

На правах рукописи



РЫБЕНКО ИННА АНАТОЛЬЕВНА

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ**

Специальность

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Новокузнецк - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор **Цымбал Валентин Павлович**.

Официальные оппоненты: **Дмитриев Андрей Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБУН «Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук», главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов;

Кожухов Алексей Александрович, доктор технических наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», заведующий кафедрой металлургии и металловедения им. С.П. Угаровой;

Зиатдинов Мансур Хузиахметович, доктор технических наук, доцент, СТПОБП «Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета», ведущий научный сотрудник лаборатории высокоэнергетических систем и новых технологий.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Защита состоится «24» декабря 2018 г. в 10⁰⁰ в ауд. 1П на заседании диссертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк Кемеровской области, ул. Кирова 42, ФГБОУ «СибГИУ». Факс (3843) 46-57-92. E-mail: ds21225201@sibsiu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», <http://www.sibsiu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.252.01
доктор технических наук, профессор



Нохрина Ольга Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Металлургия является одной из ресурсоемких отраслей промышленности. Необходимость снижения энергоемкости и материалоемкости металлургической продукции требует как совершенствования традиционных схем производства чугуна и стали, так и создания новых металлургических процессов и агрегатов, обеспечивающих прямое получение металлов. За последние 10 лет в мире построено и введено в эксплуатацию, а так же находится в стадии проектирования и разработки более 100 установок прямого восстановления. Перспективным в этом направлении является создание струйно-эмульсионных агрегатов, для которых характерны большие поверхности взаимодействия фаз и высокие скорости физико-химических взаимодействий. К таким процессам относится непрерывный металлургический процесс струйно-эмульсионного типа (СЭР), характеризующийся низкими себестоимостью, энергоемкостью и высокой экологичностью, обладающий универсальностью, позволяющей реализовать в одном агрегате различные технологии.

Также одним из перспективных направлений в металлургии является прямое восстановление металлов из оксидных материалов при легировании стали – одним из самых эффективных способов повышения качества металла и придания ему заданных эксплуатационных свойств. Извлечение легирующих элементов из рудных материалов по существующим технологиям связано с большими материальными и энергетическими затратами. Поскольку в современных условиях придается большое значение повышению качества стали и сплавов при снижении себестоимости производимой продукции, возникает необходимость разработки технологий легирования стали с применением более дешевых оксидных материалов, что позволит, в ряде случаев, исключить из процесса дорогостоящую стадию получения ферросплавов и лигатур.

Решение задач по совершенствованию существующих и разработке новых металлургических технологий связано, прежде всего, с исследованиями высокотемпературных процессов в сложных термодинамических системах с физико-химическими превращениями в равновесных и неравновесных условиях. Поскольку экспериментальные исследования, как правило, являются достаточно дорогими, а зачастую и неосуществимыми, то в этих условиях большое значение приобретает вычислительный эксперимент, который позволяет анализировать состояния и процессы и делать выводы о поведении исследуемых объектов на основании модельных представлений. В связи с этим актуальным является создание методов и инструментальных систем моделирования, позволяющих осуществлять многовариантные расчеты, проводить исследования и решать оптимизационные задачи, что откроет новые возможности для разработки и проектирования прогрессивных металлургических технологий.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом хозяйственных и госбюджетных НИР ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» в рамках: «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», подпрограмма: «Новые материалы», 2001–2002 гг., подпрограмма: «Производственные технологии», 2001–2004 гг.; двух грантов по направлению «Фундаментальные исследования

в области технических наук», раздел «Металлургия», 2001–2004 гг.; научно-исследовательской работы, проводимой по заданию Федерального агентства по образованию, 2004–2006 гг.; госбюджетной НИР: «Математические модели синергетических процессов прямого восстановления металлов в струйно-эмульсионных системах», 2007–2011 гг.; научно-исследовательской работы «Разработка научно-технических основ для создания технологии подготовки и сжигания суспензионного угольного топлива, приготовленного на основе отходов углеобогащения и пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса», 2011–2012 гг.; научно-исследовательской работы «Разработка комплекса моделей и программ глубокого использования энергии исходного топлива на основе агрегата типа СЭР», 2012–2014 гг.

Выполнение работы осуществлялось в рамках научной школы «Математическое моделирование, создание прикладных инструментальных систем и новых металлургических процессов и агрегатов на принципах самоорганизации», научным руководителем которой является Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В.П. Цымбал.

Цель работы

Повышение эффективности существующих и разработка новых ресурсосберегающих металлургических технологий прямого восстановления металлов с использованием метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации.

Основные задачи

1. Анализ современных металлургических технологий прямого получения металлов, а также подходов к их математическому моделированию и оптимизации.

2. Разработка методов и средств расчета оптимальных режимов ресурсосберегающих металлургических технологий:

– метода системного решения комплекса взаимосвязанных задач по определению оптимальных технологических режимов процессов прямого восстановления металлов;

– математических моделей для описания взаимосвязи параметров потоков и физико-химических процессов в металлургическом агрегате;

– инструментальной системы для осуществления многовариантных расчетов, исследования и оптимизации;

– методики термодинамического моделирования процессов восстановления металлов из оксидов в многокомпонентных системах.

3. Определение оптимальных условий восстановления металлов (*Fe, Mn, Ti, V, Ni*) в модельных термодинамических системах.

4. Разработка оптимальных режимов ресурсосберегающих технологий прямого восстановления железа и марганца в металлургическом агрегате струйно-эмульсионного типа.

5. Расчет и оптимизация технологических режимов процессов прямого легирования металла в дуговых электросталеплавильных печах и внепечной обработки стали с использованием оксидных материалов.

6. Внедрение результатов теоретических и экспериментальных исследо-

ваний в практику производства стали и прямого получения металлов из железосодержащих материалов, в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 22.03.02, 22.04.02 – Metallургия, 09.03.02, 09.04.02 – Информационные системы и технологии, 09.03.01, 09.04.01 – Информатика и вычислительная техника.

Научная новизна

1. Разработан метод системного решения комплекса взаимосвязанных задач по определению оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах и оптимальных режимов ресурсосберегающих металлургических технологий прямого получения металлов в агрегате СЭР и легирования стали с использованием оксидных материалов.

2. Разработана методика термодинамического моделирования для определения оптимальных условий восстановления металлов из оксидных систем, предложены показатели, отражающие окислительно-восстановительный потенциал не только расплава, но и объемлющей системы, в том числе газовой фазы рабочего пространства металлургического агрегата.

3. С использованием термодинамического моделирования получены новые количественные данные и определены:

– оптимальные соотношения компонентов в термодинамических системах $Fe-O-C$, $Fe-O-H-C$, $Fe-Mn-O-C$, обеспечивающие необходимый температурный режим и максимальную степень восстановления металлов;

– оптимальные термодинамические условия и соотношения компонентов в системе $Ti-Fe-C-O-Si-Al$, обеспечивающие полное восстановление железа и перевод высших оксидов титана в низшие без образования карбидов;

– тип, расходы восстановителей и температуры для реализации процессов восстановления никеля и ванадия из оксидов в модельных термодинамических системах.

4. Определены и научно обоснованы оптимальные параметры процессов восстановления никеля из никелевого концентрата и ванадия из конвертерного ванадиевого шлака, обеспечивающие максимальную степень извлечения металлов.

5. Разработан и реализован в инструментальной системе «Инжиниринг-металлургия» комплекс математических моделей, описывающих взаимосвязь параметров потоков и физико-химических процессов в агрегате струйно-эмульсионного типа, представленном как реактор текущего равновесия.

