

На правах рукописи



АЛЕКТОРОВ Роман Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
ПЕРЕРАБОТКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД
КАЧКАНАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ДИОКСИДА ТИТАНА**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель доктор технических наук
Дмитриев Андрей Николаевич

Официальные
оппоненты: Рощин Василий Ефимович,
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник, профессор кафедры
«Пирометаллургические процессы» Федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Южно-
Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»,
г. Челябинск

Нечкин Георгий Александрович,
кандидат технических наук, заведующий
лабораторией подготовки и качества железорудного
и минерального сырья Научно-исследовательского
центра подготовки сырья и руднотермических
процессов АО «Уральский институт металлов»,
г. Екатеринбург

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

Защита состоится «13» ноября 2020 г. в 12:00 на заседании диссертационного
совета Д 004.001.01 при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской
академии наук по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке
Уральского отделения Российской академии наук и на сайте Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии
Уральского отделения Российской академии наук <http://www.imet-uran.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Дмитриев Андрей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время уральская металлургия испытывает острый дефицит железорудного сырья для выплавки передельного чугуна. В то же время в недрах Урала имеются огромные запасы многокомпонентных титаномагнетитовых, ильменитовых и других руд. В этих рудах, кроме железа, находятся ванадий, титан и другие полезные элементы.

Крупнейшими запасами титаномагнетитовых руд характеризуется Качканарская группа месторождений, которую можно рассматривать как одно из наиболее мощных в России. Качканарская группа железорудных месторождений состоит из двух месторождений – Гусевогорского и собственно Качканарского (СКМ). На данный момент титаномагнетитовые руды Гусевогорского месторождения перерабатывает АО «ЕВРАЗ КГОК» с получением агломерата и окатышей. Далее АО «ЕВРАЗ НТМК» по схеме «доменная печь – конвертер» производит чугун, сталь и ванадиевый шлак, из которого АО «ЕВРАЗ Ванадий Тула» получает пентоксид ванадия, феррованадий и порошковую проволоку. Содержание диоксида титана (TiO_2) в железорудном концентрате текущего производства составляет 2,5 %, в доменном шлаке – до 11 %.

С ожидаемым вовлечением в эксплуатацию СКМ в ближайшие годы прогнозируется повышение содержания TiO_2 в железорудном концентрате до 3,5 %, а в доменном шлаке – до 15 %. В связи с этим создание технологии комплексной переработки руд Гусевогорского и СКМ месторождений с повышенным содержанием TiO_2 является актуальной проблемой для Уральского региона в настоящее время. Экономика и экологическая безопасность технологии будут определяться глубиной и широтой извлечения железа, титана, ванадия и сопутствующих элементов.

Степень разработанности темы исследования. В России имеется опыт промышленной переработки титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения с содержанием в них 1,23 % TiO_2 . В Китае имеется опыт промышленной переработки титаномагнетитовых руд месторождения Паньчжихуа с содержанием 11-12 % TiO_2 , в концентрате – около 13 %, а в доменном шлаке доменных печей комбината Panzhihua Iron and Steel Group (Pangang) – до 25 %. В России технология доменной плавки с таким содержанием диоксида титана в шлаке еще не освоена.

Объект исследования – титаномагнетитовые руды, концентраты, агломерат и окатыши, чугун и шлак.

Предмет исследования – технология переработки титаномагнетитовых руд.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка технологии переработки титаномагнетитовых руд Качканарского месторождения с повышенным содержанием диоксида титана.

Для достижения поставленной цели предполагается решить **задачи**:

1. Исследование и совершенствование технологии переработки титаномагнетитового концентрата текущего производства АО «ЕВРАЗ КГОК».

2. Исследование возможности отдельной добычи и переработки низкотитанистых (малотитанистых) и высокотитанистых (нормальнотитанистых) руд Гусевогорского месторождения.

3. Разработка элементов технологии переработки руд СКМ.

Научная новизна

1. Исследована и усовершенствована технология переработки железорудного концентрата Гусевогорского месторождения текущего производства.

2. Показана возможность отдельной переработки низкотитанистых (содержание TiO_2 1,38 %) и высокотитанистых (содержание TiO_2 1,58 %) руд Гусевогорского месторождения при их отдельной добыче по схеме «доменная печь – конвертер».

3. Установлено, что использование смеси концентратов в окатышах в соотношении 40 % низкотитанистого (Гусевогорское месторождение) и 60 % высокотитанистого (СКМ) не повлечет серьезных изменений в технологии доменной плавки (прогнозируемое содержание TiO_2 в шлаке при вводе в окатыши до 40 % концентрата СКМ составит 11,39 %).

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Установлено, что увеличение основности агломерата текущего производства с 2,1 до 2,4 приводит к повышению его индекса температурного разрушения за счет увеличения доли стабилизированной алюминием фазы $Ca_{2,3}Mg_{0,8}Al_{1,5}Fe_{8,3}Si_{1,1}O_{20}$ (SFCA).

2. Показано, что использование коллективного концентрата, полученного путем смешивания низкотитанистого и высокотитанистого концентратов Гусевогорского месторождения (содержание TiO_2 в коллективном концентрате

составит 2,765 %), приведет к увеличению содержания железа общего (64,55 против 61,40 %), что снизит энергозатраты на его переработку.

3. Лабораторными опытами и расчетными исследованиями установлено, что переработка высокотитанистого концентрата Гусевгорского месторождения (содержание TiO_2 3,41 %) по схеме «металлизация – электроплавка» приведет к получению шлака с содержанием TiO_2 , недостаточным для его переработки на пигментный диоксид титана или титановую губку (содержание TiO_2 в шлаке 22,88 %).

4. Предложена схема поэтапного перевода доменных печей АО «ЕВРАЗ НТМК» на плавку руд СКМ. Установлено, что увеличение содержания диоксида титана в окатышах по мере увеличения количества вводимого в них концентрата с повышенным содержанием TiO_2 не вызывает ухудшения в качестве подготовки железорудного сырья к доменной плавке.

