земли по разным оценкам от 30 до 80 млрд т твердых горнопромышленных отходов. Отходы, образующиеся в процессе деятельности горнодобывающих и перерабатывающих производств, являются результатом нерационального использования минеральных ресурсов и одновременно деструктивно трансформируют естественную природную среду. В то же время по своей ресурсной ценности эти отходы являются перспективным, складированным и постоянно пополняемым сырьем техногенного происхождения и должны рассматриваться как составная часть минерально-сырьевой базы страны по черным, цветным, редким, благородным, редкоземельным металлам. Необходимость воссоздания естественных циклов природного ресурсного равновесия требует включения многоотнажных горнопромышленных отходов в рентабельную, ресурсосберегающую, экологически ориентированную переработку.

Несмотря на то, что сегодня уже разработаны отдельные теоретические положения и получены практические результаты в сфере разработки технологий переработки техногенного минерального сырья, можно констатировать необходимость дальнейшего развития научно-методологических основ создания технологий комплексной и глубокой переработки с формированием системного подхода к выбору технологических решений, приемов и методов, адаптированных к специфике технологических свойств отходов добычи и переработки минерального сырья, что предопределило актуальность выполнения данной работы.

Имеющаяся практика переработки горнопромышленных отходов свидетельствует о невысоких в целом показателях разделения в существующих схемах передела минерального сырья с использованием традиционных разделительных процессов и известных технологических решений, что снижает инвестиционную привлекательность технологий и заинтересованность в их развитии недропользователей. Это объясняется недоучетом тех специфических технологических свойств и особенностей состава труднообогатимых минеральных комплексов техногенного происхождения, которые сформировались под влиянием большого количества факторов в технологических процессах первичной переработки минерального сырья и при долговременном хранении отходов. Наиболее обоснованным представляется построение технологических схем переработки горнопромышленных отходов на основе комбинирования нескольких механических или механических и химико-металлургических методов разделения минералов в соответствии с их наиболее контрастными разделительными признаками. Определение системы методов исследования вторичного сырья в целях его эффективно-го использования и рекультивации территорий размещения отходов позволит не

только устойчиво решать экологические проблемы при одновременном расширении минерально-сырьевой базы действующих перерабатывающих производств, но и даст возможность избежать появления новых экологически неблагоприятных тенденций ухудшения состояния среды обитания человечества и процессов нарастания дефицита минерального сырья.

Цель работы – развитие научно-методологических основ создания ресурсосберегающих, экологически ориентированных технологий переработки горно-промышленных отходов для повышения полноты и комплексности использования запасов техногенного минерального сырья.

Идея работы: при разработке и обосновании параметров технологических схем комплексной переработки горнопромышленных отходов, их специфические минеральный состав и технологические свойства, формирующиеся под влиянием природных и техногенных факторов, выступают критериями выбора способа селективной дезинтеграции и комбинации процессов извлечения ценных компонентов.

Задачи исследований:

- анализ и обобщение опыта, определение перспектив развития технологических процессов переработки горнопромышленных отходов;
- оценка факторов, влияющих на формирование вещественного состава и технологические свойства горнопромышленных отходов, определяющих структуризацию отходов по степени измененности их вещественного состава и контрастности технологических свойств для прогнозной оценки обогатимости и априорного выбора методов переработки;
- изучение вещественного состава и технологических свойств отходов добычи и переработки минерального сырья, определяющих их обогатимость, выбор методов разделения и построение технологической схемы переработки;
- разработка на основе междисциплинарных методологических принципов и подходов универсальной модели исследования, применение которой определяет теоретические основания создания ресурсосберегающих, экологически ориентированных технологий переработки горнопромышленных отходов;
- разработка и обоснование параметров ресурсосберегающих экологически ориентированных комбинированных технологий комплексной и глубокой переработки техногенного минерального сырья;
- выявление закономерностей формирования фазового состава, структуры, физико-механических свойств техногенного сырья и характера раскрытия техногенных фаз в процессах разрушения; обоснование способа селективной дезинтеграции структурно неоднородного техногенного сырья и принципов построения схем рудоподготовки;
- разработка технологических рекомендаций по вовлечению в рентабельную эксплуатацию горнопромышленных отходов и оценка их экономической эффективности.

В качестве **объектов экспериментальных исследований** использованы железо-, медь-, золотосодержащие отходы, образовавшееся в различных технологических процессах добычи и переработки руд: забалансовые руды из отвала, лежалые хвосты обогатительной фабрики, доменные шламы, шлаки металлургии.

Методологические основания и методы исследования. Научный уровень методологии исследования характеризуется как аналитико-синтетический в об-

щей логике использования методов анализа, аналогии, моделирования, натуральных испытаний, синтеза и формализации. Ведущим методом выбран метод декомпозиции как единство анализа и синтеза, в рамках которого проведены анализ и систематизация материалов по теории и практике комплексного использования минерального сырья и переработки техногенных ресурсов; прослежено изменение функциональных элементов имеющихся технологий; выявлены резервы существующих технологий и спрогнозированы потенциалы вновь создаваемых. Минералогические критерии обогатимости объектов исследования выявлены на основе количественной оценки их вещественного состава и технологических свойств комплексом современных минерало-аналитических методов: химического анализа, атомно-эмиссионного спектрального анализа на спектрометре ISPOES Agilent 725, рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 фирмы Jeol Ltd., рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре D2 PHASER BRUKER с линейным детектором LynxEye, растровой электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM –6460 LV, оптико-микроскопического анализа на анализаторе Минерал-С7 с управляющей программой SIAMS Photolab, определения микротвердости на микротвердомере Buehler Micromet 5103 Buehler, а также технологического тестирования путем магнитной сепарации, гравитации, флотации, выщелачивания, сорбции с применением аттестованных методик. Математическая обработка результатов и их технико-экономическая оценка выполнялись с применением программ Matlab, Microsoft Excel, STATISTICA.

Основные защищаемые положения:

1. Методология создания ресурсосберегающих технологий комплексной переработки горнопромышленных отходов, основанная на последовательном осуществлении комплекса аналитических, экспериментальных, технологических изысканий на нескольких соподчиненных уровнях в итерационном порядке выполнения и анализа условий реализуемости при сопоставлении с вводимыми оценочными критериями, должна включать уровень адаптации традиционных технологий, известных технологических решений к выявленным особенностям вещественного состава и технологических свойств отходов. Этим достигается оптимизация параметров процессов, обосновывается рациональная комбинация методов и последовательность процессов извлечения ценных компонентов для повышения технологической, экономической эффективности и экологической безопасности переработки труднообогатимого сырья техногенного происхождения.

2. Множественность факторов формирования горнопромышленных отходов, характер и степень первичного техногенного и последующего гипергенного воздействий предопределяют их сложный минеральный состав, неоднородные структурно-фазовые характеристики, трудную обогатимость и необходимость построения технологических схем глубокой и комплексной переработки с использованием селективной дезинтеграции в рудоподготовке и комбинирования нескольких обогатительных или обогатительных и химико-металлургических процессов, адаптированных к специфическим технологическим свойствам отходов.

3. Соотношение сульфидных и окисленных минералов меди, близкое к единице в забалансовой медной руде с массовой долей меди около 1%, и присут-

ствие в составе породообразующих минералов значительного количества карбонатов (свыше 30%) определяют комбинирование и нетрадиционную последовательность процессов сульфатно-аммонийного выщелачивания оксидов в процессе измельчения руды с комплексобразующим реагентом аммонием серноокислым и флотации сульфидов. Применение флотационно-гидрометаллургической технологии обеспечит получение флотационного концентрата с массовой долей меди свыше 29% при извлечении меди не менее 47% и катодной меди (99,99%) при сорбционно-электролитической переработке продуктивного раствора выщелачивания при извлечении меди свыше 38%.

4. Формирование в теле хвостохранилища золотоизвлекательной фабрики геолого-минералогических зон, отличающихся крупностью, морфологией золота, составом вмещающих пород, обводненностью и фильтрационными свойствами, определяет комбинирование двух методов доизвлечения золота: гравитационного обогащения песков осушенной пляжной зоны с преимущественным нахождением золота в классе $-0,5+0,125$ мм на центробежных концентраторах с модернизированной конструкцией чаши при извлечении золота не менее 65% и скважинного хлоридного выщелачивания в центральной обводненной части хвостохранилища с неравномерным распределением золота по глубине и по простиранию при извлечении золота на уровне 75%.

5. Комбинированная флотационно-магнитная технология переработки железозинксодержащих шламов, образующихся в высокотемпературных процессах доменного производства и существенно отличающихся от исходных железорудных материалов минеральными формами выделения железо- и цинксодержащих компонентов, высокой степенью дисперсности и агрегатным состоянием, обеспечит получение обесцинкованного железного концентрата с массовой долей железа свыше 60% и массовой долей цинка менее 0,5% и цинксодержащего промпродукта с массовой долей цинка 7-8%, востребованных в смежных отраслях черной и цветной металлургии.

6. Построение технологических схем переработки образованных в высокотемпературных процессах шлаков черной металлургии, имеющих сложную структуру, индивидуализированную форму выделения рудных и металлических фаз в шлаковообразующей матрице, существенные различия прочностных характеристик отдельных шлаковых фаз и межзеренных границ, должно основываться на рациональном сочетании технологических операций селективного вскрытия металлических включений и рудных фаз при применении центробежно-ударного способа разрушения и разделения на продукты с различным содержанием металлов в операциях грохочения и магнитной сепарации, что обеспечивает получение металлоконцентратов с массовой долей железа не менее 62%, а при необходимости – обезжелезненных тонкоизмельченных порошков.

Достоверность результатов и выводов обеспечивается надежностью и представительным объемом исходных данных, использованием комплекса современных средств и методик проведения исследований, сертифицированного оборудования и аттестованных методик выполнения измерений; подтверждается согласованностью данных эксперимента и научных выводов, сопоставимостью результатов лабораторных технологических исследований, укрупненных лабора-

торных и опытно-полупромышленных испытаний разработанных технологий, технико-экономических расчетов между собой и с практическими данными.

Научная новизна

1. В теоретической модели техногенного минерального сырья в рамках метода восхождения от абстрактного к конкретному предложена авторская дефиниция «минеральный отход», согласно которой минеральный отход рассматривается как многоэлементная структура и открытая система, обладающая внутренней нелинейностью. Поэтому разработка ресурсосберегающей технологии переработки отхода должна производиться на основе междисциплинарного анализа в научно-теоретическом аспекте, а в практическом – должна быть ориентирована на снятие технологических ограничений имеющихся производственных технологий.

2. Предложена научно-методологическая парадигма исследования минеральных отходов в рамках междисциплинарного синергетического подхода, базирующаяся на рассмотрении отходов как самостоятельных компонентов природной среды и на новом принципе научного подхода к разработке технологии их переработки: химическая целостность минерального отхода включает в себе совокупность природных свойств генетически связанного минерального сырья и приобретенных свойств отхода, которые выступают критериями выбора разделительных процессов.

3. Разработана классификация отходов черной и цветной металлургии по степени измененности вещественного состава и контрастности технологических свойств, позволяющая производить прогнозную оценку обогатимости, априорный выбор направлений использования отхода и методов переработки.

4. Научно обоснован принцип построения схем переработки горнопромышленных отходов, заключающийся в комплексном анализе системы имеющихся свойств отхода; выявлении главной связи или отношения свойств отхода; применении комбинации физических, физико-химических, химических процессов разделения, выбранных в соответствии с наиболее контрастными технологическими свойствами; параметрической и структурной адаптации известных технологических решений к выявленным особенностям свойств отхода.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, проведении теоретического анализа и разработке классификации техногенного сырья по степени измененности вещественного состава и контрастности технологических свойств, в обосновании авторской дефиниции «минеральный отход», теоретическом обосновании методологических принципов конструирования технологических схем комплексной и глубокой переработки горнопромышленных отходов и их практической реализации в виде разработанных и апробированных технологий переработки забалансовых руд из отвала, хвостов обогащения, шламов и шлаков черной металлургии, в организации и непосредственном участии в экспериментальных исследованиях и опытно-промышленных испытаниях, анализе и обобщении полученных результатов, обосновании выводов, подготовке публикаций.

Практическая значимость результатов исследования состоит в апробации разработанной методологии путем формирования технологий переработки горнопромышленных отходов и обосновании их параметров: комбинированной флотационно-гидрометаллургической для переработки забалансовых медных руд из

отвала; гравитационной и геотехнологической для извлечения золота из лежалых хвостов золотоизвлекательной фабрики при комбинировании технологий по типам геолого-минералогических зон в хвостохранилище; комбинированной флотационно-магнитной для переработки железозинксодержащих шламов доменного производства; в разработке технологий переработки ванадийсодержащих концентратных шлаков и дообогащения некондиционных продуктов первичной переработки отвальных доменных и маргеновских шлаков с использованием интергранулярного центробежно-ударного способа разрушения; рекомендаций по построению технологических линий переработки техногенного сырья.

Реализация результатов исследования. Результаты полупромышленных испытаний комбинированной флотационно-гидрометаллургической технологии переработки забалансовых руд из отвала месторождения Тасгора использованы в технологическом регламенте на проектирование опытно-промышленного завода по переработке смешанных медных руд. Разработанные схемы глубокой переработки некондиционных металлоконцентратов приняты в проект реконструкции технологической линии переработки доменных шлаков в ООО «ЮГПК». Разработаны и утверждены Научным советом по минералогическим исследованиям методические рекомендации «Виды и последовательность минералогических работ при технологических испытаниях техногенного сырья (текущие хвосты обогащения колчеданных руд)» (методические рекомендации №183).