6. Разработаны теоретические основы новых технологий в агрегате струйно-эмульсионного типа: получения металла из чугуна и окалины; прямого восстановления металла из пылевидных железосодержащих материалов; получения марганцевых сплавов; переработки титано-магнетитовых концентратов; прямого восстановления железа с попутным получением высококалорийного синтез-газа.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты диссертации являются основой для разработки новых и совершенствования существующих ресурсосберегающих металлургических технологий, основанных на процессах прямого восстановления металлов.

1. Создана инструментальная система «Инжиниринг-Металлургия», представляющая взаимосвязанную систему математических моделей, методов оптимизации и баз данных, реализованная в виде комплекса программ применительно к решению широкого круга оптимизационных задач ряда металлургических технологий.

2. Для промышленного внедрения разработаны и апробированы на серии плавок в крупномасштабной опытной установке агрегата струйно-эмульсионного типа оптимальные режимы ресурсосберегающих технологий:

- получения металла из чугуна и окалина с возможностью переработки пылевидных железосодержащих материалов в струе чугуна;
- прямого восстановления металла из пылевидных руд и железосодержащих техногенных материалов без агломерации;
- получения марганцевых сплавов из бедных мелкофракционных карбонатных и оксидных руд;
- переработки титано-магнетитового концентрата с практически полным разделением железосодержащей и титансодержащей составляющих и получением титанистого шлака.

3. Для практического применения разработаны основы новой технологии прямого восстановления металлов с получением синтез-газа (Патент № 2371482 «Способ прямого восстановления металлов с получением синтез-газа и агрегат для его осуществления»).

4. Разработаны и апробированы в промышленных условиях оптимальные режимы ресурсосберегающей технологии прямого легирования стали никелем в дуговых электропечах с использованием никелевого концентрата.

5. Разработаны и внедрены в производство технология и оптимальные режимы внепечной обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком в ковше на выпуске металла и в агрегате «ковш-печь» с использованием коксика и ферросилиция.

Реализация результатов

Результаты исследования и оптимизации вариантов ресурсосберегающих металлургических технологий использованы:

- при разработке и промышленном апробировании технологий прямого получения металла из железосодержащих материалов на опытной установке агрегата струйно-эмульсионного типа, созданной в кислородно-конвертерном цехе № 2 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЗСМК);

- при разработке и освоении технологий переработки пылевидных марганцевых руд Селезеньского месторождения и получения марганцевых сплавов на ООО УК «Сибирская горно-металлургическая компания» (СГМК);

- при совершенствовании технологий выплавки стали 08(12)X18H10T с использованием никелевого концентрата в дуговой электропечи на ОАО «Сталь НК» и внепечной обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Инструментальная система «Инжиниринг-Металлургия», зарегистрированная в Федеральной службе по интеллектуальной собственности

(№ 2017617445), использована при разработке новых и совершенствовании существующих металлургических технологий.

Результаты диссертации используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям подготовки 09.03.02, 09.04.02 – Информационные системы и технологии, 09.03.01, 09.04.01 – Информатика и вычислительная техника и 22.03.02, 22.04.02 – Металлургия.

Внедрение результатов работы в производство и учебный процесс подтверждается соответствующими актами и справками о внедрении.

Методология и методы исследований

Методология работы основана на концепции разработки новых и совершенствовании существующих металлургических технологий на базе математического моделирования, решении оптимизационных задач, экспериментальных исследований и промышленных испытаний.

Для достижения поставленной цели и решения задач в рамках диссертации использовались следующие методы: химического, рентгенофазового и спектрального анализа для определения химического и фазового состава исходных и полученных материалов при экспериментальных исследованиях; термодинамического и математического моделирования; синергетики и неравновесной термодинамики, оптимизации – исследования пространства параметров объекта и сопряженного приведенного градиента.

Достоверность полученных результатов подтверждается совместным использованием современных методов термодинамического анализа, математического моделирования и оптимизации; сходимостью результатов теоретических исследований с результатами лабораторных и промышленных экспериментов; адекватностью математических моделей, проверенной путём сопоставления расчётных данных с результатами лабораторных и промышленных испытаний.

На защиту выносятся:

1. Метод определения оптимальных условий протекания процессов в термодинамических системах и оптимальных режимов металлургических технологий прямого восстановления металлов, особенностью которого является решение комплекса взаимосвязанных оптимизационных задач.

2. Методика термодинамического моделирования и совокупность показателей, характеризующих окислительно-восстановительный потенциал системы.

3. Математические модели, отражающие взаимосвязь параметров входных-выходных потоков и физико-химических процессов в металлургическом агрегате, представленном как реактор текущего равновесия.

4. Инструментальная система «Инжиниринг-Металлургия», представляющая собой комплекс моделей, программ и баз данных для реализации многовариантных расчетов, исследования и решения задач оптимизации при проектировании металлургических технологий.

5. Результаты теоретических исследований и оптимизации процессов восстановления металлов в модельных системах $Fe-O-C$, $Fe-O-H-C$, $Fe-Mn-O-C$, $Ti-Fe-C-O-Si-Al$, $Fe-C-O-Ni$, $Fe-C-O-Si-V$, полученные с использованием методики термодинамического моделирования.

6. Результаты термодинамического моделирования и экспериментального исследования процессов восстановления металлов из оксидных систем: никеля из никелевого концентрата и ванадия из конвертерного ванадиевого шлака, обеспечивающие максимальную степень извлечения металлов.

7. Оптимальные режимы технологий, реализуемых в агрегате струйно-эмульсионного типа: получения стали из чугуна и окалины, прямого получения металла из пылевидных руд и железосодержащих техногенных материалов; получения марганцевых сплавов; переработки титано-магнетитовых концентратов.

8. Технологические основы прямого восстановления железа в агрегате СЭР с получением попутного синтез-газа.

9. Оптимальные технологические режимы процессов легирования стали никелем в дуговой электропечи с использованием никелевого концентрата и внепечной обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком.

Личный вклад автора заключается: в создании метода системного решения комплекса взаимосвязанных задач для определения оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах и оптимальных режимов ресурсосберегающих металлургических технологий; разработке методики термодинамического моделирования и комплекса показателей, отражающих окислительно-восстановительный потенциал системы; разработке математических моделей описания взаимосвязи параметров потоков и физико-химических процессов в агрегате струйно-эмульсионного типа; создании комплекса программ и баз данных «Инжиниринг-Металлургия»; определении оптимальных условий реализации процессов восстановления металлов в модельных термодинамических системах и из оксидных систем – никеля из никелевого концентрата и ванадия из конвертерного ванадиевого шлака; определении оптимальных режимов ресурсосберегающих технологий в агрегате СЭР – получения металла из чугуна и окалины, прямого получения железа, переработки марганцевых и титано-магнетитовых концентратов; разработке технологии прямого получения железа в агрегате струйно-эмульсионного типа с попутным получением синтез-газа; определении оптимальных технологических режимов процессов легирования стали никелем в дуговой электропечи с применением никелевого концентрата и внепечной обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.16.02. – Металлургия черных, цветных и редких металлов: п. 4 «Термодинамика и кинетика металлургических процессов», п. 5 «Металлургические системы и коллективное поведение в них различных элементов», п. 17 «Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов», п. 20 «Математические модели процессов производства черных, цветных и редких металлов».