Методология и методы исследования

Работа выполнена с использованием лабораторного оборудования ИМЕТ УрО РАН, центра коллективного пользования «Урал-М» и методик экспериментов, обеспечивающих воспроизводимость результатов. Отбор и подготовка проб осуществлялась в соответствии с ГОСТ 26136-84. Исследование магнитных свойств осуществлялось методами магнитометрии (вибрационный магнетометр Cryogenic CFS-9T-CVTI). Исследование минералогического состава железорудного сырья (концентрат, агломерат, окатыши) методами оптической микроскопии (микроскоп Olympus GX-51) и рентгенофазового анализа (дифрактометр рентгеновский Shimadzu).

Исследование металлургических характеристик железорудного сырья проводилось в соответствии с международными стандартами: восстановимость – ГОСТ 17212-84, прочность при восстановлении (индекс LTD) – ISO 13930, температуры размягчения и плавления – ГОСТ 26517-85, пористость – ГОСТ 25732-88, прочность на сбрасывание – ГОСТ 25471-82.

Расчет показателей доменной плавки выполнен с помощью балансовой логико-статистической модели и комплекса двумерных математических моделей доменного процесса, разработанных в ИМЕТ УрО РАН.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты изучения состава, структуры и свойств текущих концентратов и окускованного сырья (агломерат, окатыши) АО «ЕВРАЗ КГОК»

и полученных в лабораторных условиях из низко- и высокотитанистых разновидностей титаномагнетитовой руды.

2. Результаты изучения состава, структуры и свойств низко- и высокотитанистых разновидностей титаномагнетитовой руды Гусевгорского месторождения.

3. Результаты расчетов технико-экономических показателей доменной плавки агломерата и окатышей, полученных из низко- и высокотитанистых концентратов.

4. Элементы технологии доменной плавки титаномагнетитового железорудного сырья с повышенным содержанием диоксида титана.

Степень достоверности результатов

Достоверность экспериментальных результатов работы обеспечена применением комплекса современных методов исследования, воспроизводимостью результатов, согласованием результатов опытов с известными литературными данными.

Апробация работы

Материалы диссертации доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях и конгрессах: 9th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids – DSL-2013, 24-28 June, 2013, Madrid, Spain; International Symposium Control, Optimization and Automation in Mining, Minerals and Metal Processing, 25-28 August, 2013, San Diego, California, USA; 5 Уральский горнопромышленный форум, 1-3 октября, 2013, Екатеринбург, Россия; Научно-практическая конференция «Технологическая платформа «Твердые полезные ископаемые»: технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений», 1-3 октября, 2013, Екатеринбург, Россия; III Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2014), 26-29 марта, 2014, Екатеринбург, Россия; 10th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids – DSL-2014, 23-27 June, 2014, Paris, France; Shechtman International Symposium, 29 June – 4 July, 2014, Cancun, Mexico; IV Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2015), 26-27 марта, 2015, Екатеринбург, Россия; Научно-практическая конференция с международным участием и элементами школ молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с

использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР», 3-5 июня, 2015, Екатеринбург, Россия; Технический совет АО «ЕВРАЗ НТМК», 17 марта, 2016, Нижний Тагил, Россия; Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition, 06-10 November, 2016, Hainan-Island, China; 3rd European Steel Technology & Application Days, 26-29 June, 2016, Austria, Vienna; XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, 26-30 сентября, 2016, Екатеринбург, Россия; 13th international conference on diffusion in solids and liquids – DSL-2017, 26-30 June, 2017, Vienna, Austria; 14th international conference on diffusion in solids and liquids – DSL-2018, 25-29 June, 2018, Amsterdam, Netherlands; Международная научно-практическая конференция «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов», посвященной проблемам металлургической науки и промышленности и памяти известного ученого-металлурга, члена-корреспондента Академии наук РК, лауреата Государственной премии Республики Казахстан Булата Балтакаевича Бейсембаева, 27-29 сентября, 2018, Алматы, Казахстан; 77-й международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», 22-26 апреля, 2019, Магнитогорск, Россия; 15th International conference on diffusion in solids and liquids – DSL-2019, 24-28 June, 2019, Athens, Greece; XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, 9-13 сентября, 2019, Санкт-Петербург, Россия; International Conference On Material Science and Engineering – 2019, 09-10 October, 2019, Dubai, United Arab Emirates; International conference on Chemistry and Chemical Engineering – 2019, 09-10 October, 2019, Dubai, United Arab Emirates; 3 International Conference On Materials Science and Materials Chemistry – 2019, 14-15 October, 2019, Vienna, Austria; Международная научная конференция «Физико-химические основы металлургических процессов, имени академика А.М. Самарина», 25-28 ноября, 2019, Москва, Россия; XI конференция молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий», 27 февраля, 2020, Москва, Россия.

Личный вклад автора состоит в обосновании цели и задач исследования, планировании и выполнении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, обсуждении основных положений научного исследования и подготовке публикаций.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 38 работах, в числе которых 12 статей в изданиях из перечня ВАК (из них 9 статей в журналах, цитируемых в базах данных Web of Science и Scopus).

Связь диссертации с планами НИР. Исследование выполнено в рамках: государственных заданий ИМЕТ УрО РАН № 0396-2014-0008 «Разработка физико-химических и технологических основ энерго- и ресурсосберегающей переработки оксидного сырья и отходов с получением материалов с новыми свойствами» (2013-2015 гг.), № 0396-2015-0081 «Разработка физико-химических основ пирометаллургических процессов переработки железованадиевых руд с различным содержанием титана и ванадия» (2016-2018 гг.); Междисциплинарных проектов УрО РАН № 12-М-23457-2041 «Освоение недр Земли: перспективы расширения и комплексного освоения рудной минерально-сырьевой базы горно-металлургического комплекса Урала» (2012-2014 гг.), № 15-11-2345-27 «Освоение недр Земли: разработка комплексных методов оценки и технологической подготовки к глубокой переработке титансодержащих руд для развития минерально-сырьевой базы горно-металлургического комплекса Урала» (2015-2017 гг.), № 18-5-2345-56 «Освоение недр Земли: обоснование методов рудоподготовки для глубокой комплексной переработки минерального сырья и повышения эффективности производства металлопродукции» (2018-2020 гг.); хозяйственных договоров с предприятиями АО «ЕВРАЗ КГОК» (2015, 2017 гг.) и АО «ЕВРАЗ НТМК» (2015 г.); проекта РФФИ № 16-08-00062 (2016-2018 гг.).