Научные положения и практические решения диссертации используются в научно-методическом обеспечении учебного процесса по специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Обогащение полезных ископаемых».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных научных конференциях, в том числе: на ежегодных научно-технических конференциях МГТУ им. Г.И. Носова (Магнитогорск, 2000 – 2019 гг.); на международных совещаниях «Плаксинское чтения» (2006 - 2019 гг.); Конгрессах обогатителей стран СНГ (Москва, МИСиС, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2019 гг.); научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГТУ, 2012-2017 гг.); международном конгрессе по обогащению полезных ископаемых XXIX IMPC 2018, научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (Екатеринбург, 2007, 2008, 2011, 2019 гг.); конгрессах «Техноген-2012», «Техноген-2014» (Екатеринбург); международной научно-технической конференции «Технологическая платформа «Твердые полезные ископаемые»: технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений» (Екатеринбург, 2017 г.); международной научно-практической конференции «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов» (Алматы, 2018); X международной научно-технической конференции «Комбинированная геотехнология» (Магнитогорск, 2019); научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век» (Челябинск, 2019 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 74 научных работах, из них: 21 статья в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК РФ, 5 – в изданиях, рецензируемых в базе данных Scopus, 42 – в прочих изданиях, 5 монографий, 1 методические рекомендации.

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, изложена на 375 страницах машинописного текста, содержит 75 таблиц, 78 рисунков, библиографический список из 387 наименований и 10 приложений.

В диссертации использованы результаты, полученные автором при выполнении в качестве ответственного исполнителя и руководителя научно-исследовательских работ по грантам РНП 2.1.2.6594, РФФИ 10-05-00108а, ФЦП 14.В37.21.1910, РФФИ 13-05-00008-А, РФФИ 16-05-00818, государственных заданий Минобрнауки РФ ГЗ 2014/80 и ГЗ 5.8708.2017/БЧ и хозяйственной работы с ПАО «ММК».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современного состояния образования, накопления, ресурсного потенциала отходов добычи и переработки минерального сырья, теоретических оснований, практики и технологических перспектив комплексного использования техногенного минерального сырья на предприятиях горно-металлургического комплекса России. Показано, что текущее состояние с образованием горнопромышленных отходов, их утилизацией, накоплением, вводом в действие установок по переработке отходов является неудовлетворительным. Несмотря на наличие некоторой уже сложившейся практики переработки отдельных видов горнопромышленных отходов, в целом комплексная система обращения с техногенными минеральными ресурсами в российской практике пока отсутствует, не выработаны единые подходы, механизмы и стандарты в данной области. Примеры реализованных проектов переработки отходов в промышленных масштабах носят единичный характер, широкой практики переработки отходов с целью доизвлечения содержащихся в них ценных металлов и минералов нет, подавляющее количество отходов исключено из вторичного хозяйственного оборота, не является предметом товарно-денежных отношений и поступает на размещение в окружающей среде.

Вопросам теоретического обоснования комплексного использования минерального сырья, необходимости освоения ресурсов техногенного происхождения как обязательного элемента рационального природо- и недропользования, разработки принципиально новых технологий переработки горнопромышленных отходов с глубоким и комплексным извлечением ценных компонентов и другим аспектам этой сложной, многоплановой проблемы посвящены труды многих отечественных ученых. Развитие идей комплексного освоения недр Земли и безотходных технологий переработки минерального сырья нашло отражение в трудах акад. М.И. Агошкова, А.Е. Ферсмана, Н.В. Мельникова, К.Н. Трубецкого, В.А. Чантурия, Н.Н. Семенова, И.В. Петрянов-Соколова, чл.-корр. Б.Н. Ласкорина, Д.Р. Каплунова, Л.А. Барского, В.З. Персица, Н.Н. Чаплыгина, М.В. Рыльниковой; классификация, научно-методический подход к геолого-технологическому изучению и оценке техногенных месторождений разрабатывались акад. М.И. Агошковым, Н.В. Мельниковым, К.Н.Трубецким, В.Н. Уманцом, М.Б. Никитиным, Г.В. Секисовым, А.А. Таскаевым и других; условия формирования и размещения, технологии и методы исследования техногенных месторождений рассмотрены в трудах В.А. Наумова, В.А. Макарова, А.Б. Макарова, А.Г. Талалай, Б.Б. Зобнина, С.И. Мормиль, И.И. Ковлекова и других. Вопросам оценки воздей-

ствий техногенных минеральных образований на окружающую среду посвящены труды А.П. Виноградова, В.И. Вернадского, А.И. Перельмана, Э.Ф. Емлина, А.В. Хохрякова, М.А. Сапрыкина, В.С. Самарина, А.Я. Гаева, Ю.М. Нестеренко, В.Я. Захарова, А.П. Бутолина и других; методические подходы к эколого-экономической оценке использования отходов разрабатывались Ф.Д. Ларичкиным, Д.Р. Каплуновым, А.И. Семячковым, В.В. Большенко и другими. Комплексный подход по связи критериев технологической минералогии с технологическими свойствами минералов и руд развивается в работах В.В. Щипцова, Б.И. Пирогова, А.А. Рогожина, Е.Г. Ожогойной, О.Б. Котовой, Е.Н. Левченко и других ведущих ученых КНЦ РАН, ВИМС, ИМГРЭ, ЦНИГРИ, ИГ Коми НЦ УрО РАН, Уралмеханобра. Созданию новых ресурсосберегающих технологий переработки горнопромышленных отходов посвящены труды известных отечественных ученых И.Н. Плаксина, О.С. Богданова, В.А. Чантурия, С.Б. Леонова, В.П. Неберы, В.А. Бочарова, В.В. Кармазина, Г.В. Седельниковой, П.М. Соложенкина, А.Н. Зеликмана, С.И. Полькина, Э.В. Адамова, В.Я. Мостовича, И.В. Шадруновой, Е.В. Зелинкой, В.П. Мязина, Ю.П. Морозова, Л.В. Шумиловой, Н.Л. Медяник, Н.Н. Реховой, М.И. Фазлуллина, Б.Д. Халезова, А.И. Едильбаева и многих других.

Анализ основных направлений развития технологических процессов переработки горнопромышленных отходов показал, что разрабатываются новые и совершенствуются ранее известные процессы разделения отдельных видов отходов в зависимости от их ресурсной ценности и приоритетного направления использования. Вместе с тем отсутствует единый системный подход к техногенным минеральным ресурсам как к объектам обогащения на основе разделительных признаков, нет четких инструментариев выбора приемов, методов разделения и алгоритма построения технологических схем переработки. В рамках концепции рационального недропользования и необходимости дальнейшего эволюционирования системного методологического подхода к комплексному освоению минерального сырья техногенного происхождения актуальной задачей является развитие научно-методологических основ формирования ресурсосберегающих, экологически ориентированных технологий переработки горнопромышленных отходов.

Анализ опыта обращения с горнопромышленными отходами и степени изученности проблемы создания ресурсосберегающих технологий их переработки позволил обосновать выбор направления исследования, поставить цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе дано развитие научно-методологических основ создания ресурсосберегающей экологически ориентированной технологии переработки минерального отхода с определением универсальной системы методов исследования и выработкой общего алгоритма формирования технологических схем переработки; рассмотрены особенности вещественного состава и технологических свойств горнопромышленных отходов как критерии выбора разделительных процессов их глубокой и комплексной переработки; систематизированы факторы, формирующие вещественный состав и технологические свойства отходов, и разработана классификация отходов по степени изменения вещественного состава и контрастности технологических свойств.

Специфика новой методологической парадигмы формирования ресурсосберегающих экологически ориентированных технологий переработки горнопромышленных отходов базируется на рассмотрении их как самостоятельных компонентов природной среды и строится на междисциплинарном синергетическом научном подходе к разработке технологии переработки минерального сырья: в характеристиках сырья должны быть учтены не только эксплуатируемые технологические свойства, но и изначальная химическая целостность наличного материала. Отходы в логике взаимодействия природной и социально-экономической подсистем следует позиционировать не как побочные, бесполезные, нежелательные остатки сырья, порождаемые производством, не как разрушительные и одновременно косные агенты социальной среды, провоцирующие исключительно деградацию качества среды, а как природный элемент, свойства которого есть результат опредмеченного труда. В этом аспекте отходы добычи и переработки минерального сырья, то есть минеральные отходы, есть одновременно и результат переработки природного ресурса с различной степенью трансформации природных свойств минеральных образований вследствие их вовлечения в производственные технологии, и вновь образованное минеральное исходное сырье для следующего цикла производства. При этом отходы, оставаясь неотъемлемой частью социализированной среды, способны трансформировать собственную структуру элементов, что в свою очередь качественно меняет их химический состав и свойства, а подвижность этих свойств способна порождать новые физические закономерности в среде.

Свойство отходов быть «вторичным» сырьем фиксирует не просто последовательность фаз предшествующего производства, а указывает на возможность качественно иного соединения свойств веществ первично обработанного материала. Поэтому, если традиционные технологии переработки минерального сырья строятся на эксплуатации конкретных технологических свойств исходного материала, при игнорировании неиспользуемых в данной технологии иных свойств, то инновационная составляющая экологически ориентированных технологий переработки отходов с неизбежностью разворачивает их в аспект целостности свойств генетически связанного природного минерального сырья и приобретенных свойств отхода. Выделение и эксплуатация отдельных свойств отхода должны быть построены на комплексном анализе системы всех имеющихся свойств. Таким образом, технология переработки отхода для достижения эффективной трансформации имеющихся свойств в желаемый конечный продукт нового цикла производства в научном анализе методологически характеризуется как диалектическое единство закономерностей общего и единичного, а в практическом аспекте – ориентирована на восстановление целостности природной среды. На основании этого в данном диссертационном исследовании предложена новая дефиниция «минеральный отход».

Минеральный отход – это совокупность характеристик качества минерального сырья, которые закрепляют собой конкретные свойства сырья, изначально принципиально не планируемые к использованию в данных технологиях, но являющиеся потенциальным полноценным сырьем в иных способах производства при снятии технологических ограничений.

Введение данной дефиниции в научный анализ позволяет в качестве начальных теоретических принципов предлагаемой инновационной научно-методологической парадигмы определить два основных положения. Минеральный отход, будучи исходным природным ресурсом, образованным путем вовлечения в производственные технологии имеющихся циклов производства, есть полноценное минеральное сырье, свойства которого могут принципиально отличаться от свойств аналогичного природного сырья, не прошедшего стадии производства. Разрабатываемые ресурсосберегающие технологии переработки минеральных отходов есть средство снятия технологических ограничений имеющихся производственных технологий.

На основании анализа условий образования самих минеральных отходов и техногенных минеральных образований как локальных скоплений отходов, была проведена систематизация факторов формирования вещественного состава и технологических свойств отходов в механических, химических и пирометаллургических процессах преобразования минерального вещества при получении отхода и характера изменений состава и свойств в физических и химических процессах при их складировании и долговременном хранении. Множественность условий формирования техногенных продуктов приводит к тому, что минеральные отходы наследуют как особенности генетически связанных природных промышленных типов руд, продуктами переработки которых они являются, и эти свойства предопределены главным образом геологическими и минералогическими факторами, так и приобретают новые свойства под влиянием первичного техногенного и последующего гипергенного воздействий. Это позволяет говорить о существенном отличии технологических свойств отходов по сравнению с рудами в коренном залегании и о значительном отличии вещественного состава и свойств отходов различных технологических процессов их образования и различного временного срока их существования между собой. К наиболее характерным особенностям вещественного состава и технологических свойств техногенного металлосодержащего сырья были отнесены: низкое содержание ценных компонентов (металлов), поликомпонентный и полиминеральный состав; наличие комплексных полиминеральных сростков, для раскрытия которых требуется очень тонкое измельчение; сложные структурно-фазовые характеристики, которые обусловлены совместным присутствием минеральных агрегатов и минералов разных размеров и форм; тонкое, тесное прораствание рудных минералов между собой и с породообразующими минералами; изменения минерального состава отходов как в процессе их образования (шлаки), так и в процессе хранения (лежалые хвосты); структурные преобразования (гипергенные) поверхности зерен рудных минералов, образование более сложных вторичных структур, агрегатов полиминерального состава в лежалых хвостах железорудных и флотационных фабрик; уплощенная форма у части золотин, присутствие частиц золота в сростках с нерудными минералами и пиритом, в виде тончайших включений размером до нескольких микрон в пирите, наличие на поверхности золотин «рубашек» из гидроксидов железа в лежалых хвостах флотационных и золотоизвлекающих фабрик; уменьшение контрастности электрических, магнитных, флотационных (поверхностной активности) свойств, растворимости рудообразующих

минералов в лежалых хвостах вследствие как переизмельчения, так и неполного раскрытия минеральных сростков, наличия большого количества шламов, флото-реагентов и т.п. Это определяет отходы как сложные минеральные системы техногенного происхождения и трудные объекты для обогащения на основе разделительных признаков.