Апробация работы

Основные результаты работы доложены на 50 конференциях, семинарах, совещаниях и конгрессах, в том числе: Всероссийская научно-практическая конференция «Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие техно-

логии в металлургии» (Новокузнецк, 2001, 2006, 2011); Всероссийская научно-практическая конференция «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2001, 2007, 2011, 2017); Международная научно-практическая конференция «Металлургия России на рубеже XXI века» (Новокузнецк, 2005); Международная научно-практическая конференция «Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе» (Новокузнецк, 2005); Всероссийская научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, управление, инновации и качество» (Новокузнецк, 2006, 2011, 2013); Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Томск, 2009, 2011); Международная научно-практическая конференция «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло» (Екатеринбург, 2014); XIII Международный конгресс сталеплавателей (Полевской, 2014); Международная научно-практическая конференция «Современная наука: теоретический и практический взгляд» (Уфа, 2015); Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2015, 2017); 2015 Sustainable industrial processing Summit (Montreal, 2015, 2016); IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (Новокузнецк, 2016); Conf. Series: Materials Science and Engineering 150 (2016); Conf. Series: Earth and Environmental Science 45 (2016), IV Международный конгресс сталеплавателей (Электросталь, 2016); Международная XVII конференция «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Челябинск, 2017); II Международная научно-практическая конференция «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности» (Екатеринбург, 2018); Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии и стратегии развития промышленности» (Екатеринбург, 2018).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 111 печатных работ, в том числе 17 – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатских и докторских диссертаций, и 12 – в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science, а также 4 монографии, 1 патент Российской Федерации и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложений. Изложена на 327 страницах, содержит 88 рисунков, 59 таблиц, список литературы из 357 наименований, 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы.

1 Анализ современных технологий прямого получения металлов, подходов к их моделированию и оптимизации

В первой главе проведен литературный анализ по теме исследования. Рассмотрены современные ресурсосберегающие технологии прямого получения металлов, существующие подходы к их моделированию, методики расчета энергетических балансов, методы и инструментальные системы термодинамического моделирования, способы решения многокритериальных оптимизационных задач.

Следует отметить большой вклад уральской научной школы, основанной В.И. Китаевым, в область развития математического моделирования металлургических процессов. Творческим коллективом этой школы разработаны и реализованы с использованием современных технологий, программных средств и численных методов математические модели с учётом особенностей теплового, газодинамического, шлакового режимов и механики движения материалов для широкого спектра металлургических технологий. Также большой интерес представляют работы авторского коллектива под руководством Э.Э. Меркера (г. Старый Оскол) по математическому моделированию и исследованию процессов нагрева, обезуглероживания и управлению шлаковым режимом в дуговой сталеплавильной печи. В плане разработки новых технологий следует отметить работы по развитию теоретических и технологических основ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и использования его в металлургии. В создание инструментальных систем термодинамического моделирования и электронных баз данных большой вклад внес творческий коллектив НГТУ им. Н.Э. Баумана по руководством Б.Г. Трусова.

С точки зрения энергоэффективности наиболее перспективными являются процессы в струйно-эмульсионных системах, для которых характерны высокие скорости физико-химических превращений и большие поверхности взаимодействия фаз. Высокая степень диспергации шихты позволяет создавать газозвесь или эмульсию, для описания состояния которой с достаточной степенью приближения выполняются основные допущения классической термодинамики. Благодаря созданию вынужденного движения рабочей смеси в замкнутой системе, имеется возможность поддерживать процесс в стационарном режиме, а струйно-эмульсионный агрегат рассматривать как реактор текущего равновесия, для математического описания которого допустимо использование фундаментальных законов термодинамики, позволяющих решать две важные для металлургии группы задач: составление энергетических балансов и определение характеристик равновесного состояния.

В настоящее время существует более 100 программ, реализующих расчеты термодинамического равновесия, однако они имеют узкую область приме-

нения, могут быть использованы только для конкретного типа задач в определенной области знаний и не позволяют решать оптимизационные задачи.

Поэтому при совершенствовании существующих и разработке новых ресурсосберегающих металлургических технологий прямого восстановления металлов необходимо решить комплекс задач, направленных на создание средств повышения эффективности исследований – математических моделей, метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации, методик исследования, которые позволят определить оптимальные условия реализации процессов восстановления металлов в модельных системах, оптимальные режимы технологий в агрегате струйно-эмульсионного типа, технологий прямого легирования металла с использованием оксидных материалов и других.

2 Разработка метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации

Для достижения поставленной в диссертации цели разработан метод, особенностью которого является системное решение комплекса взаимосвязанных оптимизационных задач по определению наилучших условий реализации металлургических технологий и путей достижения этих условий. Метод включает ряд этапов (рисунок 1).

На первом этапе в результате формулировки цели и постановки задачи формируются целевые условия, включающие выбор типа процесса, вида задачи и системы критериев оптимизации.

На втором этапе выделения объекта исследования осуществляется задание параметров входных-выходных потоков, параметров процесса и описание стадий и подпроцессов.

На третьем этапе при определении оптимальных параметров металлургической системы выделяются области протекания окислительно-восстановительных процессов, производится оценка конечного равновесного состояния, решается задача оптимизации по определению наилучших условий реализации процессов восстановления металлов из оксидов в модельных системах и проводятся лабораторные эксперименты.

На четвертом этапе осуществляется разработка металлургической технологии путем нахождения оптимальных режимов и определения путей достижения этих режимов для заданных параметров выходного потока и процесса при оптимизации технико-экономических показателей и также проводятся лабораторные эксперименты.

На последнем пятом этапе реализуется апробирование и отладка технологий в промышленных условиях.

Для решения задач по определению оптимальных параметров сложной многокомпонентной металлургической системы предложен метод термодинамического моделирования, основанный на поиске принципа максимума энтропии. Для реализации метода разработана методика, включающая следующие этапы: выделение областей протекания окислительных и восстановительных процессов; определение условий осуществления моделируемого процесса – диапазона температур, расходных показателей, составов газовой фазы; формирование параметров входного потока, обеспечивающих достижение необходи-

мых условий реализации процесса и оптимизацию параметров входного потока и системы при заданных условиях осуществления процесса.



Рисунок 1 – Этапы, задачи и результаты метода моделирования и оптимизации

Для характеристики свойств термодинамической системы разработан комплекс показателей, отражающих окислительно-восстановительный потенциал не только расплава, но и объемлющей системы, в том числе газовой фазы рабочего пространства агрегата:

- окислительный потенциал газовой фазы α , определяемый как отноше-

ние количества газообразного кислорода к количеству углерода в веществах газовой фазы:

$$\alpha = m/k; \quad (1)$$

– окислительный потенциал системы α^* – отношение количества газообразного кислорода к общему количеству углерода в системе:

$$\alpha^* = m/(n + k); \quad (2)$$

– восстановительный потенциал газовой фазы Z , как отношение суммы концентраций CO и H_2 к суммарному содержанию $\{CO\}$, $\{H_2\}$, $\{CO_2\}$, $\{H_2O\}$ в газовой фазе:

$$Z = \frac{\{CO\} + \{H_2\}}{\{CO\} + \{H_2\} + \{CO_2\} + \{H_2O\}} \cdot 100\%; \quad (3)$$

– показатель γ , характеризующий окислительный потенциал системы и учитывающий количество кислорода в оксидах:

$$\gamma = (m + p)/(n + k), \quad (4)$$

где m – количество газообразного кислорода, моль; k – количество углерода в веществах газовой фазы, моль; n – количество конденсированного углерода, моль; p – количество кислорода в оксидах, моль.

В качестве инструмента при выполнении вычислительных экспериментов на этапе термодинамического моделирования выбран программный комплекс «Терра», созданный в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, а также модифицированная версия предыдущего варианта программы «Терра» – «АвтоАстра», позволяющая осуществлять уникальные расчеты по определению условий реализации процессов, в частности, равновесных температур, что открыло дополнительные возможности при проектировании новых технологий.

Термодинамическое моделирование реализовано для модельных систем с использованием метода векторной оптимизации – исследования пространства параметров объекта, заключающегося в нахождении допустимой реализуемой области в результате многовариантных расчетов равновесных составов конечного состояния системы, анализе результатов и выборе оптимального варианта. Для подтверждения полученных на данном этапе результатов предусмотрено проведение лабораторных экспериментов.