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов п. 9 «Подготовка сырьевых материалов к металлургическим процессам и металлургические свойства сырья», п. 11 «Пирометаллургические процессы и агрегаты».

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 66 таблиц, список использованных источников включает 126 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, поставлена цель и сформулированы основные задачи исследования, научная новизна работы, ее практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

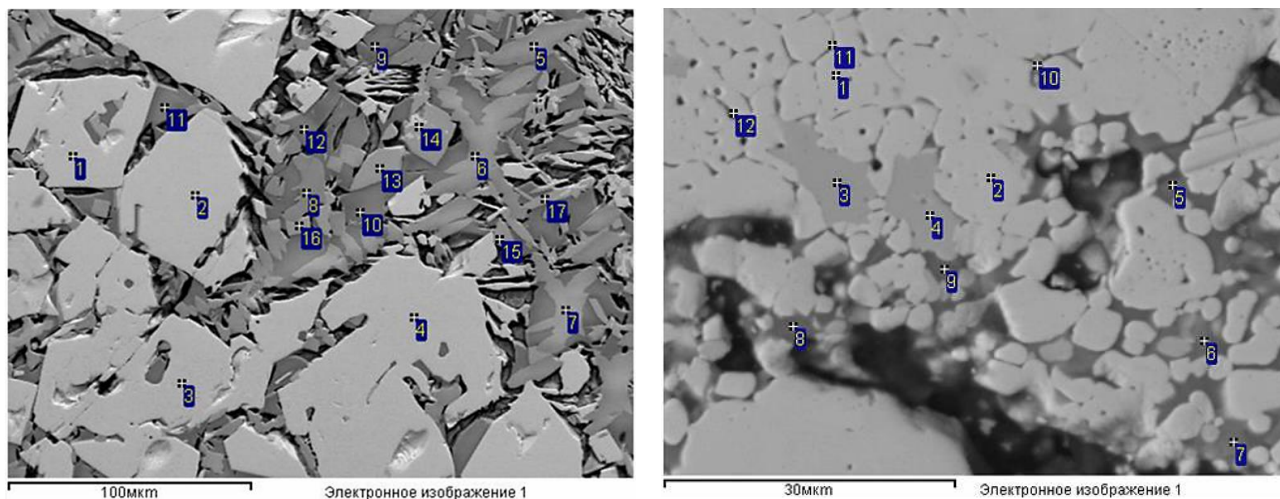
В первой главе на основе отечественных и зарубежных литературных данных изложены результаты аналитического обзора: классификация

титансодержащих руд месторождений России и других стран, технологии и схемы их переработки, а также особенности доменной плавки титаномагнетитов.

Во второй главе представлены результаты исследования и совершенствование технологии переработки концентрата Гусевогорского месторождения текущего производства.

Минералогический анализ выявил наличие в базовом железорудном агломерате фаз двухкальциевого силиката: нестабилизированной $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, ухудшающей его качество, и стабилизированной $\text{Ca}_{2,3}\text{Mg}_{0,8}\text{Al}_{1,5}\text{Fe}_{8,3}\text{Si}_{1,1}\text{O}_{20}$. Агломерат во время низкотемпературного восстановления практически весь разрушился (показатели $\text{LTD}_{-3,15}$ 63,96 % и $\text{LTD}_{-0,5}$ 28,76 %). Показатель прочности окатышей (+6,3 мм) в пределах 78 % также невысок (против более чем 85 % в среднем для окатышей); агломерата – 11,01 % (очень низкий). Также окатыши демонстрируют низкие показатели разрушаемости – более 6 % кл. -0,5 мм. В целом это ниже показателей горячей прочности окатышей других горно-перерабатывающих предприятий (например, окатышей АО «Михайловский ГОК», где этот показатель составляет в среднем около 2 %).

Локальный химический состав агломерата и окатышей представлен на рис. 1.



а
 1-4 – Fe_3O_4 ; 5-8 – $\text{CaO}\cdot\text{TiO}_2$;
 9-12 – $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{O}\cdot\text{SiO}_2$;
 13-17 – $\text{Ca}_{2,3}\text{Mg}_{0,8}\text{Al}_{1,5}\text{Fe}_{8,3}\text{Si}_{1,1}\text{O}_{20}$

б
 1-2 – Fe_2O_3 ; 3-4 – $\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$;
 5-7 – $\text{SiO}_2 + 2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$;
 8-9 – $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$;
 10-12 – $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$

Рисунок 1 – Локальный химический состав агломерата (а) и окатышей (б) в режиме BES ($\times 500$)

Анализ результатов исследования восстановимости окатышей и агломерата текущего производства показал, что значения 53,26 % для окатышей и 56,76 % для агломерата являются недостаточными и не соответствуют значениям восстановимости агломерата и окатышей других горно-перерабатывающих предприятий России (от 75 до 95 %). Результаты исследований температур начала размягчения и температурного интервала размягчения свидетельствуют о следующем. Желательная температура начала размягчения для доменного процесса составляет 1230-1240 °С. Этим условиям не удовлетворяет исследуемый агломерат, характеризующийся средними значениями 1060-1200 °С. Это определяет смещение зоны когезии вверх доменной печи. Температура начала размягчения окатышей составила 1130 °С. Температурный интервал размягчения составил для агломерата 140 °С, для окатышей – 200 °С. Это увеличивает протяженность зоны когезии в доменной печи и снижает производительность ее работы.

В таблице 1 представлены результаты исследования восстановимости, прочности при низкотемпературном восстановлении и температур начала и конца размягчения для окатышей и агломерата текущего производства.