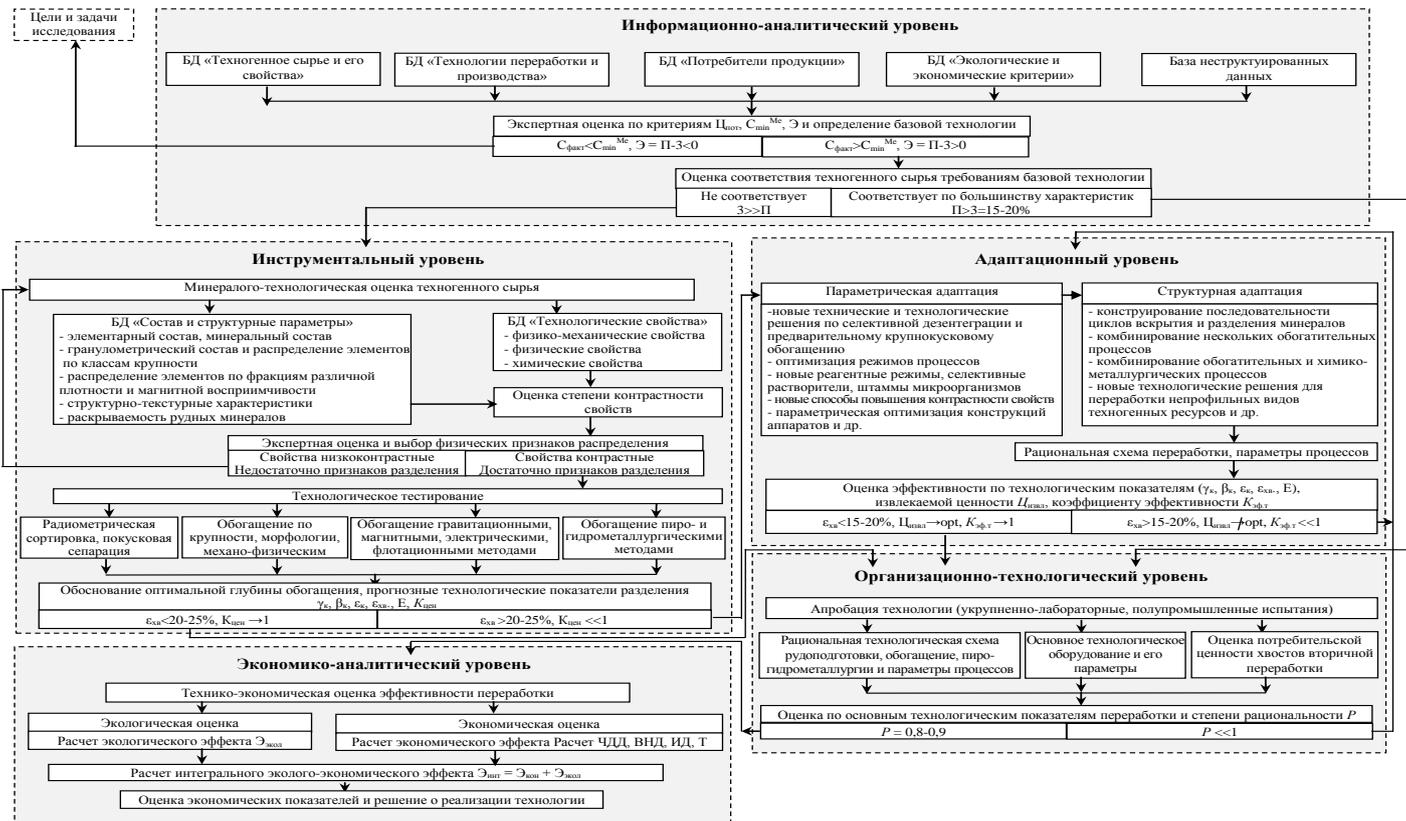
Составлена классификация основных видов отходов черной и цветной металлургии по степени изменения вещественного состава и контрастности технологических свойств (таблица 1), позволяющая проводить прогнозную оценку их качества и обогатимости, априорный выбор методов переработки и направлений использования. По совокупности качественных характеристик большинство отходов являются труднообогатимыми, и переработка их по традиционным технологиям, ориентированным на переработку более богатого сырья, с прогнозируемыми составом и свойствами, определяемыми геолого-минералогическими факторами, построенными в большинстве случаев как «моносхемы» по наиболее контрастному разделительному признаку, будет технологически малоэффективной и экономически нецелесообразной, поскольку природная контрастность технологических свойств в отходах значительно нивелируется. В то же время условия образования и хранения минеральных отходов, характер и степень преобразования минерального вещества в них в некоторых случаях формируют различия по какому-то иному признаку, свойству или набору свойств и тем самым создаются предпосылки для адаптации уже существующих разделительных процессов к этим выявленным особенностям вещественного состава и свойств минерального сырья техногенного происхождения.

Методологически ресурсосберегающие, экологически ориентированные технологии переработки крайне разнообразных по своим качественным и количественным характеристикам минеральных отходов должны иметь общий организованный алгоритм их формирования. Разработана методология создания технологии переработки минерального отхода, основанная на поэтапном осуществлении комплекса аналитических, экспериментальных, технологических изысканий на нескольких соподчиненных уровнях – информационно-аналитическом, инструментальном, адаптационном, организационно-технологическом, экономико-аналитическом – в итерационном порядке выполнения и анализа условий реализуемости. На каждом уровне при последовательном решении тактических подзадач производится проверка условий достижения искомого результата (предварительного, промежуточного или конечного) при сопоставлении полученных результатов с вводимыми оценочными критериями (технологическими, экономическими, интегральными). В результате принимается решение о возможности перехода на следующий уровень изысканий или о необходимости итерации для приближения результатов к значениям оценочных показателей (критериев). Также по результатам оценки могут быть скорректированы цель и задачи как предыдущих этапов работ, так и всего проекта в целом для снижения рисков на ранних этапах выполнения работ, оперативного управления процессом разработки технологии, большей прогнозируемости результатов. Блок-схема методологии приведена на рисунке 1.

Таблица 1 – Классификация техногенного минерального сырья по степени измененности вещественного состава и контрастности технологических свойств

Процессы, формирующие вещественный состав и свойства	Низкотемпературные									Высокотемпературные					
	Отрасли промышленности	Горнодобывающее производство		Обогатительное производство						Металлургическое производство					
				Черная металлургия		Цветная металлургия									
Технологические процессы, в которых формируются отходы	Добыча полезных ископаемых		Радиометрическая, сухая магнитная, обогащение в тяжелых средах		Кучное выщелачивание		Мокрая магнитная, гравитационные процессы		Флотация		Доменная, конвертерная плавка		Шахтная, отражательная, конвертерная плавка (медная подотрасль)		
Виды отходов	Вскрышные и вмещающие породы	Забалансовые и некондиционные руды		Хвосты		Кеки выщелачивания		Хвосты		Хвосты		Шлаки		Пыли, шламы	
Виды ТМСО* (хранилища)	Отвалы (насыпные)	Спецотвалы (насыпные)		Отвалы (насыпные)		Штабели КВ (насыпные)		Хвостохранилища (наливные)				Шлаковые отвалы (насыпные)		Шламохранилища (наливные)	
Время накопления	Текущие и лежалые	Текущие	Лежалые	Текущие и лежалые		Лежалые		Текущие	Лежалые	Текущие	Лежалые	Текущие и лежалые		Текущие и лежалые	
Степень измененности:															
минеральный (фазовый) состав	–	+	++	+	++	+	+	+	++	++	++	++	++	++	++
химический состав	–	–	+	+	++	+	+	+	++	++	++	++	++	++	++
гранулометрия	+	+	++	+	++	+	++	+	++	++	++	–	++	–	++
морфология	–	–	+	–	+	+	++	+	++	++	++	++	++	++	++
физико-механические свойства	+	–	+	–	+	–	–	–	–	++	+	++	++	+	
физические свойства	–	–	–	+	+	+	++	+	++	++	++	+	++	+	
состояние поверхности	–	–	+	–	++	–	+	+	++	+	–	–	+	–	
Контрастность свойств	нк	к	вк	нк	нк	нк	к	к	вк	вк	нк	вк	к		
Направления использования	Использование только в качестве стройматериалов	Извлечение полезных компонентов с использованием отходов в качестве стройматериалов		Использование только в качестве стройматериалов		Извлечение полезных компонентов с использованием отходов в качестве стройматериалов				Извлечение полезных компонентов с использованием отходов в качестве стройматериалов		Извлечение полезных компонентов			

*ТМСО – техногенное минерально-сырьевое образование; – практически неизменные; + слабо измененные; ++ существенно измененные; нк – неконтрастные и низкоконтрастные; к – контрастные; вк – высококонтрастные



15

Рисунок 1 – Блок-схема методологии создания ресурсосберегающей технологии переработки горнопромышленного отхода:

$C_{\text{пот}}$ - потенциальная ценность техногенного сырья, руб./т; $C_{\text{мин}}^{Me}$ - минимальное промышленное содержание полезного компонента, %; П - чистая годовая прибыль от реализации продукции из техногенного сырья, тыс. руб.; З - сумма капитальных и эксплуатационных затрат на производство и реализацию товарной продукции, тыс. руб.; γ_k - выход концентрата, %; β_k - массовая доля компонента в концентрате, %; $\epsilon_k, \epsilon_{\text{об}}$ - извлечение компонента в концентрат и в хвосты, %; E - эффективность обогащения, %; $K_{\text{цен}}$ - коэффициент полноты извлечения ценных компонентов по ценности, доли ед.; $C_{\text{извл}}$ - извлекаемая ценность техногенного ресурса, руб./т; $K_{\text{эф.т}}$ - критерий эффективности технологии, доли ед.; P_i - степень рациональности использования техногенного сырья, доли ед.; $\Xi_{\text{инт}}$ - суммарный эколого-экономический эффект, тыс. руб.; ЧДД - чистый дисконтированный доход, тыс. руб.; ВНД - внутренняя норма доходности, %; ИД - индекс доходности; Т - срок окупаемости, лет

Методология включает уровни адаптации существующих методов и способов разделения минералов к сформировавшемуся специфическому набору характеристик и свойств многокомпонентного, техногенно измененного сырья. В качестве инструментов первого уровня – параметрической адаптации – могут служить: обоснование способа селективной дезинтеграции, новые технические и технологические решения по предварительному крупнокусковому обогащению, новые реагентные режимы, селективные растворители, штаммы микроорганизмов, новые способы повышения контрастности технологических свойств, параметрическая оптимизация конструкций аппаратов и т.п. На следующем уровне – структурной адаптации – производится конструирование новой архитектуры технологического процесса переработки отхода, которая будет, как правило, характеризоваться сочетанием циклов селективного вскрытия и разделения минеральных комплексов в цикле рудоподготовки, комбинированием нескольких обогатительных, обогащенных и химико-металлургических процессов разделения и концентрирования минералов, разработкой новых технологических решений и способов извлечения ценных компонентов с одновременной их параметрической адаптацией. Таким образом, методология позволяет приближаться к искомому результату, то есть к генерации конкретной технологии получения желаемого продукта в процессе вовлечения отхода в новый цикл производства, и ее рациональным параметрам при наименьших материальных, организационно-технических, временных затратах.

В соответствии с методологией для минеральных отходов, подвергавшихся различным видам воздействий в технологических процессах добычи, обогащения, металлургической переработки и вторичных изменений при различном временном сроке их хранения, при этом ресурсно ценных по содержанию в них черных, цветных, благородных металлов и востребованных промышленностью, было проведено детальное изучение их вещественного состава, установлены минералогические критерии пригодности для комплексной переработки, выявлены закономерности разделения в физических, физико-химических, химических процессах и разработаны ресурсосберегающие, экологически ориентированные комбинированные технологии их переработки, результаты которых представлены в 3-6 главах диссертационного исследования.

В третьей главе проведено теоретическое обоснование и разработана комбинированная технология переработки забалансовых медных руд в отвале от переработки медного месторождения Таскора (Республика Казахстан).

Целесообразность промышленного освоения техногенного объекта продиктована запасами меди в нем около 20 тыс. т, благоприятными горнотехническими и инженерно-геологическими условиями при компактном залегании отвала на поверхности земли в районе с развитой инфраструктурой, высокой степенью его сохранности.

На инструментальном уровне при детальном изучении вещественного состава материала отвала было установлено, что главным минералогическим критерием является соотношение сульфидных и окисленных медных минералов в руде. При массовой доле меди 0,96%, медная минерализация представлена на 0,47% абс. медными минералами зоны вторичного сульфидного обогащения – халькозином, ковеллином, реже борнитом; в меньших количествах (0,06% абс.)

– медью сульфидной первичной, связанной с халькопиритом; в значительных количествах гипергенными минералами зоны окисления – на 0,35% абс. малахитом и азуритом, на 0,12% абс. оксидами и силикатами меди, что позволило классифицировать забалансовую руду из отвала как смешанную. Состав породобразующих минералов характеризовался крайне высоким содержанием кислоторастворимых карбонатов кальция и магния (суммарно 33%), гипса (17%).