По результатам термодинамического моделирования формируются исходные данные для реализации четвертого этапа, в рамках которого разработан комплекс математических моделей для описания взаимосвязи параметров входных-выходных потоков и физико-химических процессов в металлургическом агрегате.

Математические модели включают расчеты материального и теплового балансов, определение термодинамических функций и параметров веществ, химических реакций, а также активностей компонентов фаз.

Уравнения материального баланса строили на основе закона сохранения масс относительно составляющих гетерогенной системы. Получены уравнения для баланса масс потоков, веществ и элементов.

Уравнение материального баланса входных-выходных потоков имеет вид:

$$\sum_{k=1}^{K^f} G_k^f + \sum_{k=1}^{K^2} G_k^2 = \sum_{l=1}^{L^f} G_l^f + G^2, \quad (5)$$

где K^f, K^2 и G_k^f, G_k^2 – количество и массовый расход соответственно конденсированных и газообразных входных потоков; L^f – количество конденсированных выходных потоков; G_l^f и G^2 – массовый выход соответственно l -го конденсированного и газообразного выходных потоков.

Баланс на уровне потоков веществ представлен уравнением:

$$\sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f / R_m / k}{100} + \sum_{k=1}^{K^2} \sum_{m=1}^{N_k^2} \frac{G_k^2 \{R_m\}_k}{100} = \sum_{l=1}^{L^f} \sum_{n=1}^{N_l^f} \frac{G_l^f / R_n / l}{100} + \sum_{n=1}^{N_2} \frac{G^2 \{R_n\}}{100}, \quad (6)$$

где N_k^f, N_k^2 – количество веществ в k -ом конденсированном и k -ом газообразном входных потоках; $/R_m/k, \{R_m\}_k$ – содержание вещества R_m в k -ом конденсированном и k -ом газообразном входных потоках, %; N_l^f, N^2 – количество веществ в l -ом конденсированном и газообразном выходных потоках; $/R_n/l, \{R_n\}$ – содержание вещества R_n в l -ом конденсированном и газообразном выходных потоках, %.

Уравнения баланса по каждому элементу E_i , который может присутствовать в разных фазах в виде различных соединений, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^{E_i^f}} \frac{G_k^f / E_{ix_m} E_{jy_m} / k}{100} \cdot \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}} + \sum_{k=1}^{K^2} \sum_{m=1}^{N_k^{E_i^2}} \frac{G_k^2 \{E_{ix_m} E_{jy_m}\}_k}{100} \cdot \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}} = \\ = \sum_{l=1}^{L^f} \sum_{n=1}^{N_l^{E_i^f}} \frac{G_l^f / E_{ix_n} E_{jy_n} / l}{100} \cdot \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}} + \sum_{n=1}^{N_l^{E_i^2}} \frac{G_l^2 \{E_{ix_n} E_{jy_n}\}_l}{100} \cdot \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $/E_{ix_m} E_{jy_m} / k, \{E_{ix_m} E_{jy_m}\}_k$ – концентрация m -го вещества, содержащего элемент E_i в k -ом конденсированном либо газообразном входном потоке соответственно, %; $/E_{ix_n} E_{jy_n} / l, \{E_{ix_n} E_{jy_n}\}_l$ – концентрация n -го вещества, содержащего элемент E_i в l -ом конденсированном либо газообразном выходном потоке, %; $N_k^{E_i^f}, N_k^{E_i^2}$ – количество веществ, содержащих элемент E_i в k -ом конденсированном и газообразном входном потоке соответственно; $N_l^{E_i^f}, N_l^{E_i^2}$ – количество веществ, содержащих элемент E_i в l -ом конденсированном и газообразном выходном потоке; x_m, y_m, x_n, y_n – стехиометрические коэффициенты m -го и n -го соединений элемента E_i ; $M_{E_i}, M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}, M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}$ – молярные массы элемента E_i и его соединений, кг/моль.

Основными определяющими процессами для теплового состояния являются приток и отток тепла через входные и выходные материальные потоки, теплообмен с окружающей средой и химические реакции с соответствующими тепловыми эффектами:

$$\sum_{k=1}^{K^f} G_k^f \Delta H_k^f + \sum_{k=1}^{K^2} G_k^2 \Delta H_k^2 + Q_{умч} = \sum_{l=1}^{L^f} G_l^f \Delta H_l^f + G^2 \Delta H^2 + \sum \Delta H_{x.p.} + Q_{ном}, \quad (8)$$

где $\Delta H_k^f, \Delta H_k^z, \Delta H_l^f, \Delta H^z$ – изменение удельных энтальпий входных-выходных потоков при нагреве от 298 К до T , кДж/кг; Q_{uct} – приход тепла внешних источников, кДж; Q_{nom} – тепловые потери в окружающую среду, кДж; $\Sigma \Delta H_{x.p.}$ – суммарный тепловой эффект независимых реакций перехода системы из начального состояния в конечное, кДж.

Уравнение (8) с учетом обозначений, приведенных выше, представлено следующим образом:

$$\sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} (\Delta H_T^0)_m \frac{G_k^f / R_m / k}{100 \cdot M_{R_m}} + \sum_{k=1}^{K^z} \sum_{m=1}^{N_k^z} (\Delta H_T^0)_m \frac{G_k^z \{R_m\}_k}{100 \cdot M_{R_m}} + Q_{uct} =$$

$$= \sum_{l=1}^{L^f} G_l^f \Delta H_l^f + G^z \Delta H^z + \sum_{w=1}^W \Delta H_w^0 \left(\sum_{k=1}^K \frac{G_k R_{kw}}{100} - \sum_{l=1}^L \frac{G_l R_{lw}}{100} \right) + Q_{nom}. \quad (9)$$

где W – число независимых реакций в системе; $(\Delta H_T^0)_m, (\Delta H_T^0)_n$ – изменение удельных энтальпий веществ R_m и R_n при нагреве от 298 К до заданной температуры T с учетом фазовых переходов, кДж/моль; ΔH_w^0 – тепловой эффект w -ой химической реакции, кДж/моль.

Используемые в моделях термодинамические функции веществ и химических реакций рассчитываются при любой температуре в диапазоне от 298 до 6000 К с учетом фазовых переходов на основе справочных данных. При определении активностей компонентов шлака предусмотрена возможность использования следующих моделей строения фаз: теории коллективизированных электронов А.Г. Пономаренко и теории регулярных ионных растворов В.А. Кожеурова. Для расчета активностей компонентов металла используется теория К. Вагнера.

Математические модели реализованы в инструментальной системе «Инжиниринг-металлургия» (рисунок 2), зарегистрированной в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (№ 2017617445). Система разработана средствами MS Excel и Delphi путем осуществления связей и математических расчетов между элементами совокупности таблиц и применения встроенного программного сервиса Solver и представляет собой комплекс программ и баз данных, адаптированных для ряда металлургических технологий.

Инструментальная система состоит из блоков, позволяющих в интерактивном режиме вводить исходные данные по расходам, температуре, химическому составу материалов и технологическим параметрам процесса, рассчитывать все стадии и подпроцессы, материальный и тепловой балансы, определять энтальпии входных-выходных потоков, рассчитывать активности компонентов фаз, термодинамические характеристики химических реакций и технико-экономические показатели процесса.

Для разработанных программ с использованием ряда справочников созданы следующие базы данных: «Химический состав материалов», «Термодинамические свойства индивидуальных веществ», «Параметры взаимодействия 1-го порядка», «Атомные параметры», «Термодинамические характеристики реакций фазовых переходов и растворения элементов», «Удельные энергоемкости». Для согласования и передачи данных в другие модули системы разработаны соответствующие интерфейсы.