Таблица 1 – Результаты исследований металлургических характеристик агломерата и окатышей, полученных из концентрата текущего производства

Показатель	Агломерат	Окатыши
Восстановимость, %	56,76	53,26
LTD+6,3, %	11,95	78,58
LTD-3,15, %	63,96	9,19
LTD-0,5, %	28,76	6,43
Температура начала размягчения, °С	1060	1130
Температура конца размягчения, °С	1200	1330
Температурный интервал размягчения, °С	140	200

Также исследованы металлургические характеристики агломерата АО «ЕВРАЗ КГОК» из концентрата текущего производства с различной основностью и добавками связующих полимеров (табл. 2). Установлено, что восстановимость агломерата основностью 2,4 по сравнению с 2,1 ниже на 10 %, что не противоречит полученным данным LTD: чем ниже восстановимость, тем выше горячая прочность. По LTD агломерат основностью 2,4 демонстрирует более высокие значения по всем трем показателям качества: +6,3, -3,15, -0,5. Так LTD_{+6,3} составил 13,68 %. Температуры начала и конца размягчения

агломерата с основностью 2,4 по сравнению с 2,1 увеличились на 80 °С. Интервал размягчения не изменился.

Добавка в агломерационную шихту полимерного связующего в количестве 500 г на тонну оказывает более значительное влияние на качество агломерата, чем добавка 300 г. Прочность агломерата при восстановлении значительно улучшилась по всем трем показателям. Так, LTD_{+6,3} составил 39,90 % против 11,01 % в базовом периоде. Следует обратить внимание на неравномерное распределение показателей качества по высоте слоя, наименьшим значением обладает агломерат из верхнего слоя. Восстановимость агломерата с добавкой полимерного связующего в количестве 300 г на тонну и, особенно, в количестве 500 г на тонну, повысилась до 64,90-69,61 %. Этот показатель близок к рекомендуемым для доменного процесса. Результаты определения температур размягчения и плавления для агломерата с полимерными добавками показывают снижение зоны когезии вниз по высоте и сужение температурного интервала, что в целом положительно скажется на работе доменной печи.

Таблица 2 – Результаты исследований металлургических характеристик агломерата с различной основностью и добавками связующих полимеров

Этап	Этап 1 (основность 2,1)	Этап 2 (основность 2,4)	Этап 3 (основность 2,4, полимерная добавка 300 г/т)	Этап 3 (основность 2,4, полимерная добавка 500 г/т)
Дата	Апрель-май 2015 г.	Июнь-июль 2015 г.	Август- сентябрь 2015 г.	Октябрь 2015 г.
Восстановимость, %	74,75	64,74	64,90	69,61
LTD _{+6,3} , %	11,01	13,68	12,57	39,90
Температура начала размягчения, °С	1060	1140	1140	1150
Температура конца размягчения, °С	1200	1280	1190	1220
Температурный интервал, °С	140	140	50	70

Результаты промышленных испытаний показали, что введение полимерной добавки в количестве 500 г/т оказало наибольшее влияние на прочность и температуры начала и конца размягчения.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал положительное влияние увеличения основности агломерата с 2,1 до 2,4 и введения полимерной добавки на его металлургические характеристики – горячую прочность, восстановимость, температуры размягчения и плавления. Расход кокса для доменных печей № 5 и 6 АО «ЕВРАЗ НТМК» при промышленных испытаниях снизился на 1,0-1,2 %.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований руд Качканарского месторождения для оценки возможности их дальнейшей металлургической переработки при отдельной добыче руд с различным содержанием TiO_2 . Проведен химический анализ руд и концентратов Гусевогорского месторождения (табл. 3), исследованы магнитные свойства концентратов путем измерения намагниченности. Показано соответствие химических составов по ванадию и титану концентратов высокотитанистого Главного карьера Гусевогорского месторождения и собственно Качканарского месторождения, а также некоторое различие магнитных свойств низкотитанистого и высокотитанистого концентратов и практически одинаковые магнитные свойства высокотитанистого и типичного концентрата из руды Гусевогорского месторождения (табл. 4).

Таблица 3 – Химический состав руд и концентратов Качканарского месторождения, %

Проба		Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	V ₂ O ₅
Руда	Текущее производство	16,70	–	12,34	15,20	38,8	13,7	5,52	0,17	1,28	0,130
	Главный карьер	15,89	0,12	10,19	–	38,08	11,75	5,22	0,21	1,58	0,179
	Западный карьер	16,78	0,16	8,65	–	39,03	11,28	8,64	0,18	1,38	0,200
Концентрат	Текущее производство	61,40	0,12	27,00	1,52	4,25	3,11	2,31	0,23	2,52	0,580
	Главный карьер	63,83	0,09	29,34	0,97	2,89	2,40	2,58	0,25	3,41	0,670
	Западный карьер	65,27	0,12	29,20	0,62	1,72	1,16	2,22	0,19	2,13	0,780

Таблица 4 – Магнитные характеристики образцов концентрата

Проба концентрата	Остаточная намагниченность m_0 , $см^3 \times Гс/Г$	Намагниченность насыщения m_s , $см^3 \times Гс/Г$	Коэрцитивная сила H_c , Э
Главный карьер	6,52	66,22	93,00
Западный карьер	5,12	70,45	82,00
Текущие производство	6,38	66,89	99,00

На рис. 2, а-г, приведена микроструктура кусков руды Гусевогорского месторождения – Западный карьер и Главный карьер (крупные зерна титаномагнетита, более мелкие (светлые) – ильменит, более мелкие (белые) – металлическое железо).

В лабораторных условиях получены железорудные окатыши (табл. 5). Результаты исследований свидетельствуют, в целом, о достаточно высоких металлургических характеристиках окатышей. Определенные в ходе проведения исследований металлургические характеристики железорудных окатышей являются достаточными для работы доменной печи и разработки мероприятий по внедрению их в производство.