При исследовании на обогатимость забалансовой руды установлено, что достигаемое при флотации извлечение меди в черновой концентрат 49-50% при $\beta_{Cu}=3,63-3,90\%$ соответствует извлечению только сульфидной части медной минерализации. В концентрате флотации ($\beta_{Cu}=3,9\%$ абс.) медь на 87,0% отн. представлена сульфидами и на 22,02% отн. окисленными минералами, тогда как в хвостах флотации ($\beta_{Cu}=0,55\%$ абс.) 77,98% отн. меди приходится на окисленные формы. Рациональными условиями проведения сульфидной флотации являются рН флотационной пульпы 8,5-9 ед., расход собирателя бутилового ксантогената калия 60 г/т, спиртового пенообразователя МИБК – 35 г/т. Режим совместной флотации сульфидных и предварительно сульфидизированных сернистым натрием (стадиальная подача 250+30+20 г/т) окисленных минералов меди ксантогенатом (70 г/т), дополнительным собирателем с гидроксаматной группой АМ-8 (20 г/т) и пенообразователем МИБК (10 г/т) не обеспечил приемлемых показателей извлечения меди. Извлечение меди в черновой концентрат возросло до 57,52% при $\beta_{Cu}=4,81\%$ против 48,93% по режиму без сульфидизации.

Поскольку азуритом и малахитом представлено 35% отн. меди, было проведено тестирование сернокислотного выщелачивания исходной забалансовой руды (-3 мм и 82% кл. -0,074 мм) и хвостов сульфидной флотации (85% кл. -0,074 мм) при варьировании концентрации кислоты $30\div 80$ г/дм³ и времени выщелачивания от 1 до 3 ч. Извлечение меди в раствор из руды не превышало 65%, из хвостов сульфидной флотации – 84-85% при высокой концентрации серной кислоты 70-80 г/дм³ и продолжительном времени выщелачивания 3 ч. Нейтрализующая способность руды и хвостов флотации была очень высокой 175÷205 кг/т, что обуславливает значительную материалоемкость, агрессивность и экологическую небезопасность технологии сернокислотного выщелачивания.

На адаптационном уровне был проведен поиск селективного реагента для растворения окисленных минералов меди, при этом не взаимодействующего с породобразующими минералами, и нового способа выщелачивания смешанной руды из отвала. Было обосновано использование аммония сернокислого $(NH_4)_2SO_4$, способного к образованию с катионами меди (II) хорошо растворимых и очень стабильных тетраамминных комплексов $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ с высокой константой устойчивости $4,8 \cdot 10^{12}$. Результаты агитационного выщелачивания руды с реагентом (измельчение руды до 82% класса -0,074 мм, Ж:Т=3:1, 20°C) приведены на рисунке 2, а. Концентрация меди в продуктивном растворе составляла 0,8-0,87 г/дм³. По результатам фазового анализа в кеке выщелачивания ($\beta_{Cu}=0,58\%$ абс.) 90,34% отн. меди представлено сульфидами и только 9,66% отн. оксидами.

Новым технологическим решением по адаптации аммиачно-аммонийного способа выщелачивания стало совмещение измельчения руды с ее одновременным выщелачиванием при введении реагента аммония сернокислого в процесс рудоподготовки перед флотацией. Результаты измельчения руды с реагентом

($C_{(NH_4)_2SO_4} = 400 \text{ г/дм}^3$, Ж:Т=1:1) свидетельствуют, что в раствор с концентрацией меди 1,32-1,39 г/дм³ переходило 16-17% меди (рисунок 2, б).

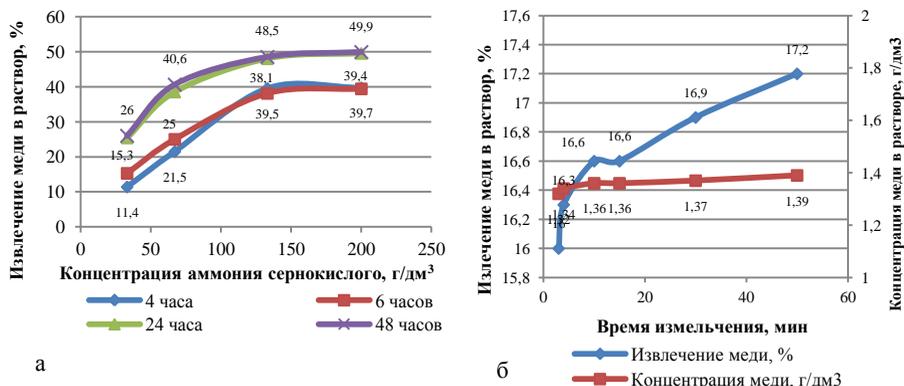


Рисунок 2 – Графики зависимости извлечения меди в раствор при аммонийно-сульфатном выщелачивании:

а – агитационном; б – в процессе измельчения руды

Теоретически обоснован механизм выщелачивания окисленных минералов меди (на примере карбонатов) при интенсифицирующих механическом и термическом воздействиях в процессе дезинтеграции руды и при обязательном избытке аммония серноокислого в жидкой фазе, который заключается в первоначальном растворении азурита серной кислотой, образующейся при гидролизе аммония серноокислого: $Cu(OH)_2 \cdot 2CuCO_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3CuSO_4 + 2CO_2 + 4H_2O$ ($\Delta G_{298}^0 = -367,51 \text{ кДж/моль}$). Далее карбонаты меди, в присутствии $CuSO_4$, взаимодействуют с избытком раствора аммиака, образовавшегося при гидролизе аммония серноокислого ($(NH_4)_2SO_4 + 2NH_3 \leftrightarrow 2NH_3 \cdot H_2O + H_2SO_4$), с последующей организацией в комплексные системы тетрааминов меди (II) с карбонатной, сульфатной и гидроксидной внешней оболочкой: $Cu(OH)_2 \cdot 2CuCO_3 + CuSO_4 + 16NH_3 \cdot H_2O \rightarrow 2[Cu(NH_3)_4]CO_3 \cdot 4H_2O + [Cu(NH_3)_4](OH)_2 \cdot 4H_2O + [Cu(NH_3)_4]SO_4 \cdot 4H_2O$ ($\Delta G_{298}^0 = -713,79 \text{ кДж/моль}$).

Расчет изобарно-изотермического потенциала взаимодействия основных минералов меди с аммонием серноокислым показал, что при взаимодействии малахита, азурита, хризоколлы с $(NH_4)_2SO_4$ термодинамически возможно образование водорастворимых тетрааквааммиакатов меди (II), а самопроизвольное выщелачивание ковеллина, халькозина, халькопирита термодинамически не возможно.

На организационно-технологическом уровне разработана и апробирована комбинированная флотационно-гидрометаллургическая технология переработки забалансовой медной руды из отвала и обоснованы ее параметры (рисунок 3, таблица 2). При опытно-промышленных испытаниях были получены высокие количественные показатели переработки: флотоконцентрат с $\beta_{Cu} = 29,6\%$ при извлечении меди 48,93% и продуктивный раствор с концентрацией меди 1,36 г/дм³, при переработке которого по схеме «сорбция-десорбция-электролиз» получена катодная медь (99,99%) при извлечении 38,91% от исходной руды.

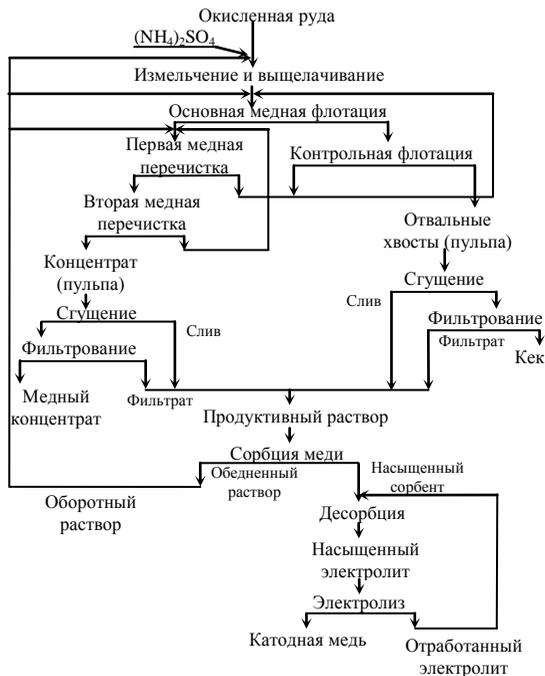


Рисунок 3 – Технологическая схема комбинированной флотационно-гидрометаллургической технологии

Таблица 2 – Основные режимные параметры технологии

Параметр	Значение
<i>Измельчение</i>	
Содержание кл. -0,074 мм, %	82-85
Концентрация $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, г/дм ³	133
<i>Флотация</i>	
Бутиловый ксантогенат (в основную + в контрольную флотацию), г/т	60+10
МИБК, г/т	30
рН	~8
<i>Сорбция</i>	
Концентрация меди в растворе, г/дм ³	0,92-1,36
Сорбент	Lewatit TP 209
Емкость по Cu^{2+} , г/дм ³	34,8
<i>Десорбция</i>	
Концентрация меди в элюенте, г/дм ³	30
<i>Электролиз</i>	
Концентрация меди в электролите, г/дм ³	50
Плотность тока, А/м ²	250
Напряжение на ванне, В	2

Проведенная адаптация гидрометаллургического способа переработки медных руд и обоснование рациональных параметров извлечения сульфидных и окисленных минералов меди разными методами обеспечили достаточно высокую полноту извлечения меди из отходов добычи медных руд в целевые продукты по комбинированной технологии и экономическую целесообразность проекта переработки отвала, о чем свидетельствуют основные технико-экономические показатели: чистая приведенная стоимость 977,17 млн руб., внутренняя норма доходности 70,3 %; индекс доходности 1,83, срок окупаемости 1 год.

В четвертой главе проведено изучение закономерностей преобразования технологических свойств золота и минеральных ассоциаций в процессах образования и долговременного хранения хвостов; обоснованы параметры и разработаны технологические решения по гравитационному обогащению золотосодержащих песков из хвостохранилища и геотехнологическому извлечению золота на месте залегания хвостов.

Проведенный анализ данных по условиям формирования техногенных золотосодержащих объектов в виде хвостохранилищ золотоизвлекательных фабрик (ЗИФ) показал, что закономерности накопления, перераспределения, концентрирования золота в хвостохранилищах, преобразования минерального состава хвостов и технологических свойств золота являются основаниями для адаптации существующих технологических процессов и аппаратов к свойствам техногенно-

го сырья, к геологическим, гидрогеологическим, топографическим условиям залегания лежалых хвостов.

Исследования проводились на старогоднем законсервированном хвостохранилище Семеновской золотоизвлекательной фабрики (Республика Башкортостан) с запасами золота 3,2 т, при количестве заскладированных хвостов 2638,8 тыс. т со средним содержанием золота 1,23 г/т. На информационно-аналитическом уровне, по результатам геологоразведочных, поисково-оценочных работ на хвостохранилище, было изучено распределение золота по простиранию и по глубине и установлено, что при гидравлическом складировании и хранении хвостов тонкое золото весьма равномерно распределилось по телу хвостохранилища со средним содержанием 0,7 – 1 г/т, а локальные участки с повышенными концентрациями (свыше 1,4 г/т) наблюдаются в северной, восточной и юго-восточной частях хвостохранилища и приурочены к глубоким участкам, к понижениям местности, к местам сосредоточенного сброса пульпы. Самые высокие концентрации золота 1,6-2,4 г/т выявлены в наиболее глубоких (8-10 м) участках в восточной части, вблизи места расположения сброса хвостовой пульпы и коррелируют с нижней границей рельефа местности. Невысокие концентрации золота (0,6-0,8 г/т) установлены в хвостах пляжной зоны с небольшой толщиной техногенной залежи 3-5 м в западной и северо-западной частях, противоположных месту сосредоточенного сброса пульпы, и в хвостах из придамбовой зоны в юго-восточной части хвостохранилища (0,7-0,9 г/т) при толщине песков 3-4 м.

По минеральному составу лежалые хвосты представлены песками кварц-полевошпатового состава (50-60% кварц, 20-25% микроклин, ортоклаз, плагиоклаз) с присутствием слюдисто-глинистых минералов (5-10% каолинит, мусковит, серицит), вторичных образований (6-9% лимонит и другие оксиды и гидроксиды железа, скородит, церуссит) и небольшим количеством сульфидов (1-2% пирит, марказит, пирротин, халькопирит). Достаточно высокие содержания сульфатов (0,047% масс.), гидрокарбонатов (0,0292% масс.), хлоридов (0,012% масс.) в химическом составе хвостов свидетельствуют о протекавших гипергенных процессах окисления сульфидов, преобразования нерудных составляющих. Формы нахождения золота по результатам фазового анализа: в свободном виде и в сростках (цианируемое) – 57,1%, трудно цианируемое – 10,3%, в сульфидах – 7,2%, в порообразующих минералах – 25,4%.

Проведенные на инструментальном уровне технологические исследования обогатимости лежалых хвостов методами флотации, гравитации, цианирования показали невысокую эффективность применения традиционных разделительных процессов. При отсадке хвостов концентрирования золота в тяжелой фракции не происходило: при содержании золота в исходных песках 1,43 г/т содержание его в тяжелой фракции было 1,9 г/т при максимально достигнутом извлечении 28,1%. При центробежной сепарации при содержании золота в исходных песках 1,5 г/т получено извлечение золота в тяжелую фракцию 30-33% при содержании золота 8,1÷10,6 г/т. При флотации хвостов самое высокое извлечение золота 50,8 % было получено при выходе концентрата 17,6% и содержании золота в нем 3,9 г/т. При цианировании лежалых хвостов при содержании золота в исходном материале 1,7 г/т извлечение золота в раствор составляло 52,8 % при содержании зо-

лота в хвостах цианирования 0,85 г/т при большой продолжительности агитационного цианирования 12 ч и высоком расходе NaCN 1 кг/т.