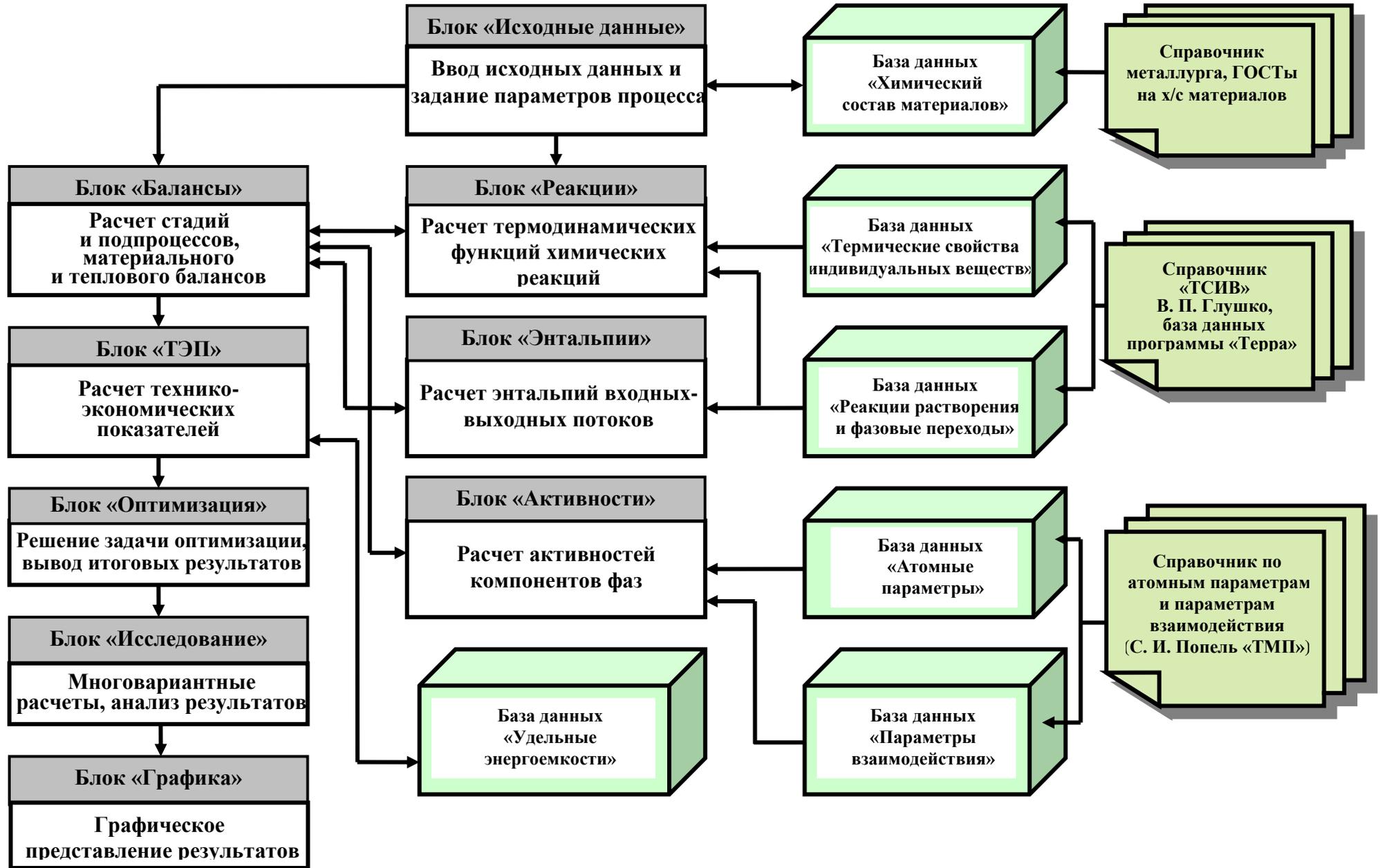


Рисунок 2 – Схема инструментальной системы «Инжиниринг-Металлургия»

С использованием инструментальной системы можно проводить исследования путем реализации многовариантных расчетов с представлением информации в удобном для пользователя виде, решать прямую и обратную задачи, строить зависимости различных показателей от требуемых параметров и решать оптимизационные задачи по различным критериям.

Определение оптимальных технологических режимов металлургических процессов производится по следующему алгоритму. После формирования исходных данных рассчитываются все стадии и подпроцессы для заданного варианта технологии: горение топлива, выделение и горение летучих компонентов, испарение влаги, разложение карбонатов, окислительно-восстановительные процессы, шлакообразование. Осуществляется расчет материального баланса процесса на уровне потоков, веществ и элементов и определяются массы и химический состав продуктов – металла, шлака, газа. Производится термодинамический анализ независимых химических реакций перехода системы из начального состояния в конечное. Определяются энтальпии входных и выходных потоков и изменение энтальпии системы в результате протекания химических реакций, после чего рассчитывается тепловой баланс и определяется температура металла, шлака и газа. Рассчитываются технико-экономические показатели, и решается задача оптимизации по формальным критериям.

Постановка оптимизационной задачи заключается в определении управляющих воздействий на процесс путем поиска экстремума требуемого критерия при соблюдении системы ограничений. В качестве критериев может быть выбран один из показателей: суммарный расход шихтовых материалов на единицу продукции, себестоимость, энергоемкость или производительность агрегата. В систему ограничений входят требования к составу получаемого продукта, диапазоны изменения расходов компонентов входных потоков и параметров состояния системы, соблюдение закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов, соблюдение закона сохранения энергии, выполнение целевых условий по остальным критериям. Задача оптимизации решается методом обобщенного приведенного градиента.

Таким образом, при реализации этапов разработанного метода осуществляется двухконтурная оптимизация (рисунок 3) путем решения оптимизационных задач двух видов: нахождение оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах и определение оптимальных режимов технологий прямого восстановления металлов. В рамках первого контура проведены исследования и определены оптимальные условия восстановления металлов из оксидов в модельных системах. В рамках второго контура разработаны оптимальные технологические режимы прямого получения металла в агрегате струйно-эмульсионного типа и легирования металла с использованием оксидных материалов для условий электросталеплавильного производства.

Достоверность полученных результатов проверялась путем сопоставления с данными лабораторных и промышленных экспериментов. Лабораторные эксперименты, заключающиеся в изотермической выдержке смеси измельченных оксидных материалов с восстановителями в печи сопротивления, проводились для подтверждения термодинамических расчетов по определению опти-

мальных условий восстановления металлов из оксидных систем. Серию опытных плавов по апробированию технологий легирования стали проводили на лабораторной двухкилограммовой дуговой печи и в условиях электросталеплавильных цехов на ОАО «Сталь НК», АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Эксперименты в агрегате струйно-эмульсионного типа проводились на опытной установке, созданной в ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК», реализация технологий переработки бедных оксидных марганцевых руд осуществлялась в условиях ООО «УК «СГМК».