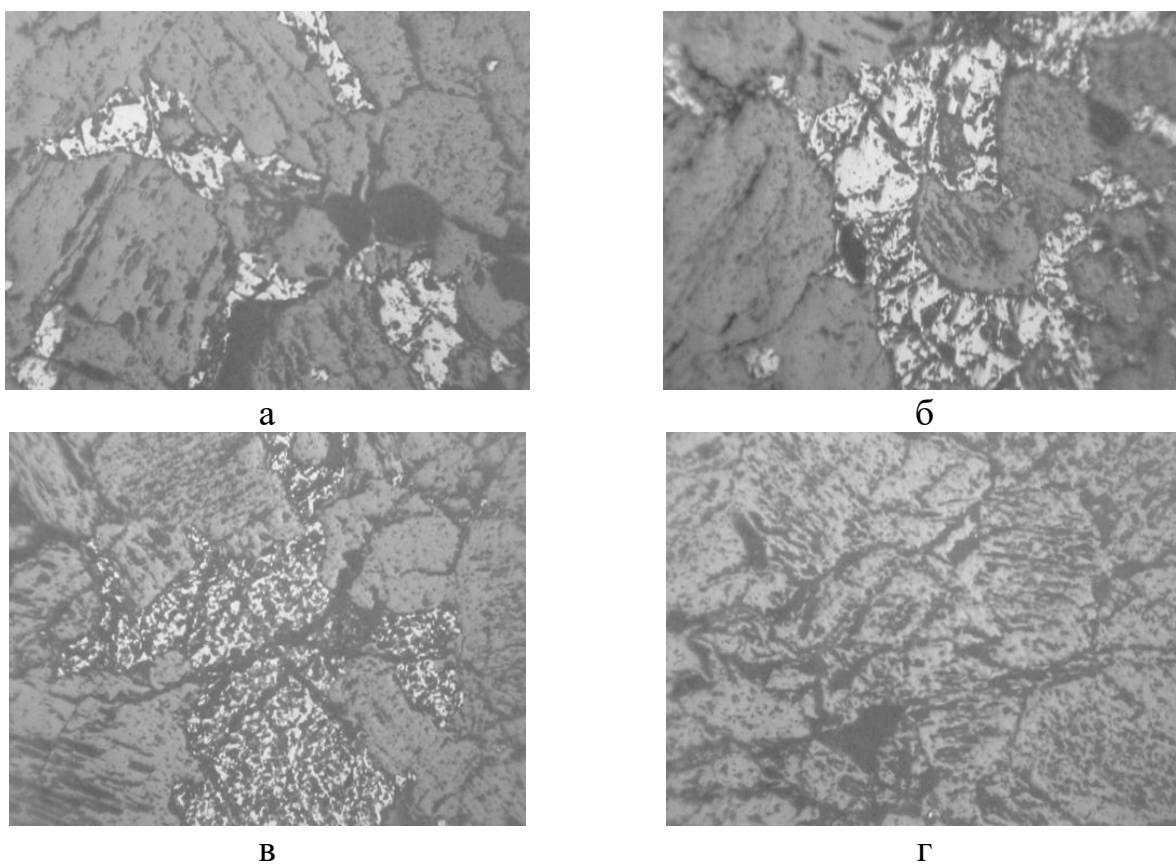


Рисунок 2 – Микроструктура титаномагнетитовой руды – Западный карьер (а-б) при TiO_2 1,40 %; Главный карьер (в-г) при TiO_2 1,58 %, увеличение $\times 50$

Методом математического моделирования с использованием балансовой логико-статистической модели показана возможность переработки этих концентратов по схеме «доменная – печь конвертер». При этом при доменной плавке низкотитанистого концентрата показатели принципиально не отличаются от существующих в настоящее время на АО «ЕВРАЗ НТМК». При доменной плавке высокотитанистого концентрата ожидаются технико-

экономические показатели, приближающиеся к показателям доменной плавки железорудного концентрата собственно Качканарского месторождения. В частности, содержание TiO_2 в доменном шлаке ожидается на уровне 15 % вместо 10 % в настоящее время (табл. 6). Такая технология доменной плавки в настоящее время в России не освоена и потребует дополнительных усилий по ее внедрению на АО «ЕВРАЗ НТМК».

Таблица 5 – Характеристики лабораторных окатышей

Параметр	ВТ	Г1-80	Г1-60	Г1-40	Г1-20	НТ	ТМ
Доля концентрата Главный карьер (ВТ), %	100	80	60	40	20	0	0
Доля концентрата Западный карьер (НТ), %	0	20	40	60	80	100	0
Доля концентрата текущего (ТМ), %	0	0	0	0	0	0	100
$Fe_{общ}$, %	60,35	62,48	63,28	63,67	63,78	65,00	59,50
CaO , %	0,87	1,33	1,27	1,25	1,14	0,83	1,35
SiO_2 , %	2,49	2,59	2,53	2,18	2,18	2,63	4,60
TiO_2 , %	3,44	2,87	2,84	2,52	2,40	2,13	2,58
V_2O_5 , %	0,665	0,62	0,69	0,74	0,76	0,76	0,497
Восстановимость, %	59,07	62,88	64,28	65,86	68,77	67,32	70,25
Индекс $LTD_{+6,3}$, %	90,35	97,10	94,61	97,61	97,86	89,92	87,56
Температура начала размягчения, °С	1210	1200	1210	1230	1230	1180	1220
Температура конца размягчения, °С	1300	1310	1290	1300	1315	1310	1300

Таблица 6 – Расчетные технико-экономические показатели в условиях ДП № 5 АО «ЕВРАЗ НТМК» (базовый вариант – июль 2013 г.)

Показатели	Ед. изм.	Базовый вариант	Высокотитанистый 100 %
Полезный объем печи	m^3	2200	2200
Производительность	т/сутки	7264	7210
Общий расход руды	кг/т чугуна	1724,1	1693,6
Общий расход топлива	кг/т чугуна	320,8	322,5
Выход шлака	кг/т чугуна	358,0	315,0
Состав шлака:			
CaO	%	32,55	28,91
MgO	%	12,97	13,49
SiO_2	%	26,68	23,69
Al_2O_3	%	15,15	17,05

Продолжение таблицы 6

Показатели	Ед. изм.	Базовый вариант	Высокотитанистый 100 %
TiO ₂	%	10,53	14,82
MnO	%	0,36	0,16
V ₂ O ₅	%	0,28	0,33
CaO/SiO ₂	доли ед.	1,22	1,22

Лабораторные опыты показали, что переработка высокотитанистого концентрата по схеме «металлизация – электроплавка» приведет к получению шлака с содержанием TiO₂, недостаточным для его переработки на пигментный диоксид титана или титановую губку (табл. 7).