В качестве альтернативного нецианидного растворителя золота была рассмотрена хлорная вода (раствор газообразного хлора в воде) и проведены лабораторные исследования по хлоридному выщелачиванию золота из лежалых хвостов. При концентрации активного хлора в растворе 1,2 г/дм³ концентрация золота в продуктивном растворе составляла 0,053 мг/дм³ при времени выщелачивания 48 ч. При увеличении концентрации активного хлора до 2,0 г/дм³ концентрация золота в растворе была вдвое больше – 0,11 мг/дм³, а при концентрации активного хлора 4,9 г/дм³ была достигнута максимальная концентрация золота в растворе 1,5 мг/дм³. При предварительной кислотной обработке хвостов раствором соляной кислоты с концентрацией 2 г/дм³ несколько повышалась концентрация золота в растворе и снижался расход хлора (таблица 3).

Таблица 3 – Влияние продолжительности выщелачивания и предварительной кислотной обработки хвостов

Характеристика пробы	C _{Слак} в растворе, г/дм ³	Без предварительной кислотной обработки			Удельный расход хлора, кг/т	С предварительной кислотной обработкой			
		C _{Ав} в растворе, мг/дм ³ , при времени выщелачивания				C _{Ав} в растворе, мг/дм ³ , при времени выщелачивания			
		1 ч	24 ч	42 ч		1ч	20 ч	24 ч	
Исходная	2,0	0,13	0,17	0,13	3,7	0,15	0,25	0,16	3,3
Класс – 1 мм	2,0	0,16	0,42	0,18	4,3	0,18	0,32	0,45	3,6

Технологическое тестирование проб хвостов, отобранных из различных участков хвостохранилища, подтвердило литолого-фильтрационную неоднородность техногенного массива, формирование в нем нескольких наиболее типичных геолого-минералогических зон, отличающихся минеральным, гранулометрическим составом хвостов, содержанием и распределением золота по классам крупности, обводненностью, фильтрационными характеристиками и, следовательно, требующих применения разных технологических процессов извлечения золота. Целесообразно хвосты из осушенных, небольшой мощности участков пляжной зоны, в которых золото находится преимущественно в крупных -3,0+0,5 мм и средних -0,5+0,125 мм классах, перерабатывать гравитационным методом с использованием центробежных сепараторов. Извлечение золота из обводненной центральной части хвостохранилища, характеризующейся переслаиванием несвязных грунтов, близких к алевритам, и глиноподобных, с варьированием коэффициента фильтрации от 0,89 до 0,15 м/сут, с неравномерным распределением мелкого и тонкого золота в песках приповерхностной зоны и с преимущественным нахождением золота в мелких -0,074+0,040 мм и тонких -0,040+0 мм классах в наиболее глубоких (6-10 м) частях хвостохранилища, рационально производить скважинным выщелачиванием.

На адаптационном уровне для повышения показателей гравитационного обогащения лежалых хвостов проведена параметрическая адаптация конструкции чаши центробежного сепаратора САЦ-750. На основании анализа сил, действующих на частицу во вращающемся потоке, для снижения турбулентности по-

тока и повышения концентрирования мелкого и тонкого золота в межрифловом пространстве, в типовой конструкции увеличена длина рифлей с 40 до 59 мм, уменьшен угол наклона рифлей с 145 до 133 град и угол схождения рифлей с 25 до 15 град. При послойном анализе черного гравииоконцентрата, накопленного в межрифловом пространстве модернизированного сепаратора, наблюдалось повышение содержания золота во всех слоях в сравнении с типовой конструкцией чаши: во внешнем слое с 3,3 до 8,0 г/т, в среднем слое с 6,5 до 9,5 г/т, во внутреннем пристеночном слое с 13 до 14 г/т.

Установлены рациональные параметры гравитационной технологии: двухстадийное измельчение до 75-80% класса $-0,074$ мм; основная и контрольная сепарация на концентраторах с диаметром чаши 750 мм при скорости вращения 210 об./мин, цикле сепарации 24 мин, расходе промывочной воды 45-55 $\text{дм}^3/\text{мин}$, содержании твердого в пульпе 32%; перечистная сепарация на концентраторах с диаметром чаши 300 мм при скорости вращения чаши 180 об./мин, цикле сепарации 14 мин, расходе промывочной воды 35-45 $\text{дм}^3/\text{мин}$, содержании твердого в пульпе 28%; сгущение гравииоконцентрата до содержания твердого 60-65 %; фильтрование до влажности 10-12%. При содержании золота в исходных песках 1,5 г/т было достигнуто извлечение золота в гравииоконцентрат 65% при содержании золота 45,6 г/т.

Для извлечения мелкого и тонкого золота из центральной преимущественно обводненной части хвостохранилища способ скважинного подземного выщелачивания был адаптирован применительно к поверхностному залеганию золотосодержащих песков в виде техногенной залежи на водонепроницаемом глинистом основании. Анализ горнотехнических, гидрогеологических, технологических факторов на хвостохранилище и сопоставление их с оценочными показал, что по большинству параметров объект благоприятен для организации выщелачивания лежалых хвостов на месте их залегания с подачей выщелачивающих хлорсодержащих растворов (хлорной воды) через скважины с поверхности. Основные параметры геотехнологии были получены при проведении натурных испытаний на опытной геотехнологической ячейке выщелачивания, которая была сооружена в северо-восточной глубокой части хвостохранилища. Был рассчитан коэффициент фильтрации по уровням грунтовых вод в скважинах (диаметр скважины 132 мм) на опытной ячейке и дебитам скважин, который составил для мелких и среднезернистых песков $7\div 11$ м/сут, для глинистых песков или песков с прослоями суглинков – $0,3\div 1,5$ м/сут, то есть пески относятся к умеренно проницаемым. Для основной глубокой части хвостохранилища, с наличием прослоев глины при мощности прорабатываемых песков до 8 м, рассчитанная сторона квадратной ячейки выщелачивания должна составлять 5,5 м, а для участков с меньшей мощностью отложений толщиной до 5 м – 6,9 м. Для лучшей проработки массива рекомендуется прямоугольная ячейка с соотношением сторон $1:1,5\div 2,0$.

Разработана геотехнологическая схема переработки лежалых хвостов на месте их складирования в хвостохранилище (рисунок 4), рациональные параметры и показатели опытно-промышленных испытаний которой приведены в таблице 4. По объемам продуктивных растворов выщелачивания и концентрации золота в них было рассчитано извлечение золота из техногенного массива в растворы, которое составило 75%.

Таблица 4 – Параметры
и показатели геотехнологии

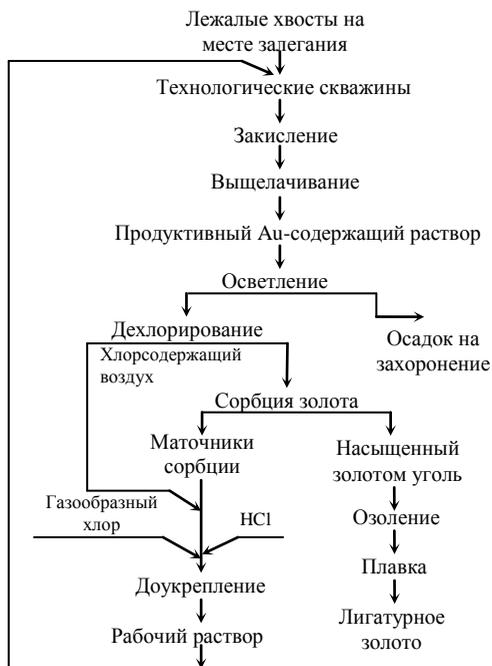


Рисунок 4 – Геотехнологическая схема
переработки лежалых хвостов

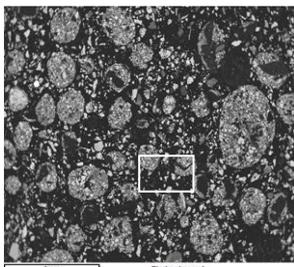
Параметр	Значение
Закисление массива	
C_{HCl} , г/дм ³	0,8-1,0
pHзакачн.	1,6÷1,8
pHоткачн.	6,0÷6,2
Выщелачивание	
C_{HCl} , мг/дм ³	470-700
$C_{Cl_{act}}$, мг/дм ³	200-1200
pH	2,1-2,2
Eh, мВ	1000-1220
Сорбция	
C_{Au} , мг/дм ³	0,2-0,85
pH	2,6-2,7
Eh, мВ	1050-1160
$C_{Cl_{act}}$, мг/дм ³	100-120
Активированный уголь, кг/кг Au	150
Подача растворов, м ³ /ч	2,0
Насыщенный уголь, Au кг/т	до 5,0
Извлечение золота на сорбент, %	95
Рабочие растворы	
Уд. расход Cl ₂ , кг/т	3,3-3,6
Уд. расход HCl, кг/т	0,36
Маточки сорбции	
pH	2,58-2,65
Eh	400-550
$C_{Cl_{act}}$, мг/дм ³	50-60
Хлорсодержащий воздух	
$C_{Cl_{act}}$, мг/дм ³	10-30

Таким образом, для максимально полного освоения запасов техногенного месторождения золота и обеспечения рентабельности переработки лежалых хвостов был применен принцип комбинирования гравитационного и гидрометаллургических методов переработки по типам геолого-минералогических зон, сформировавшихся в теле хвостохранилища, и проведена адаптация применяемых методов и аппаратов к установленным особенностям вещественного состава и технологических свойств лежалых хвостов, а также к геологическим, горнотехническим, гидрогеологическим условиям их залегания. Результаты технико-экономической оценки свидетельствуют об экономической состоятельности инвестиционного проекта: чистый дисконтированный доход составит 570,27 млн руб. за 5 лет реализации проекта при сроке окупаемости вложений 1 год.

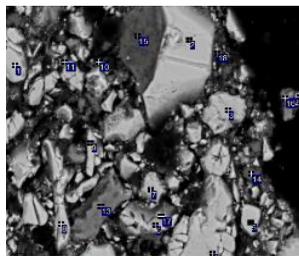
В пятой главе проведены исследования по адаптации обогатительных процессов для комплексной утилизации тонкодисперсных отходов, образующихся в доменном производстве; представлена разработанная комбинированная флотационно-магнитная технология переработки железозинксодержащих доменных шламов и результаты ее апробации.

Побочные продукты высокотемпературных металлургических процессов переработки концентратов – шлаки, пыли, шламы – являются вновь образованными веществами в результате протекания сложных окислительных и восстано-

вительных процессов, поэтому по составу, строению, свойствам существенно отличаются от свойств исходных железорудных материалов. На Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК) в системах мокрой газоочистки доменных печей образуется порядка 180-200 тыс. т шламов с массовой долей железа 45-50% железа, цинка – 1,85-2,2%. Цинк является наиболее вредной примесью в составе доменных шламов, его повышенное содержание при утилизации шламов в составе аглошихты без обесцинкования отрицательно сказывается на процессе доменной плавки и ухудшает технико-экономические показатели процесса.



Общий вид шлама



Детализация выделенной области.

Точки: 1-11 – оксиды и гидроксиды железа;
12, 17, 18 – выделения Zn-содержащих фаз; 13 – сфен;
14 – плаггиоклаз; 15 – амфибол; 16 – пироксен

Рисунок 5 – Рентгеноспектральный микроанализ доменных шламов (РСМА)

При минералого-технологической оценке шламов ММК комплексом физических методов (растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный анализ, рентгенографический количественный фазовый анализ) было установлено, что они представляют собой микроагрегат оксидов железа (гематит, магнетит) с дисперсными выделениями Zn-содержащих фаз и некоторым количеством силикатных фаз (рисунок 5). Цинк в шламах идентифицирован в виде минерала цинкита ZnO и трудновосстановимого сложного оксида – феррита цинка или франклинита $ZnFe_2O_4$, реже встречается в форме сульфида, силикатов, сульфатов цинка. Основными минеральными фазами шламов по результатам РКФА являются, %: гематит - 38, магнетит - 28, кварц - 12, мусковит - 7, кальцит - 5, клинохлор - 4, альбит - 2,5, цинкит - 1,5, франклинит - 1,0.

При изучении свойств доменных шламов ($\beta_{Fe}=48,02\%$, $\beta_{Zn}=1,37\%$) было установлено, что они являются материалом с высокой магнитной восприимчивостью (удельная магнитная восприимчивость $2,36 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$; удельная намагниченность 0,99 Тл/м; остаточная намагниченность 0,092 Тл/м; коэрцитивная сила $1,25 \cdot 10^3 \text{ А/м}$), с высокой плотностью ($4,7 \text{ г/см}^3$). По гранулометрическому составу на 80-90% представлены классом $-0,074 \text{ мм}$, с высокой долей (свыше 40%) тонких частиц менее 20 мкм, на которые приходится наибольшая доля цинка (свыше 70%). Шламы поступают из систем газоочисток доменных печей в виде шламо-содержащих вод с массовой концентрацией взвешенных веществ около 20 г/дм^3 .