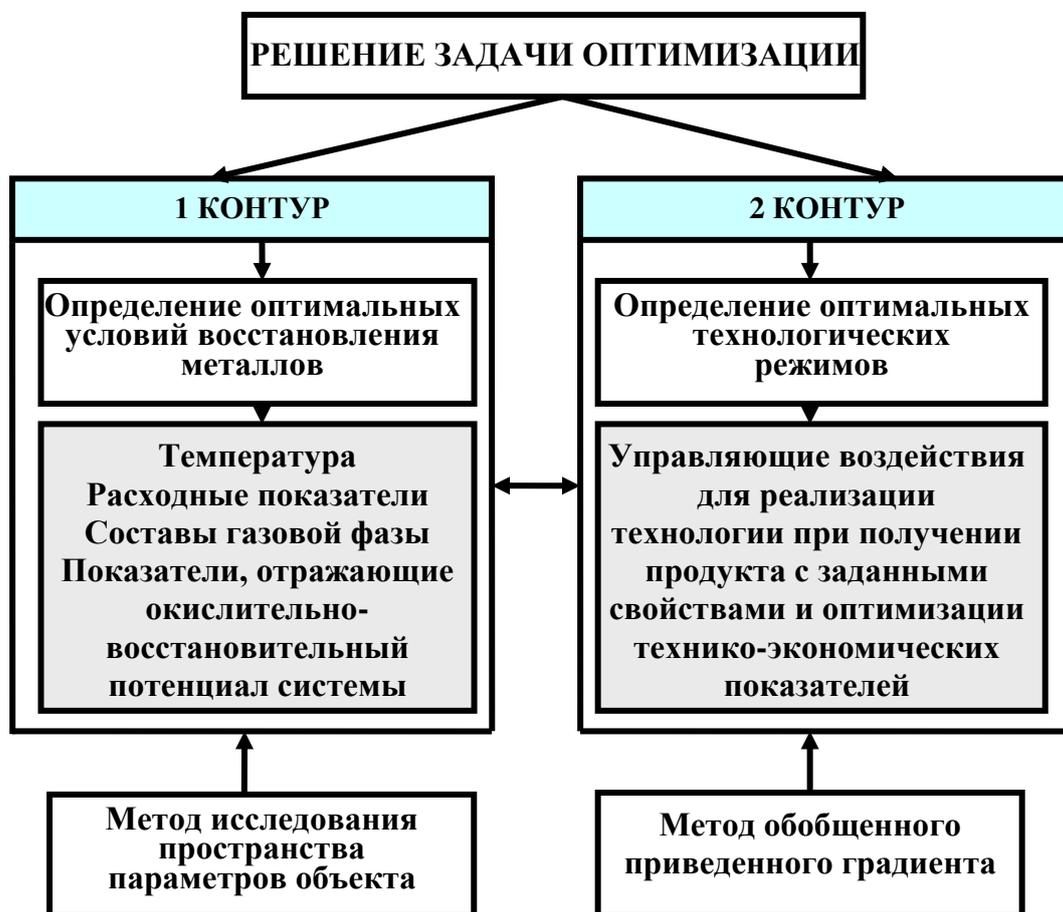


Рисунок 3 – Схема решения задачи оптимизации

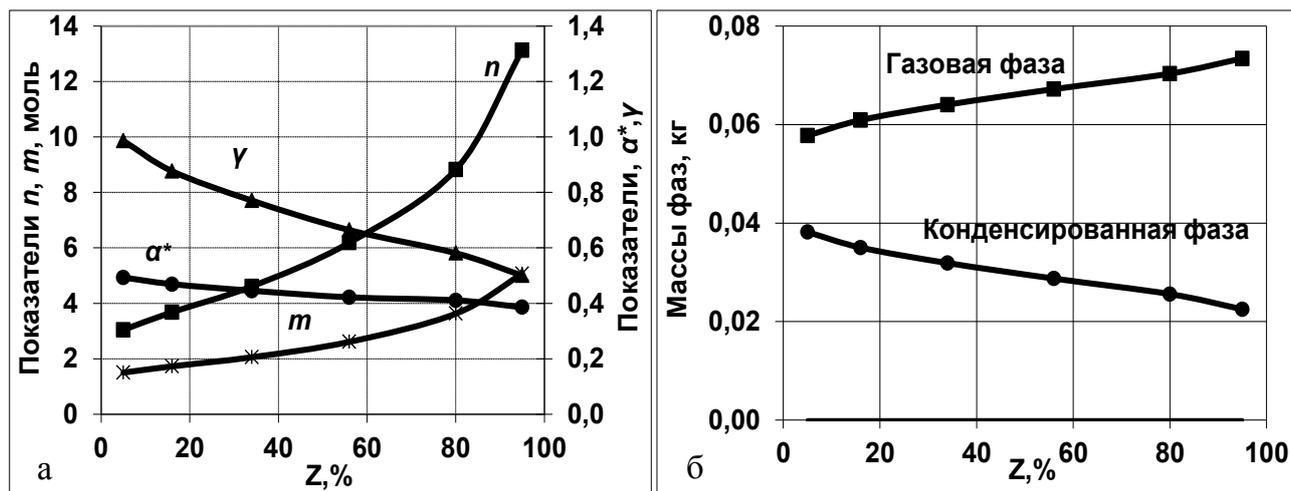
3 Исследование и оптимизация процессов восстановления металлов из оксидных систем

С применением методики и инструментов термодинамического моделирования проведен ряд исследований по определению оптимальных условий формирования газовой фазы и протекания восстановительных процессов в металлургических системах, результаты которых использовались при разработке оптимальных режимов технологий прямого получения металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа и легирования стали элементами из оксидных материалов.

Необходимость решения задачи по определению условий формирования газовой фазы объясняется особенностями протекания процессов в отдельных зонах металлургического агрегата СЭР, где происходит горение топлива и конверсия природного газа. В результате термодинамического моделирования определены возможные составы и температуры газовой фазы при горении газо-

образного, твердого и смешанного топлива для различных режимов в зависимости от показателей α и α^* .

При исследовании условий восстановления железа в модельной системе $Fe_2O_3 + nC + mO_2$ выделены границы областей протекания окислительно-восстановительных реакций, получены количественные зависимости параметров системы от температуры и расхода восстановителя. Определены значения расходов углерода и кислорода n , m и термодинамических показателей α^* , γ в зависимости от восстановительного потенциала газовой фазы Z , обеспечивающие полное восстановление железа и достижение температур, необходимых для реализации восстановительного процесса (рисунок 4).

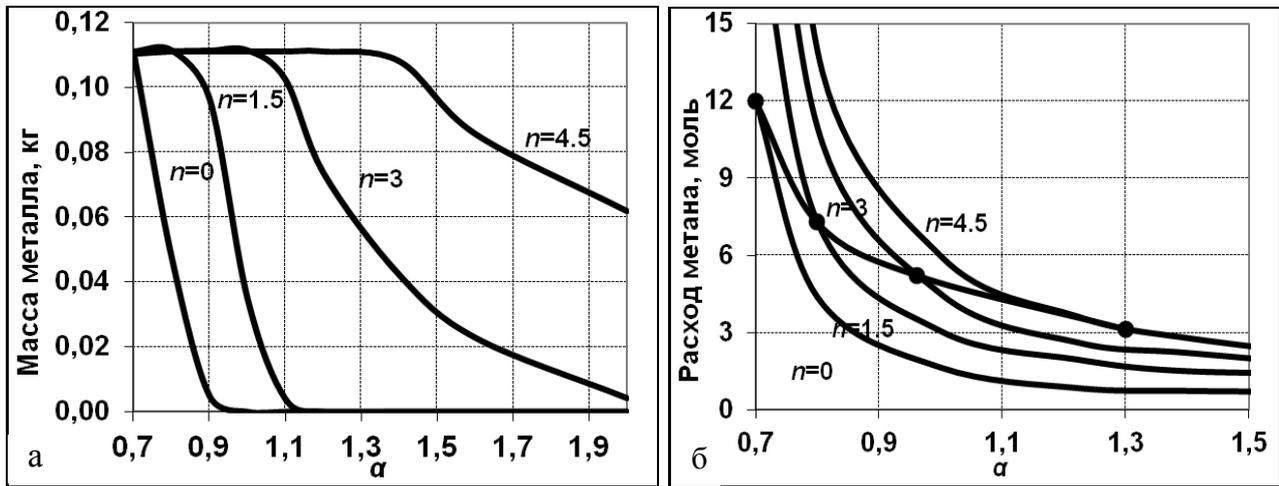


а – термодинамические показатели n , m , α^* , γ ;
 б – массы газовой и конденсированной фаз, кг

Рисунок 4 – Зависимости параметров процесса восстановления железа в системе $Fe_2O_3 + nC + mO_2$ от окислительно-восстановительного потенциала газовой фазы Z

Показано, что при изменении значений показателя Z с 95 до 5 %, снижаются расходы углерода с 13,13 до 3,04 и кислорода с 5,06 до 1,65 молей, необходимые для полного восстановления железа и обеспечения необходимого температурного режима, и как следствие, существенно снижается количество газообразных продуктов. Оптимальным в энергетическом плане является диапазон изменения Z от 25 до 35 %, так как при более низких его значениях при реализации технологии прямого восстановления существует опасность перехода процесса в окислительную область.