Изучено получение коллективного концентрата путем смешивания низкотитанистого и высокотитанистого концентратов. При этом содержание Fe в коллективном концентрате будет более высоким по сравнению с концентратом текущего производства, а энергозатраты – более низкими.

Таблица 7 – Расчет показателей плавки металлизированных окатышей в руднотермической печи

Показатели	Ед. изм.	Вариант 1
Мощность печи	МВА	33,00
Производительность по металлу	т/сут	563,7
Расход железорудных компонентов	кг/т металла	1284,8
Окатыши КГОК ВТ металлизация 95%	кг/т металла	1284,8
Расход флюса	кг/т металла	0,00
Расход топлива	кг/т металла	24,90
Расход электродов	кг/т металла	20,80
Выход шлака	кг/т металла	231
Состав шлака:		
SiO ₂	%	21,20
CaO	%	9,64
MgO	%	14,26
Al ₂ O ₃	%	22,41
TiO ₂	%	22,88
V ₂ O ₅	%	0,90
MnO	%	0,04
CaO/SiO ₂	доли ед.	0,45

В четвертой главе предложена схема поэтапного перевода доменных печей АО «ЕВРАЗ НТМК» на плавку руд собственно Качканарского месторождения. В лабораторных условиях получены окатыши с соотношением

концентратов Качканарского (ВТ) и Гусевогорского (ТМ) месторождения от 0/100 до 100/0 % с шагом 20 % (табл. 8).

Установлено, что увеличение содержания диоксида титана в окатышах по мере увеличения количества, вводимого в них концентрата с повышенным содержанием TiO_2 не вызывает ухудшения в качестве подготовки железорудного сырья к доменной плавке. В то же время увеличивается прочность на сжатие сырых и сухих окатышей, прочность на сжатие обожженных при 1200-1300 °С окатышей. Увеличивается горячая прочность, увеличивается температура начала размягчения и снижается температурный интервал размягчения окатышей, что положительно скажется на основных технико-экономических показателях доменной плавки – расходе кокса и производительности (табл. 9). Расчетом доменной плавки по балансовой логико-статистической модели доменного процесса это подтверждено.

Таблица 8 – Химический состав обожженных окатышей

Доля ТМ, %	Доля ВТ, %	Проба окатышей	Содержание, %									
			Fe _{общ}	FeO	CaO	SiO ₂	V ₂ O ₅	TiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	
100	0	1	59,5	1,30	1,35	4,60	0,497	2,58	2,98	0,221	2,26	
80	20	2	60,04	2,98	1,12	4,20	0,536	2,75	2,85	0,224	2,34	
60	40	3	60,97	3,80	1,08	3,89	0,570	2,91	2,71	0,234	2,45	
40	60	4	60,60	3,11	0,943	3,40	0,607	3,11	2,57	0,231	2,55	
20	80	5	60,85	2,86	0,838	2,80	0,637	3,27	2,38	0,260	2,63	
0	100	6	60,35	3,17	0,873	2,49	0,665	3,44	2,24	0,260	2,70	

Таблица 9 – Metallургические характеристики лабораторных окатышей

Проба окатышей	Восстановимость, %	Индекс LTD _{+6,3} , %	Температура начала размягчения окатышей, °С	Температура конца размягчения окатышей, °С
1	70,26	87,56	1200	1310
2	77,19	85,76	1200	1320
3	72,76	90,72	1210	1300
4	62,74	87,08	1220	1310
5	62,49	86,49	1230	1320
6	59,08	90,35	1220	1300

Вариант смеси концентратов в окатышах в соотношении 60 % текущего и 40 % высокотитанистого не повлечет серьезных изменений в технологии доменной плавки (табл. 10).

Таблица 10 – Расчеты доменной плавки на базе ДП № 5 АО «ЕВРАЗ НТМК»

Показатель	Ед. изм.	База 2017	Текущий 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5	Вариант 6
Полезный объём печи	м ³	2200						
Производительность печи	т/сут	6 981	7 207	7 232	7 370	7 264	7 288	7 320
Общий расход руды	кг/т чугуна	1 691	1 714	1 706	1 692	1 697	1 692	1 699
Окатыши № 1	кг/т чугуна	0,00	850,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Окатыши № 2	кг/т чугуна	0,00	0,00	846,70	0,00	0,00	0,00	0,00
Окатыши № 3	кг/т чугуна	0,00	0,00	0,00	840,01	0,00	0,00	0,00
Окатыши № 4	кг/т чугуна	0,00	0,00	0,00	0,00	842,30	0,00	0,00
Окатыши № 5	кг/т чугуна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	840,03	0,00
Окатыши № 6	кг/т чугуна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	843,44
Расход кокса	кг/т чугуна	337,4	331,2	327,31	326,29	333,90	332,90	332,74
Состав шлака: (CaO)	%	32,45	31,82	31,61	31,77	31,53	31,26	30,99
(MgO)	%	12,86	13,84	13,75	13,42	13,29	13,13	12,98
(SiO ₂)	%	26,31	27,28	26,70	26,15	25,40	24,55	24,04
(TiO ₂)	%	10,93	10,55	11,06	11,39	12,05	12,73	13,34
(Al ₂ O ₃)	%	14,90	14,01	14,37	14,73	15,18	15,72	16,02
(MnO)	%	0,37	0,38	0,381	0,37	0,38	0,40	0,41
(V ₂ O ₅)	%	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30
Основность CaO/SiO ₂	%	1,23	1,16	1,18	1,21	1,24	1,27	1,29
Выход шлака	кг/т чугуна	352,2	370,6	363,2	351,2	354,6	346,8	351,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышенное содержание TiO₂ в шихте доменных печей, работающих на рудах Качканарского месторождения, усложняет технологию выплавки ванадиевого чугуна. В данной работе проведены исследования по переработке руд Качканарского месторождения с различным содержанием диоксида титана.

В результате исследований получены следующие результаты.

1. Исследована и усовершенствована технология переработки железорудного концентрата Гусевогорского месторождения текущего производства (содержание TiO_2 2,5 %). Подтверждено положительное влияние стабилизированной алюминием фазы двухкальциевого силиката $Ca_{2,3}Mg_{0,8}Al_{1,5}Fe_{8,3}Si_{1,1}O_{20}$ (SFCA) на прочность агломерата при восстановлении.