Изучение состава и свойств шламов на инструментальном уровне показало, что разделительными признаками для их обесцинкования могут быть особенности концентрирования железо- и цинк-содержащих компонентов по минеральным фазам и по классам крупности и магнитная восприимчивость. Это определило

использование флотации и мокрой магнитной сепарации при разработке ресурсосберегающей технологии их комплексной переработки.

На адаптационном уровне изысканий принятые за основу схемы и реагентные режимы флотации железных руд, флотационной доводки магнетитовых концентратов были адаптированы применительно к железоцинксодержащим отходам металлургического производства с целью их обесцинкования и выделения цинка в самостоятельный продукт для цветной металлургии. Разработаны и испытаны различные схемы и режимы прямой анионной, обратной анионной и обратной катионной флотации на пробах доменных шламов с различной массовой долей цинка и железа. Лучшие показатели обесцинкования шламов были получены при обратной флотации с использованием катионных собирателей на основе аминов. При флотации с использованием реагента Флон, активная часть которого представляет соль алифатических аминов в изопропиловом спирте, при дробной его подаче (рисунок 6), в слабощелочной среде ($\text{pH} \sim 9$ ед.) массовая доля цинка в камерном продукте снижалась с 1,37 до 0,45-0,7% при расходе собирателя 100-200 г/т, а массовая доля железа повышалась с 48,02 до 52-54% (рисунок 7).

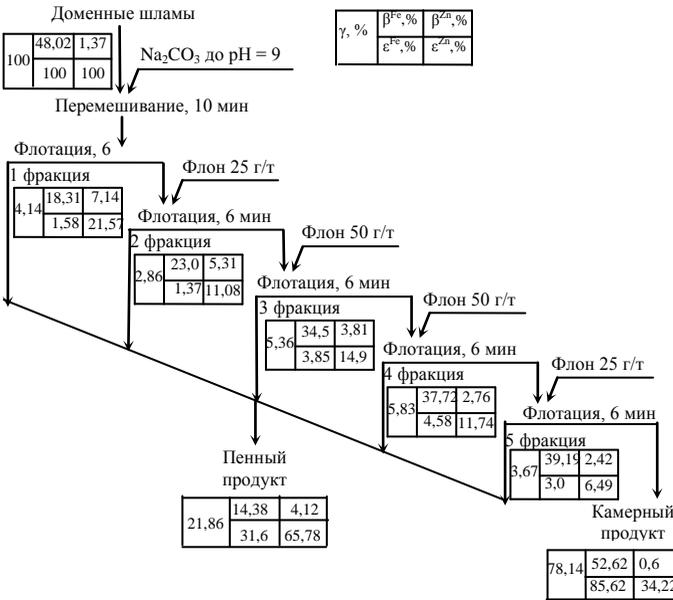


Рисунок 6 – Схема и показатели флотации доменных шламов (Флон 150 г/т)

онной флотации составляло 65-70%, железа в камерный продукт – 85-90%.

При перечистке пенных продуктов основной флотации с массовой долей цинка 4-6%, получаемые цинксодержащие промпродукты с массовой долей цинка 7-8% могут быть утилизированы на предприятиях цветной металлургии. При

Аналогичные зависимости флотационного разделения шламов были получены при использовании катионного собирателя АНП-14 (амины из нитропарафинов). При расходе АНП 200 г/т в слабощелочной среде ($\text{pH} \sim 10$ ед.) было получено снижение массовой доли цинка в камерном продукте практически в три раза – с 1,37 до 0,5%. Массовая доля железа при этом повышалась с 48,02 до 57,0%. Извлечение цинка в пенный продукт флотации при обратной катионной флотации составляло 65-70%, железа в камерный продукт – 85-90%.

мокрой магнитной сепарации камерного продукта флотации при невысокой напряженности магнитного поля 115-200 кА/м массовая доля железа в нем повышалась с 52-56 до 60-62%.

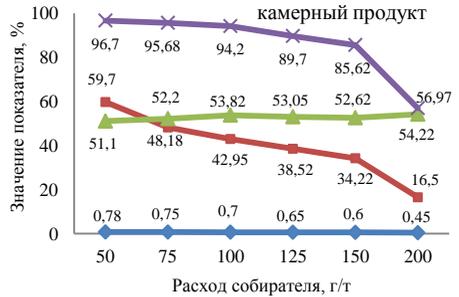


Рисунок 7 - Показатели флотации шламов в зависимости от расхода реагента Флон

Разработана комбинированная флотационно-магнитная технология комплексной переработки железозинксодержащих доменных шламов (рисунок 8).

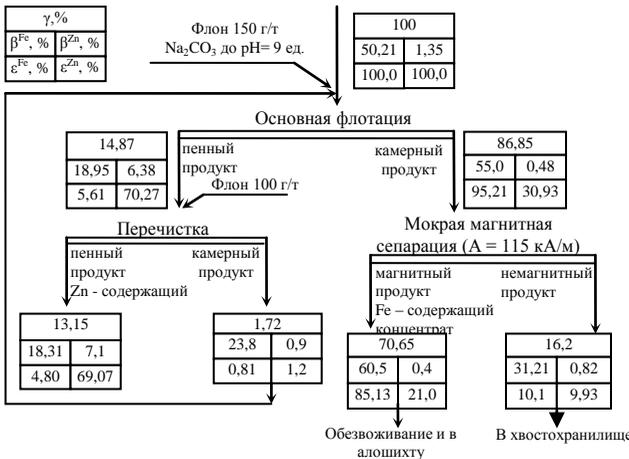


Рисунок 8 – Технологическая схема комплексной переработки железосодержащих шламов доменного производства

шламов при включении в существующую схему обезвоживания шламов на вакуум-фильтрационной установке ММК обогатительного модуля показала, что увеличение балансовой прибыли за счет получения дополнительного цинкового промпродукта составит 53 млн руб. в год.

Таким образом, особенности минерального состава и концентрирования железо- и цинксодержащих фаз, технологические свойства тонкодисперсных отходов пирометаллургического производства предопределили разработку инноваци-

При проведении укрупненных лабораторных испытаний были получены цинксодержащий промпродукт с массовой долей цинка 7,1% для реализации цинковым заводам и железный концентрат с массовой долей железа 60,5%, цинка – 0,4% для утилизации в шихте агломерационного производства. Оценка экономической эффективности комплексной переработки железозинксодержащих доменных

онной, экологически безопасной, низкзатратной комбинированной флотационно-магнитной технологии их комплексной переработки с получением востребованной в смежных отраслях черной и цветной металлургии продукции.

В шестой главе представлены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию параметров селективной дезинтеграции структурно неоднородных отходов металлургического производства – шлаков – при построении схем рудоподготовки; приведены разработанные схемы переработки шлаков черной металлургии и рекомендации по адаптации центробежно-ударного способа дезинтеграции в технологических линиях переработки техногенного металлсодержащего сырья.

Используемое в операциях дезинтеграции шлаков стандартное горнорудное оборудование не приспособлено к структурным особенностям и физико-механическим свойствам шлаков, имеет низкую селективность дезинтеграции при высоких энергетических затратах, не обеспечивает стабильности работы из-за частых поломок и простоев, что предопределяет, в том числе, низкие показатели извлечения металлов из шлаков. Необходима адаптация имеющихся технических и технологических решений для повышения эффективности и рентабельности утилизации шлаков.

На инструментальном уровне проведено изучение фазового состава, структурно-текстурных характеристик, физико-механических свойств нескольких видов шлаков: сталеплавильных шлаков ММК, медных шлаков комбината «Карабашмедь», никелевых шлаков комбинатов «Североникель» и «Печенганикель», ванадиевого шлака Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК), различных фракций некондиционных металлоконцентратов, получаемых при первичной переработке доменных и мартеновских шлаков в АО «Уральская Сталь». Выявлены наиболее характерные особенности фазового состава шлаков различного генезиса, их структуры и прочностных свойств:

- шлаки имеют многофазный состав и характеризуются наличием сложных структур срастания рудных и шлаковых фаз;
- основными шлакообразующими минералами являются силикатные;
- железо в шлаках черной металлургии представлено металлическим железом, магнетитом и железосодержащими фазами с серией твердых растворов;
- металлическое железо может быть в виде обособленных округлых выделений с четкими ровными границами размером от 0,5 до 10-15 мм, в виде крупных зернистых агрегатов сложного строения, тонких образований в центральных или периферийных частях кристаллов акерманита и в зернах магнезиевостита;
- основная рудная фаза в ванадиевых шлаках – ванадиевый шпенелид с размерами зерен шпинели от 10 до 100 мкм;
- медь в медных шлаках имеет кубооктаэдрическую форму, нередко вокруг отмечаются ганитовые каемки, сульфидные минералы присутствуют в виде зерен практически идиоморфной или округлой формы размером 1 мкм и менее;
- силикатные шлаковые фазы обладают повышенной хрупкостью, для них суммарный балл хрупкости находится в пределах $35 \div 47$, для металлов суммарный балл хрупкости меньше – $19 \div 27$.

Проведенные измерения микротвердости на характерных границах срастания фаз в сталеплавильном шлаке ММК – на границе металлической (Fe) и ок-

сидной (Fe, Mn, Mg)O-фазы (рисунок 9, а) и на границе оксидной и шлаковой фаз (рисунок 9, б) – показали, что наблюдаются различия микротвердости отдельных фаз как при приближении от объема округлого зерна металла к его границе с RO-фазой, так и при приближении к границе раздела RO-фазы и силикатной шлаковой. При этом микротвердость металлической фазы (975÷1232 МПа) всегда гораздо меньше микротвердости остальных фаз. Самое высокое значение микротвердости у силикатных шлаковых фаз – 7200÷7500 МПа, для RO-фазы характерно несколько меньшее значение – 4800÷5300 МПа. На границах срастания происходит резкий скачок свойств контактирующих фаз, поэтому межзеренные границы являются наиболее вероятными элементами структуры, по которым развивается разрушение и происходит раскрытие минеральных фаз в шлаках.

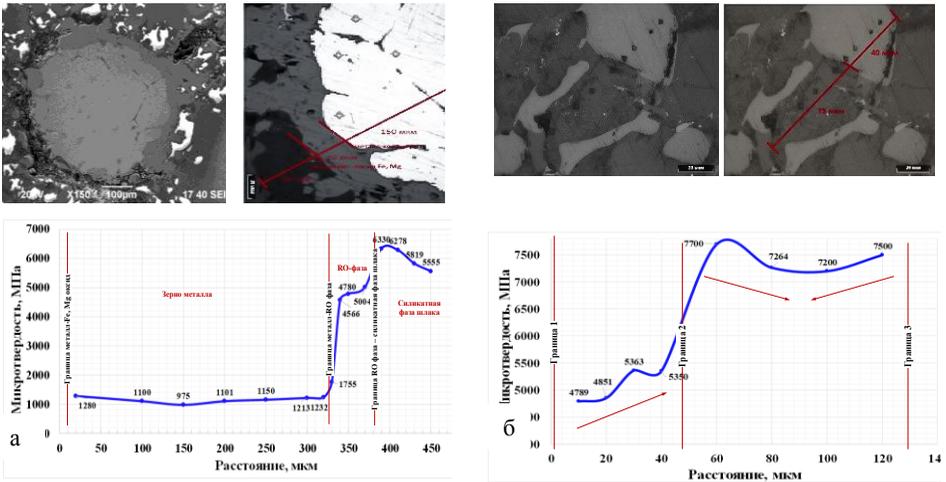


Рисунок 9 – Микрофотографии и диаграммы изменения микротвердости на границах фаз в сталеплавильном шлаке: а – металлическое включение (яркое) – RO-фаза (серое); б – RO-фаза (серое) – шлаковая силикатная фаза (темно-серое)

Сформированная в высокотемпературных процессах структурная неоднородность шлаков и в то же время индивидуализированная форма выделений рудных фаз и металлических включений в шлаковообразующей матрице, существенные различия прочностных характеристик отдельных фаз создают предпосылки для разрушения по границам срастания фаз при использовании адекватно структуре и свойствам разрушаемого элемента способа механического воздействия. Проведенный на адаптационном уровне поиск наиболее селективного для вскрытия металлических включений и рудных фаз способа дезинтеграции шлаков показал, что разрушение на основе удара свободнолетающего с большой скоростью куска о статичную поверхность происходит с высокой избирательностью, в основном вдоль линий естественного разлома, по микротрещинам, по ослабленным направлениям, каковыми являются плоскости срастания разнотвердых фаз гетерогенных материалов, обладающих различным сопротивлением удару.

На основании выведенной зависимости силы динамического взаимодействия соударяющихся тел (куска материала и отбойной плиты в камере центробежно-ударной дробилки) $P_{\text{дmax}} = 3,02 \frac{R_{\text{ш}}^2 \rho^{3/5} v^{6/5} E^{2/5}}{1-\mu^{4/5}}$ был сделан вывод о том, что максимальная в момент удара сила взаимодействия соударяющихся тел зависит от свойств разрушаемого материала (E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность), его размеров ($R_{\text{ш}}$ – радиус шара) и скорости куска (v – линейная скорость куска в момент его схода с диска ротора), которая, в свою очередь, определяется скоростью вращения ускорителя центробежно-ударной дробилки и является основным регулируемым параметром ее работы.