Исследование возможности восстановления железа продуктами конверсии природного газа рассматривалось на примере модельной системы $Fe_2O_3 + kCH_4 + nC + mO_2$, для которой при различных значениях окислительного потенциала газовой фазы α и расходе углерода n определены расходы метана и кислорода k , m , обеспечивающие реализацию процесса восстановления и достижение температур порядка 1873 К (рисунок 5). Выделенной линией показан расход метана с максимальной степенью конверсии, при котором происходит полное восстановление железа и достигается заданный температурный режим.



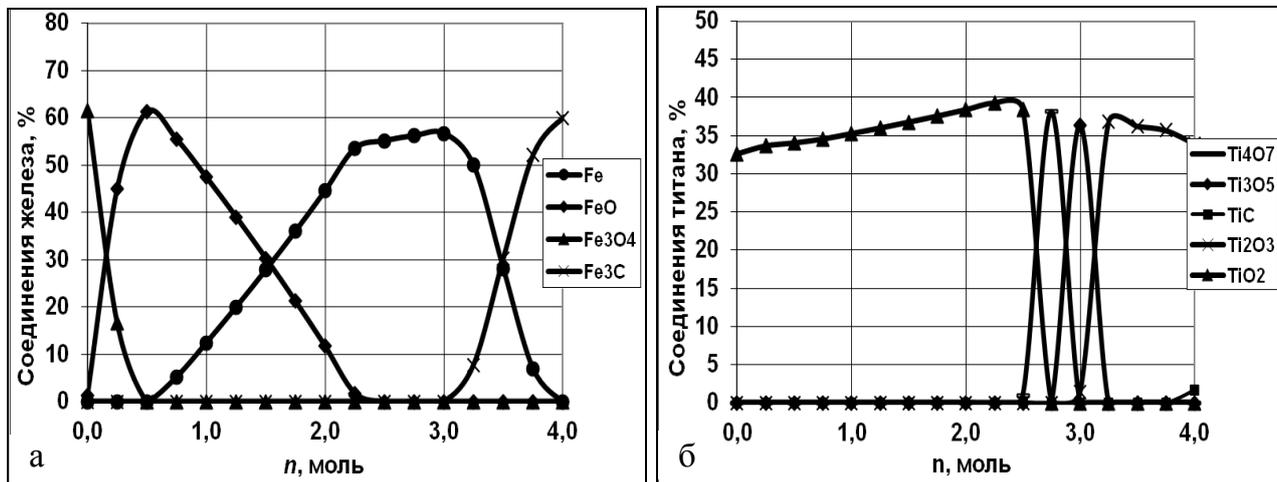
а – количество восстановленного железа, кг;
 б – расход метана, моль

Рисунок 5 – Зависимости параметров процесса восстановления железа в системе $Fe_2O_3 + kCH_4 + nC + mO_2$ от окислительного потенциала газовой фазы α при различных расходах углерода n

Так, при количестве углерода в системе 0; 1,5; 3,0; 4,5 молей расходы метана составляют 12; 7,3; 5,2 и 3,1 молей при значениях окислительного потенциала газовой фазы α 0,70; 0,85; 0,95 и 1,35. Определены оптимальные значения показателей $\alpha = 1,3$ и $Z = 40$ %, которым соответствуют минимальные расходы метана, кислорода и суммарного углерода в системе – 2,4; 3,12 и 5,5 молей соответственно, обеспечивающие необходимые условия восстановления железа.

Результаты исследования условий восстановления железа и марганца на модельной системе $pFe_2O_3 + lMnO + nC + mO_2$ показали необходимость поддержания высокого восстановительного потенциала газовой фазы. Восстановление марганца и обеспечение необходимого для его реализации температурного режима происходит при расходах углерода 8,5 и кислорода 3,5 моля при значении показателя Z не ниже 95 %.

Термодинамическое моделирование процесса восстановления титана в системе $TiO_2 + Fe_2O_3 + nC$ осуществлялось с целью определения условий, при которых происходит только восстановление железа и высших оксидов титана без образования его карбида. Для решения этой задачи определены границы областей протекания окислительно-восстановительных реакций при температуре 1873 К в системе $TiO_2 + nC$ и получен оптимальный расход восстановителя 3,20 ÷ 3,85 моля в системе $TiO_2 + Fe_2O_3 + nC$, при котором железо полностью восстанавливается, титан находится в виде Ti_2O_3 , карбид титана и свободный углерод в системе отсутствует (рисунок 6). Показано, что добавление в систему 0,1 моля кремния и 0,1 моля алюминия смещает эту зону в сторону уменьшения значений n от 1,75 до 2,05 моля. Варьирование температуры в пределах от 1673 до 2073 К не меняет характера зависимостей и границ областей протекания реакций.



а – содержание соединений железа, %,
 б – содержание соединений титана, %

Рисунок 6 – Зависимости параметров процесса восстановления титана в системе $TiO_2 + Fe_2O_3 + nC$ от расхода углерода n

С целью подтверждения возможности прямого легирования металла никелем из никелевого концентрата были проведены термодинамические исследования процесса углеродотермического восстановления никеля из его оксида. Результаты исследований показали, что в системе $NiO + pFe + nC$ никель полностью восстанавливается при расходе углерода 0,6 моля в температурном интервале от 573 до 1973 К.

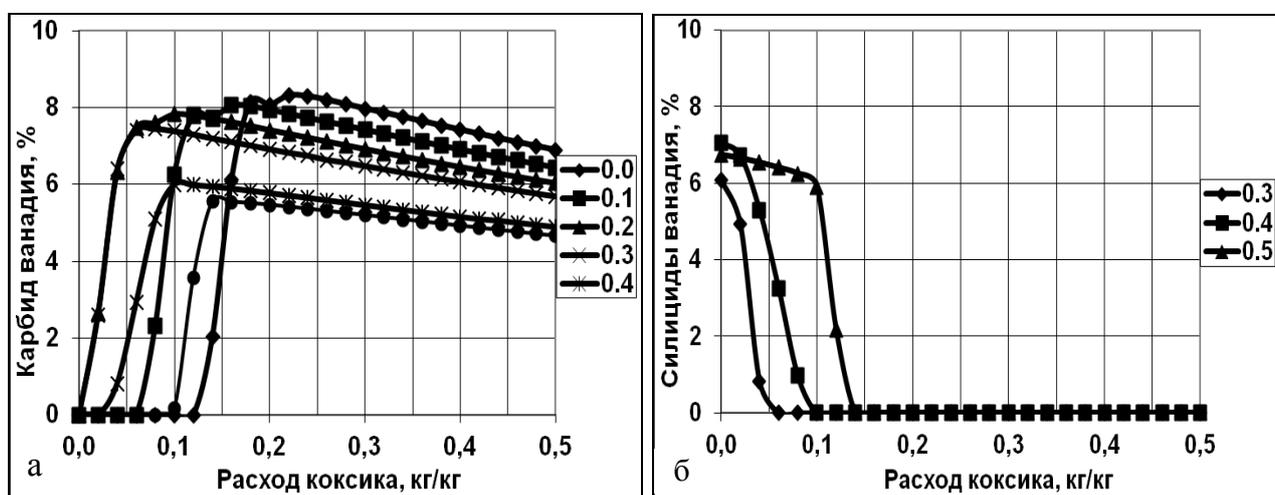
Также было проведено термодинамическое моделирование процесса восстановления никеля из никелевого концентрата. Никелевый концентрат, полученный при комплексном обогащении железомарганцевых конкреций и полиметаллического марганцевого сырья, имеет следующий состав: 42,0 % Ni , 2,0 % Mn , 1,0 % Fe , 0,3 % Co . В качестве углеродосодержащего материала рассматривали коксик, содержащий 13,6 % W ; 2,0 % A ; 2,0 % L .