Результаты сквозных промышленных испытаний показали, что увеличение основности агломерата с 2,1 до 2,4 и введение полимерного связующего (в количестве 500 г/т агломерата) положительно влияют на комплекс его металлургических характеристик – прочность при восстановлении, восстановимость, температуры размягчения и плавления, а также позволяют снизить расход кокса в доменной плавке на 1,0-1,2 %.

2. Показана возможность отдельной добычи и переработки низкотитанистых (содержание TiO_2 1,38 %) и высокотитанистых (содержание TiO_2 1,58 %) руд Гусевогорского месторождения. Показано различие магнитных свойств концентратов, полученных из этих руд по существующей на АО «ЕВРАЗ КГОК» технологии обогащения.

Лабораторными исследованиями и методами математического моделирования показана возможность переработки низкотитанистого (содержание TiO_2 2,13 %) и высокотитанистого (содержание TiO_2 3,41 %) концентратов по схеме «доменная – печь конвертер». При доменной плавке высокотитанистого концентрата содержание TiO_2 в доменном шлаке ожидается на уровне 14,82 % против 10,53 % в настоящее время.

Лабораторные опыты и расчетные исследования показали, что переработка высокотитанистого концентрата (содержание TiO_2 3,41 %) по схеме «металлизация – электроплавка» приведет к получению шлака с содержанием TiO_2 , недостаточным для его переработки на пигментный диоксид титана или титановую губку (содержание TiO_2 в шлаке 22,88 %).

Предложено получение коллективного концентрата путем смешивания низкотитанистого и высокотитанистого концентратов (содержание TiO_2 в коллективном концентрате 2,765 %). При этом содержание Feобщ в коллективном концентрате будет более высоким по сравнению с концентратом текущего производства (64,55 против 61,4 %), а энергозатраты – более низкими.

3. Предложена схема поэтапного перевода доменных печей АО «ЕВРАЗ НТМК» на плавку руд Собственно Качканарского месторождения (СКМ). В лабораторных условиях получены и исследованы окатыши с соотношением

концентратов Качканарского и Гусевогорского месторождений от 0/100 до 100/0 % с шагом 20 %.

Установлено, что увеличение содержания диоксида титана в окатышах по мере увеличения количества вводимого в них концентрата с повышенным содержанием TiO_2 не вызывает ухудшения в качестве подготовки железорудного сырья к доменной плавке. Увеличивается прочность на сжатие сырых и сухих окатышей, прочность на сжатие обожженных окатышей. Увеличивается горячая прочность, увеличивается температура начала размягчения и снижается температурный интервал размягчения окатышей, что положительно скажется на основных технико-экономических показателях доменной плавки – расходе кокса и производительности.

Установлено, что вариант смеси концентратов в окатышах в соотношении 60 % текущего и 40 % высокотитанистого не повлечет серьезных изменений в технологии доменной плавки (прогнозируемое содержание диоксида титана в шлаке при вводе в окатыши до 40 % концентрата СКМ составит 11,39 %). Это подтверждено расчетами с помощью математических моделей.

Рекомендации для дальнейшего применения результатов работы

Разработанная технология переработки титаномагнетитовых руд качканарского месторождения АО «ЕВРАЗ КГОК» с повышенным содержанием диоксида титана может быть использована на АО «ЕВРАЗ КГОК» и АО «ЕВРАЗ НТМК» при вовлечении в эксплуатацию СКМ, а также основные выводы по работе могут быть распространены на другие горно-обогатительные и металлургические предприятия, использующие в качестве доменной шихты титаномагнетитовые железорудные материалы.

Основное содержание диссертации изложено в следующих печатных работах:

В научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Dmitriev, A.N. Reduction roasting of titaniferous ores / A.N. Dmitriev, R.V. Petukhov, G.Yu. Vitkina, E.A. Vyaznikova // Defect and Diffusion Forum. – 2019. – Vol. 391. – P. 215-220.
2. Dmitriev, A.N. Research of titaniferous ores melting and properties of cast iron and slag / A.N. Dmitriev, R.V. Petukhov, G.Yu. Vitkina, E.A. Vyaznikova // Defect and Diffusion Forum. – 2019. – Vol. 391. – P. 221-225.

3. Dmitriev, A.N. The physicochemical bases of the pyrometallurgical processing of the titanomagnetite ores / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, R.V. Petukhov // Pure and Applied Chemistry. – 2017. – Vol. 89. – № 10. – P. 1543-1551.
4. Dmitriev, A.N. Change in oxidizing and reduction roasting of complex iron-titanium ores / A.N. Dmitriev, R.V. Petukhov, G.Yu. Vitkina, A.V. Dolmatov, L.A. Ovchinnikova // Defect and Diffusion Forum. – 2017. – Vol. 380. – P. 181-185.
5. Dmitriev, A.N. The reduction processes of the titanium-containing iron ores treatment / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, Yu.A. Chesnokov, R.V. Petukhov, S.V. Kornilkov, A.E. Pelevin // Defect and Diffusion Forum. – 2016. – Vol. 369. – P. 6-11.
6. Dmitriev, A.N. The oxidizing roasting and reducing melting of titaniferous and conversion iron ores / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, R.V. Petukhov, L.A. Ovchinnikova // Defect and Diffusion Forum. – 2016. – Vol. 371. – P. 117-120.
7. Dmitriev, A.N. The characteristic of ores and concentrates at EVRAZ KGOK / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, R.V. Petukhov, S.V. Kornilkov, A.E. Pelevin, A.Ya. Fishman, T.V. Sapozhnikova, K.Yu. Shunyaev // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 834-836. – P. 364-369.
8. Dmitriev, A.N. Iron ore materials and coke quality characteristics and quantitative indicators of blast furnace smelting / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, Yu.A. Chesnokov, R.V. Petukhov // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2013. – Vol. 46. – Issue 16. – Part 1. – P. 307-311.
9. Dmitriev, A.N. Influence of iron ore materials softening interval on cohesive zone location and form in blast furnace / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, Yu.A. Chesnokov, R.V. Petukhov // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2013. – Vol. 46. – Issue 16. – Part 1. – P. 302-306.
10. Дмитриев, А.Н. Оценка показателей доменной плавки титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана / А.Н. Дмитриев, Г.Ю. Витькина, Р.В. Петухов, С.А. Петрова, Ю.А. Чесноков // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2019. – Т. 75. – № 2. – С. 154-166.
11. Дмитриев, А.Н. Подготовка к доменной плавке титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана / А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2017. – № 12 (1416). – С. 27-30.
12. Витькина, Г.Ю. Изучение металлургических свойств титаномагнетитового сырья / Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов,

Ю.А. Чесноков // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2015. – № 12 (1392). – С. 26-30.