На организационно-технологическом уровне были апробированы разработанные схемы переработки шлаков черной металлургии с использованием центробежно-ударного способа разрушения (дробления и измельчения). Технология стадийного избирательного вскрытия металловключений в процессах дробления и измельчения ванадиевого шлака и извлечения металловключений в процессах грохочения, воздушной классификации и магнитной сепарации обеспечивала необходимую степень обезжелезнения ванадиевого конвертерного шлака НТМК, с исходным содержанием металловключений 35,8%, до содержания железа дисперсного (включения металлической фазы не более 0,1 мм) 0,57% в тонкоизмельченном (содержание частиц менее 0,1 мм 98,8%) ванадиевом порошке для производства пентаоксида ванадия (рисунок 10, а). Выделенные металловключения могут быть использованы в качестве оборотного продукта в металлургическом производстве.

Разработаны технологические схемы получения высококачественных концентратов из некондиционных продуктов первичной переработки доменных и мартеновских шлаков различных фракций, обоснованные их фазовым составом, структурными особенностями, различием физико-механических свойств отдельных шлаковых фаз, распределением металловключений по классам крупности. В результате глубокой переработки мелких фракций 0-5 и 0-8 мм массовая доля железа в получаемых магнитных продуктах повышалась с 43 до 71-77%. При переработке фракций 0-20 мм из доменных и мартеновских шлаков массовая доля железа повышалась с 37-41 до 69%. При переработке более крупных фракций 0-65, 8-50 мм с массовой долей железа около 46% были получены металлоконцентраты высокого качества: фракции 10-65 и 10-50 мм с массовой долей железа соответственно 83,75 и 70,7% и фракции 0-10 мм с массовой долей железа 76,9 и 62%.

На рисунке 10, б в качестве примера приведена схема переработки фракции 0-65 мм. Ожидаемый экономический эффект от реализации технологии глубокого обогащения фракции 0-65 мм в условиях АО «Уральская Сталь» составит 54 млн руб. в год.

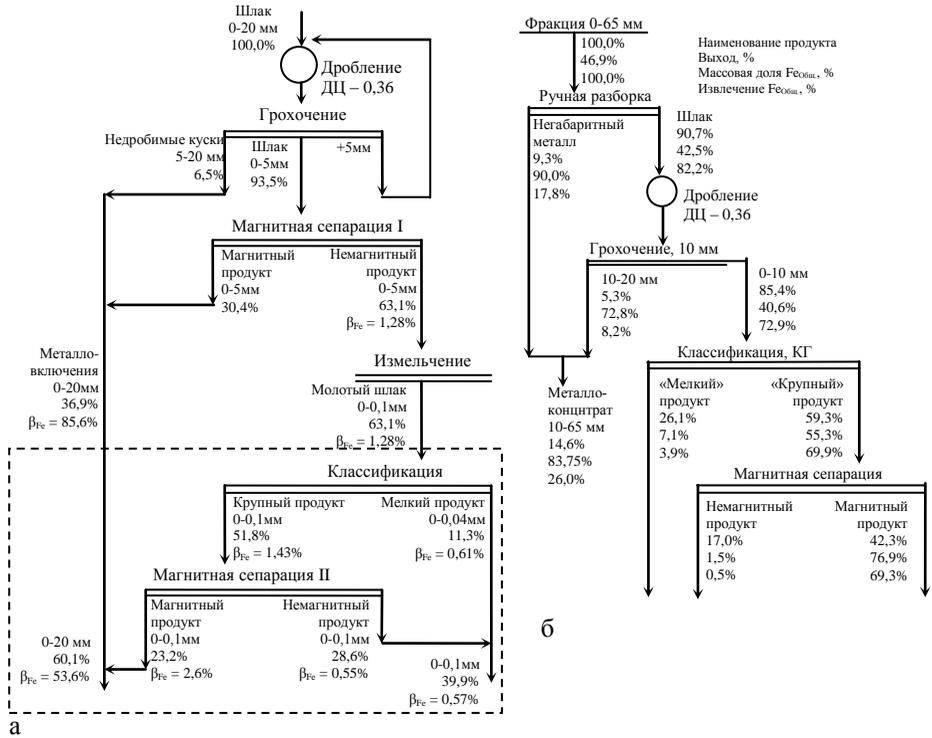


Рисунок 10 – Технологические схемы переработки шлаков: а – ванадиевого; б – некондиционного металлоконцентрата из доменных шлаков

Повышение качества металлоконцентратов различных фракций обеспечивалось за счет избирательного вскрытия зашлакованных металловключений при дроблении в центробежно-ударной дробилке ДЦ при регулируемой в пределах $40 \div 70$ м/с скорости вращения ускорителя и выделения раскрытых крупных включений металла в последующей операции грохочения. При классификации в каскадном гравитационном классификаторе КГ со скоростью воздушного потока $2 \div 6$ м/с происходило удаление измельченных шлаковообразующих минералов и более эффективное извлечение металловключений в магнитной сепарации узкофракционированного материала при напряженности поля $3000 \div 4000$ Э.

Была разработана универсальная технологическая линия получения высококачественных металлоконцентратов из доменных и сталеплавильных шлаков, отличающаяся модульным принципом построения, универсальностью, гибкостью схемных и компоновочных решений, невысокой материалоемкостью и энергоемкостью, не превышающей 37 кВт·ч/т готовой продукции. Разработаны рекомендации по адаптации рудоподготовительных процессов с использованием центробежно-ударного способа разрушения и по построению технологических линий переработки бедного природного и техногенного металлосодержащего сырья.

Выполненными исследованиями доказано, что горнопромышленные отходы являются минеральными системами со специфично измененными технологиче-

скими свойствами, формирование технологий переработки которых в соответствии с системным методологическим подходом, при комбинировании методов разделения, обеспечивает повышение доступности практического применения отходов, получение качественной металлосодержащей продукции в условиях нарастающего дефицита минерального сырья при одновременном решении экологических задач.

Заключение

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований дано развитие научно-методологических основ формирования ресурсосберегающих технологий переработки горнопромышленных отходов и разработаны новые научно обоснованные технические и технологические решения по переработке отходов, учитывающие их специфические минеральный состав и свойства, которые выступают критериями выбора способа селективной дезинтеграции и комбинирования нескольких обогатительных или обогатительных и гидromеталлургических процессов для вовлечения в рентабельную эксплуатацию ранее неиспользуемых ресурсов техногенного происхождения, что вносит значительный вклад в развитие страны.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Впервые обоснована идея о том, что минеральные отходы являются сложными многоэлементными структурами техногенного происхождения и одновременно вновь образованным природным исходным сырьем для нового цикла производства, свойства которого формируются в природных и технологических процессах его образования, складирования и хранения. Поэтому методологически технология переработки отхода в теоретическом аспекте должна базироваться на комплексном анализе системы всех имеющихся свойств, выявлении главной связи или отношения свойств отхода, открытии новых связей свойств отхода, а в практическом аспекте – иметь общий алгоритм формирования.

2. В рамках метода восхождения от абстрактного к конкретному предложена авторская дефиниция «минеральный отход». Показано, что минеральный отход, будучи природным ресурсом, образованным путем вовлечения в производственные технологии имеющихся циклов производства, есть полноценное минеральное сырье, свойства которого могут существенно отличаться от свойств аналогичного природного сырья, не прошедшего стадии производства, а рациональная ресурсосберегающая технология переработки минерального отхода есть средство снятия технологических ограничений имеющихся производственных технологий.

3. Дано развитие научно-методологических основ формирования технологии переработки отхода в рамках общей концепции рационального природопользования и разработана методология создания ресурсосберегающих технологий переработки горнопромышленных отходов, основанная на последовательном осуществлении комплекса теоретических и экспериментальных исследований на соподчиненных информационно-аналитическом, инструментальном, адаптаци-

онном, организационно-технологическом и экономико-аналитическом уровнях в итерационном порядке выполнения. Методология включает уровень адаптации традиционных разделительных процессов и технологических решений к особенностям вещественного состава и технологических свойств горнопромышленных отходов для повышения технико-экономической эффективности и экологической безопасности их переработки.

4. Проанализированы с позиций вовлечения отходов в рентабельную переработку характер и степень качественного изменения вещественного состава и технологических свойств минерального сырья в природных и техногенных процессах и разработана классификация отходов черной и цветной металлургии по степени измененности вещественного состава и контрастности технологических свойств, позволяющая производить прогнозную оценку обогатимости, априорный выбор направлений использования техногенного сырья и методов переработки.

5. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что технологически эффективная переработка забалансовых медных руд, обусловленная особенностями их вещественного состава и технологических свойств, обеспечивается при создании оптимальных условий извлечения сульфидных и окисленных минералов меди в разных технологических процессах при определенной их последовательности в технологической схеме и рациональных параметрах. Обоснован механизм и разработан новый способ аммонийно-сульфатного выщелачивания окисленных минералов меди при интенсифицирующих механическом и термическом воздействиях. Разработана комбинированная флотационно-гидрометаллургическая технология переработки забалансовой руды из отвала, обеспечивающая получение медного концентрата с массовой долей меди свыше 29%, при извлечении меди не менее 48% при флотации руды с сульфидрильным собирателем и спиртовым пенообразователем, и катодной меди с массовой долей меди 99,99%, при извлечении меди не менее 38% при переработке продуктивных растворов выщелачивания сорбцией, десорбцией и электролизом.

6. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что для наиболее полного освоения запасов золота законсервированного хвостохранилища золотоизвлекательной фабрики, обеспечения технологической эффективности, экономической рентабельности и экологической безопасности переработки целесообразно комбинирование гравитационного доизвлечения золота из участков пляжной зоны и скважинного хлоридного выщелачивания золота в центральной части техногенного массива. При гравитационном обогащении лежалых золотосодержащих песков пляжной зоны с содержанием золота 1,5 г/т по разработанной схеме с учетом проведенной параметрической адаптации конструкции чаши центробежного концентратора достигается извлечение золота в гравитационный концентрат не менее 65%. Разработанная технология скважинного выщелачивания золота в хлоридных системах в центральной обводненной части хвостохранилища, с неравномерным распределением мелкого и тонкого золота по глубине и по простиранию, при рациональной геометрии (прямоугольная ячейка с соотношением сторон 1:1,5÷2,0) и размерах (от 4,4×6,6 до 3,7×7,3 м для основной части хвостохранилища с мощностью отложений до 8 м, от 5,5×8,3 до 4,6×9,2 м для участков с мощностью до 5 м) геотехнологических ячеек выщелачивания,

обеспечивает извлечение золота на уровне 75% в золотосодержащий угольный концентрат с содержанием золота 5 кг/т.

7. Впервые для комплексной переработки железозинксодержащих доменных шламов обосновано применение методов обогащения полезных ископаемых – флотации и мокрой магнитной сепарации, адаптированных к переработке тонкодисперсных отходов металлургического производства. Разработана комбинированная флотационно-магнитная технология переработки шламов газочистых систем доменных печей с массовой долей железа 48,02%, массовой долей цинка 1,37%, включающая обратную флотацию шламов с использованием катионного собирателя Флон (150-200 г/т) в слабощелочной (рН 9,5-10) среде, с целью их обесцинкования, и мокрую магнитную сепарацию камерного продукта флотации, при напряженности поля 115 кА/м, для повышения массовой доли железа. При переработке доменных шламов по комбинированной технологии получается обесцинкованный железный концентрат с массовой долей железа свыше 60% и массовой долей цинка менее 0,5%, для использования в шихте агломерационного производства, и цинксодержащий промпродукт с массовой долей цинка 7-8%, для использования на предприятиях цветной металлургии, что повышает извлекаемую ценность вторичных металлосодержащих ресурсов.

8. Выявлены наиболее характерные особенности фазового состава, структуры и физико-механических свойств металлургических шлаков, обусловленные неравновесными условиями их образования в высокотемпературных металлургических процессах, и обосновано, что сформированная структурная неоднородность шлаков, индивидуализированная форма выделений рудных фаз и металлических включений, существенные различия физико-механических свойств отдельных фаз шлака создают предпосылки разрушения их по границам срастания разнопрочностных фаз при использовании центробежно-ударного способа разрушения. Доказано, что различие физико-механических свойств и морфометрических параметров отдельных фаз шлаков, возможность регулирования величины прикладываемой динамической нагрузки за счет изменения скорости вращения ускорителя центробежно-ударной дробилки способствуют селективности процесса дезинтеграции металлургических шлаков и позволяют раскрывать металлические включения на стадии дробления при уменьшении энергетических затрат на 5-10%.

9. Разработаны рекомендации по построению модульных технологических линий с использованием центробежно-ударного способа разрушения и составлены рекомендации по адаптации рудоподготовительных процессов в схемах переработки бедного природного и техногенного сырья. Показано, что адаптация цикла рудоподготовки структурно неоднородного техногенного сырья обеспечивается использованием центробежно-ударного способа разрушения (дробления и/или измельчения), порядком следования в схеме операций раскрытия и разделения, их оптимальными параметрами, что приводит к селективному раскрытию разнопрочностных техногенных фаз, разделению на минеральные агрегаты с разным содержанием полезных компонентов и повышению качественно-количественных показателей переработки, а в некоторых случаях – к получению продукции заданного химического и/или гранулометрического состава.

10. Разработаны технологии переработки шлаков черной металлургии, построенные по принципу рационального сочетания модулей технологических операций селективной дезинтеграции при использовании интергранулярного центробежно-ударного способа разрушения (дробления и измельчения) и разделения раскрытых техногенных фаз по наиболее контрастным свойствам в операциях классификации и магнитной сепарации. Технология переработки ванадиевого шлака при стадийном избирательном раскрытии металловключений и извлечении их в операциях магнитной сепарации и воздушной классификации обеспечивала получение продукции заданного качества – обезжелезненного ванадиевого порошка с массовой долей железа менее 0,6% для производства пентаоксида ванадия и металлических включений с массовой долей железа свыше 80% для оборотного использования в металлургическом производстве.

11. Разработаны технологии глубокого обогащения некондиционной металлсодержащей продукции переработки доменных и мартеновских шлаков различных фракций (0-65, 8-50, 0-20, 0-8, 0-5 мм) с избирательным вскрытием зашлакованных металловключений при дроблении в центробежно-ударных дробилках при регулируемой скорости вращения ускорителя 40-70 м/с. Получаемые продукты характеризуются высокой массовой долей железа – 62-77% в зависимости от размера фракции для использования их в аглодоменном процессе. Разработана универсальная технологическая линия переработки некондиционной металлсодержащей продукции производительностью 40 т/ч при невысоких удельных затратах электроэнергии 22-37 кВт·ч на тонну получаемой продукции.

12. Выполненная технико-экономическая оценка эффективности разработанных технологических решений показала, что чистый дисконтированный доход от переработки отвала забалансовых руд месторождения Таскора по комбинированной технологии составит 977,17 млн руб. за весь период отработки; лежалых хвостов Семеновской ЗИФ по гравитационной и гидрометаллургической технологиям – 570,27 млн руб. Ожидаемый экономический эффект от реализации комбинированной технологии переработки доменных шламов ПАО «ММК» составит 53,1 млн руб. в год за счет дополнительного выпуска цинксодержащего промпродукта, а от реализации технологии дообогащения некондиционных металлоконцентратов из металлургических шлаков АО «Уральская Сталь» – 54 млн руб. в год (для фракции 0-65 мм).

Основные научные и практические результаты диссертации изложены в следующих опубликованных работах:

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций:

1. Шадрунова, И.В. Технология получения высококачественных концентратов из отвальных металлургических шлаков / И.В. Шадрунова, О.Е. Горлова, Е.В. Колодежная // Обогащение руд. – 2019. – №4. – С. 54-60.

2. Ресурсосбережение и ликвидация накопленного экологического ущерба в старопромышленных регионах при переработке шлаков металлургического производства / И.В. Шадрунова, О.Е. Горлова, Н.Н. Орехова, Е.В. Колодежная //

- Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №S1. – С. 300-320.
3. Горлова, О.Е. Разработка комбинированной флотационно-гидрометаллургической неокислотной технологии переработки отвалов забалансовых медных руд / О.Е. Горлова, И.В. Шадрюнова, О.М. Синянская // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №12. – С. 157-165.
 4. Влияние реагентов на основе диалкилдитиофосфатов на флотацию меди из пиритсодержащих шлаков / М.Н. Сабанова, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова, И.В. Глаголева // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2018.– №4. – С. 4-14.
 5. Разработка и опытно-промышленные испытания комбинированной технологии переработки отвала труднообогатимых смешанных медных руд месторождения Таскора / О.Е. Горлова, А.Б. Юн, О.М. Синянская, Н.Л. Медяник // Цветные металлы. – 2018. – №12. – С.14-20.
 6. Адаптационный подход к процессам комплексной переработки техногенного минерального сырья / И.В. Шадрюнова, О.Е. Горлова, Т.В. Чекушина, К.А. Воробьев // Естественные и технические науки. – 2018. – №11. – С. 285-287.
 7. Левченко, Е.Н. Техногенное минеральное сырье: особенности вещественного состава и технологических свойств, геолого-минералогическое картирование / Е.Н. Левченко, Л.И. Веремеева, О.Е. Горлова // Руды и металлы. – 2018. – №1. – С.64-75.
 8. Формирование ресурсосберегающих технологий переработки вторичного металлсодержащего сырья на основе принципов адаптации / В.А. Чантурия, И.В. Шадрюнова, О.Е. Горлова, Н.Н. Орехова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – №S1. – С. 347-362.
 9. Шадрюнова, И.В. Адаптационный подход к разделительным процессам глубокой и комплексной переработки минерального сырья как основа рационального природопользования и снижения техногенной нагрузки на окружающую среду / И.В. Шадрюнова, О.Е. Горлова, Е.В. Колодежная // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № S1. – С. 125-144.
 10. Влияние способа кондиционирования вод на флотацию пиритсодержащих шлаков медной плавки / М.Н. Сабанова, И.В. Шадрюнова, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1-4. – С. 50-59.
 11. Механизм дезинтеграции металлургических шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления / И.В. Шадрюнова, О.Е. Горлова, Е.В. Колодежная, И.М. Кутлубаев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – №2.– С. 149-155.
 12. Горлова, О.Е. Комплексная переработка тонкодисперсных железосодержащих отходов металлургического производства с применением методов обогащения / О.Е. Горлова, Н.И. Хасанов // Черная металлургия. Бюллетень научной и экономической информации. – 2014. – №3. – С. 93-96.

13. Флотация медных шлаков в условиях замкнутого водооборота обогатительной фабрики / М.Н. Сабанова, И.В. Шадрунова, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова // Цветные металлы. – 2014. – №10. – С. 16-24.

14. Технологические, экономические и экологические аспекты переработки техногенного сырья горно-металлургических предприятий Урала / И.В. Шадрунова, Н.А. Волкова, С.А. Мастюгин, О.Е. Горлова // Экология и промышленность России. – 2013. – № 8. – С. 16-21.

15. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков / И.В. Шадрунова, Е.Г. Ожогина, Е.В. Колодежная, О.Е. Горлова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – №5. – С.180-190.

16. Горлова, О.Е. Возможности и перспективы утилизации железосодержащих отходов Магнитогорского металлургического комбината / О.Е. Горлова, Н.И. Хасанов //Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2013. – № 2 . – С. 112-117.

17. Чантурия, В.А. Адаптация разделительных процессов обогащения полезных ископаемых к техногенному сырью: проблемы и решения / В.А. Чантурия, И.В. Шадрунова, О.Е. Горлова // Обогащение руд. – 2012. – №5. – С. 43–49.

18. Шадрунова, И.В. Адаптивные методы доизвлечения золота из хвостохранилищ золотоизвлекательных фабрик / И.В. Шадрунова, О.Е. Горлова, С.А. Провалов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №9. – С. 180-185.

19. Горлова, О.Е. Изыскание путей комплексной переработки шламов доменного производства / О.Е. Горлова, А.Е. Тарасова, О.Г. Ефремова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2005. – №4. – С.4-6.

20. Сухая магнитная сепарация мелкого материала во взвешенном состоянии / И.А. Гришин, О.Е. Горлова, О.П. Шавакулева, А.Н. Кошкалда // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2004. – №3. – С. 33-34.

21. Высокоэффективные технологии обогащения мелких классов сталеплавильных шлаков / В.Б. Чижевский, О.Е. Горлова, И.П. Захаров, Н.В. Сукинова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. – №10. – С. 235-237.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus:

1. Shadrnunova, I. V. The new paradigm of an environmentally-oriented resource-saving technologies for processing of mining /I. V. Shadrnunova, O. E. Gorlova, V. A. Zhilina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 687 (2019) 066048.

2. Abdrakhmanova, R.N. Adaptation of the SAVMIN process for mine water treatment / R.N. Abdrakhmanova, N.N. Orehkova, O.E. Gorlova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 687 (2019) 066077.

3. Gorlova, O.E. Development of deep and comprehensive processing processes of technogenic mineral raw materials in a view of sustainable development strategy / O.E. Gorlova, I.V. Shadrnunova V.A. Zhilina // IMPC 2018:– 29th International Mineral Proceedings Congress. – Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019. – P. 3279-3287.

4. Shadrunkova, I. V. Use of rheology modifiers to adapt storage of tailings of enrichment / I.V. Shadrunkova, O.E. Gorlova, V. Sh. Galyamov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 451 (2018) 012196.

5. Shadrunkova, I.V. Concentration tailings storage using rheology modifiers / I.V. Shadrunkova, O.E. Gorlova, V.Sh. Galyamov, V.S. Frolov // Obogashchenie Rud. – 2018. – No 2. – P. 48-54.

Монографии

1. Recovery of mining waste in the complex development of mineral resources: The monograph / Edited by V.A. Chanturia and I.V. Shadrunkova. – Moscow: Publishing house Sputnik +, 2019. –120 p.

2. Экологически ориентированная переработка горнопромышленных отходов: монография / Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Жилина В.А., Орехова Н.Н., Горлова О.Е., Зелинская Е.В., Федотов П.К., Толмачева Н.А., Ожогина Е.Г., Якушина О.А., Котова О.Б., Шумилова Л.В., Мязин В.П., Газалеева Г.И., Медяник Н.Л., Орешкин Д.В., Чекушина Т.В. – Москва: Изд-во «Спутник+», 2018. – 200 с.

3. Адаптация технологий сухой переработки горно-промышленных отходов: монография / Шадрунова И.В., Ожогина Е.Г., Орехова Н.Н., Горлова О.Е., Чекушина Т.В., Колодежная Е.В., Стефунько М.С., Воробьев К.А. – Екатеринбург, 2018. – 50 с.

4. Технология обогащения медных и медно-цинковых руд Урала: монография / Е.Г. Ожогина, Е.А. Горбатова, Г.И. Газалеева, И.В. Шадрунова, Л.А. Немчинова, О.Е. Горлова и др. / под общ. ред. акад. РАН В. А. Чантурия и д-ра техн. наук И. В. Шадруновой. – Москва: Наука, 2016. – 387 с.

5. Адаптация методов обогащения для доизвлечения золота из лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик: монография / И.В. Шадрунова, С.А. Провалов, О.Е. Горлова, Н.В. Фадеева. – М.: УРАН ИПКОН РАН, 2009. – 206 с.

Методические рекомендации

Виды и последовательность минералогических работ при технологических испытаниях техногенного сырья (текущие хвосты обогащения колчеданных руд): методические рекомендации НСОММИ №183 / Е.А. Горбатова, Е.Г. Ожогина, И.В. Шадрунова, О.Е. Горлова. – М.: ВИМС, 2014. – 29 с.

В прочих изданиях:

1. Гмызина, Н.В. Изучение свойств конвертерных шлаков с целью совершенствования технологии их переработки / Н.В. Гмызина, Н.А. Сединкина, О.Е. Горлова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – Т. 75. – № 5. – С.623-631.

2. Фадеева, Н.В. Опыт переработки графитсодержащей пыли металлургического производства / Н.В. Фадеева, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – Т. 75. – №5. – С.632-639.

3. Forming Conditions of Technogenic Gold-bearing Objects and Technological Properties of Gold from Gold Extraction Plant Tailings /I. Shadrunkova, O. Gorlova,

N. Orekhova, V. Zilina // *International Journal of Applied Engineering Reserch.* – 2018. – Vol.13. – No 2. – P. 6340-6347.

4. Развитие природоохранных технологий и технических средств для переработки труднообогатимого сырья / И.В. Шадрунова, Т.В. Чекушина, Е.В. Колодежная, О.Е. Горлова, Н.Н. Орехова, В.И. Ляшенко // *Экология и промышленность.* – 2017. – №3-4 (52-53). – С. 20-28.

5. Шадрунова, И.В. Разработка технологических решений интенсификации флотации медно-цинковых шлаков с использованием физико-химических эффектов при изменении характеристик водной фазы / И.В. Шадрунова, О.Е. Горлова, Л.А. Немчинова // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe.* – 2017. – № 12-3 (28). – С. 27-31.

6. Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий и технических средств для переработки труднообогатимого сырья / И.В. Шадрунова, Т.В. Чекушина, Е.В. Колодежная, О.Е. Горлова, Н.Н. Орехова, В.И. Ляшенко // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2016. – № 4. – С. 96-103.

7. Шадрунова, И.В. Особенности выбора технологических решений для вовлечения тонкодисперсного техногенного цинксодержащего сырья в рециклинг металлов / И.В. Шадрунова, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова // *Актуальные проблемы горного дела.* – 2016. – № 1. – С. 61-68.

8. Efficiency of use of collecting agents for increase of extraction values by copper, gold and silver flotation from complex slags of coppersmelting production / I. Shadrunova, M. Sabanova, N. Orekhova, O. Gorlova, T. Chekushina // *Metallurgical and Mining Industry.* – 2016. – No 7. – P. 69-75.

9. Resource-saving technologies and technical means for processing raw materials difficult for concentration / I.V. Shadrunova, E.V. Kolodezhnaya, O.E. Gorlova, T.V. Chekushina, N.N. Orekhova, V.I. Lyashenko // *Metallurgical and Mining Industry.* – 2016. – No 12. – P. 45-54.

10. Горлова, О.Е. Переработка и использование техногенных ресурсов черной металлургии / О.Е. Горлова, О.И. Клебан // *Наука и производство Урала.* – 2014. – № 10. – С. 113-115.

Остальные статьи общим количеством 32 опубликованы в материалах международных, всероссийских, региональных конференций.