В других изданиях:

13. Витькина, Г.Ю. Исследование кинетических характеристик многокомпонентного железорудного сырья при восстановлении / Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов // Сборник тезисов 77-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», 22-26 апреля, 2019. – Магнитогорск, Россия. – С. 17.

14. Дмитриев, А.Н. Физико-химические и теплофизические основы переработки титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана / А.Н. Дмитриев, Г.Ю. Витькина, Р.В. Петухов // Сборник докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, 9-13 сентября, 2019. – Санкт-Петербург, Россия. – С. 32.

15. Витькина, Г.Ю. Исследование металлургических характеристик титансодержащего минерального сырья с различным содержанием диоксида титана / Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, Р.В. Алекторов // Материалы научно-практической конференции «Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья», 6-8 ноября, 2019. – Екатеринбург, Россия. – С. 401-404.

16. Алекторов, Р.В. Исследование и совершенствование технологии переработки титаномагнетитового концентрата Гусевогорского месторождения текущего производства / Р.В. Алекторов, А.Н. Дмитриев, Г.Ю. Витькина // Сборник тезисов Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов, имени академика А.М. Самарина», 25-28 ноября, 2019. – Москва, Россия. – С. 65.

17. Dmitriev, A.N. Processing of titaniferous magnetite ores with various content of titanium dioxide / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, R.V. Petukhov // Journal of Material Sciences. – 2018. – Vol. 6. – P. 31.

18. Дмитриев, А.Н. Переработка титансодержащих руд с извлечением железа, ванадия, титана / А.Н. Дмитриев, С.В. Корнилков, Г.Ю. Витькина, Р.В. Петухов, А.Е. Пелевин // Материалы международной научно-практической конференции «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов», посвященной проблемам металлургической науки и

промышленности и памяти известного ученого-металлурга, члена-корреспондента Академии наук РК, лауреата Государственной премии Республики Казахстан Булата Балтакаевича Бейсембаева, 27-29 сентября, 2018. – Алматы, Казахстан. – С. 138-141.

19. Dmitriev, A.N. Blast furnace smelting of the titaniferous magnetite ores with the various content of titanium dioxide and quality of the agglomerated raw materials / A.N. Dmitriev, R.V. Petukhov, G.Yu. Vitkina // Proceedings of «3rd European Steel Technology & Application Days», 26-29 June, 2016. – Austria, Vienna. – P. 1542-1545.

20. Dmitriev, A.N. State-of-art and physicochemical bases of pyrometallurgical processing of titanomagnetite raw materials / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, R.V. Petukhov, L.A. Ovchinnikova // Proceedings of conference «Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition», 06-10 November, 2016. – Hainan-Island, China. – P. 114-121.

21. Витькина, Г.Ю. Изучение металлургических свойств титаномагнетитового сырья / Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов, Ю.А. Чесноков // Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием и элементами школ молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР», 3-5 июня, 2015. – Екатеринбург, Россия. – С. 150-154.

22. Петухов, Р.В. Оценка возможности переработки низкотитанистых и высокотитанистых концентратов Гусевогорского месторождения по схеме «доменная печь-конвертер» / Р.В. Петухов, А.Н. Дмитриев, Г.Ю. Витькина, Ю.А. Чесноков // Сборник докладов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2015), 26-27 марта, 2015. – Екатеринбург, Россия. – С. 274-278.

23. Dmitriev, A.N. Extraction Possibilities of the Iron, Titanium and Vanadium from Titanium-Containing Iron Ores / A.N. Dmitriev, S.V. Kornilkov, R.V. Petukhov, L.A. Ovchinnikova, V.E. Yermakova, G.Yu. Vitkina, Yu.A. Chesnokov // Proceedings of Sustainable Industrial Processing Summit (SIPS 2015): Gudenau Intl. Symp. Iron and Steel Making, 4-9 October 2015. – Montreal, Canada, 2015. – Vol. 2. – P. 235-250.

24. Dmitriev, A.N. Titanium ores and concentrates and their treatment / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, R.V. Petukhov, Yu.A. Chesnokov // Proceeding of

Shechtman International Symposium – 2014, 29 June – 4 July, 2014. – Cancun, Mexico. – P. 359-368.

25. Петухов, Р.В. Металлургическая оценка руд и концентратов качканарского месторождения / Р.В. Петухов, А.Н. Дмитриев, С.В. Корнилков, А.Е. Пелевин, Г.Ю. Витькина, Ю.А. Чесноков // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2014), 26-29 марта, 2014. – Екатеринбург, Россия. – С. 64-71.

26. Дмитриев, А.Н. Исследование титаномагнетитовых руд и концентратов качканарского месторождения / А.Н. Дмитриев, Г.Ю. Витькина, Р.В. Петухов, С.В. Корнилков, А.Е. Пелевин, Ю.А. Чесноков, С.А. Упоров // Доклады научно-практической конференции «Технологическая платформа «Твердые полезные ископаемые»: технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений», 1-3 октября, 2013. – Екатеринбург, Россия. – С. 28-34.

27. Дмитриев, А.Н. Исследование титаномагнетитовых руд и концентратов ОАО «ЕВРАЗ КГОК» / А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов, С.В. Корнилков, А.Е. Пелевин, Г.Ю. Витькина, Ю.А. Чесноков, С.А. Упоров, Т.В. Сапожникова, К.Ю. Шуняев // Сборник материалов 5-го Уральского Горнопромышленного форума, 1-3 октября, 2013. – Екатеринбург, Россия. – С. 132-133.