Результаты исследований показали, что полное восстановление никеля происходит при расходе коксика 0,07 кг/кг никелевого концентрата. Данные термодинамического моделирования подтверждены лабораторным исследованием кинетики восстановления никеля, которое заключалось в изотермической выдержки в печи сопротивления брикетов из смеси никелевого концентрата с коксиком при температурах 1073, 1173, 1273 и 1473 К. В результате экспериментов установлено, что никель полностью восстанавливается углеродом коксика, при этом время выдержки брикетов в печи, необходимое для полного восстановления никеля, обратно пропорционально температуре.

Для решения задачи по выбору восстановителей при прямом легировании стали конвертерным ванадиевым шлаком были проведено термодинамическое моделирование процесса восстановления ванадия из оксидов, целью которого явилось определение возможности использования углерода и кремния в качестве элементов-восстановителей. Термодинамическое исследование процесса восстановления ванадия в системе $V_2O_5 + nC + mSi$ отдельно углеродом и кремнием показало, что в температурном интервале от 1573 до 1873 К восстановление ванадия углеродом происходит только до карбида, кремнием – до силицидов VSi_2 и V_5Si_3 , количество чистого восстановленного ванадия незначительно.

Максимальная концентрация 46 % VC соответствует 6,4 молям углерода, 58 % VSi_2 – расходу кремния 5,8 моля. При совместном восстановлении ванадия углеродом и кремнием сначала образуются карбиды, а затем, при увеличении расхода кремния – силициды: силицид VSi_2 образуется при расходе кремния более 4 молей, V_5Si_3 – более 2 молей.

Также были проведены исследования процесса восстановления 1 кг конвертерного ванадиевого шлака как отдельно ферросилицием и коксиком, так и совместно. В расчетах принят следующий состав ванадиевого шлака: 17 % V_2O_5 , 20 % SiO_2 , 3 % CaO , 3 % MgO , 12 % MnO , 30 % Fe_2O_3 , 12 % TiO_2 , 3 % Al_2O_3 . Результаты исследований показали, что при расходе коксика 0,2 кг/кг ванадий полностью восстанавливается до карбида, при расходе ферросилиция в диапазоне от 0,25 до 0,6 кг/кг шлака ванадий восстанавливается до V_5Si_3 , при больших расходах – до VSi_2 . При совместном восстановлении шлака коксиком и ферросилицием восстановление ванадия происходит преимущественно до карбида. Силициды образуются только при расходах ферросилиция более 0,3 кг/кг (рисунок 7).



а – содержание карбида ванадия, %,
 б – содержание силицидов ванадия, %

Рисунок 7 – Зависимости содержания соединений ванадия от расхода коксика при различных расходах ферросилиция

По результатам исследований построена номограмма определения расходов коксика и ферросилиция, необходимых для полного восстановления ванадия из 1 кг конвертерного ванадиевого шлака при различном содержании пентаоксида ванадия в шлаке (рисунок 8). Данные термодинамического моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями, которые проводились путем изотермической выдержки при температуре 1873 К проб, изготовленных из конвертерного ванадиевого шлака, содержащего 16,0 % V_2O_5 , 20 % SiO_2 , 5,0 % TiO_2 , 10,0 % MnO , 25,0 % $Fe_{общ}$, графита и кристаллического кремния. Рентгенофазовый анализ полученных образцов показал, что при углеродосиликотермическом восстановлении происходит практически полное восстановление ванадия с образованием карбида V_xC_y .

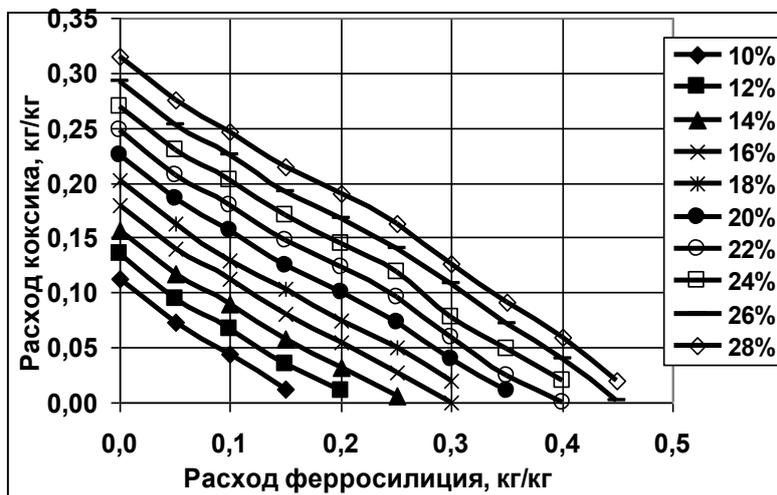


Рисунок 8 – Номограмма для определения расходов коксика и ферросилиция при восстановлении ванадия из конвертерного ванадиевого шлака

4 Разработка математической модели нового непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа

Созданный метод и инструмент моделирования и оптимизации использовались для разработки технологий нового непрерывного металлургического процесса в агрегате СЭР (струйно-эмульсионный реактор), созданного творческим коллективом научной школы, возглавляемой заслуженным деятелем науки РФ, профессором В.П. Цымбалом, и специалистами Западно-Сибирского металлургического комбината (в настоящее время АО «ЕВРАЗ ЗСМК»).

В основу нового непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа СЭР положена идея реализации принципов синергетики и неравновесной термодинамики, которая позволила создать теоретические основы процесса и универсальную конструкцию агрегата, в котором возможно осуществление различных процессов и технологий.

Непрерывный струйно-эмульсионный процесс реализуется в технологическом модуле, схема которого приведена на рисунке 9. Основными конструктивными элементами агрегата являются: система шихтоподдачи 1 и 2, реакционная камера сферической формы 3, соединенная цилиндрическим каналом 4 с рафинирующим отстойником 5; шлакоприемник-гранулятор 6, 7, гидравлическая система обеспечения гарнисажного охлаждения с полной утилизацией тепла 8; система утилизации энергии отходящих газов; система контроля и автоматического управления; система доводки металла и система разливки.

Реакционная камера 3 представляет самоорганизующийся реактор струйного типа под давлением, в котором в зависимости от вида технологии происходят следующие процессы: диспергирование потоков шихтовых материалов, горение топлива, нагрев компонентов шихты, твердофазное восстановление.

Рафинирующий отстойник 5 представляет собой эмульсионный реактор в виде высокой вертикальной колонны, заполненной газо-шлако-металлической эмульсией и шлаковой пеной, в котором происходит горение топлива, расплавление материалов, жидкофазное восстановление, шлакообразование, дожигание

оксида углерода в объеме шлаковой пены, технологическая очистка отходящих газов и разделение металла, шлака и газа.

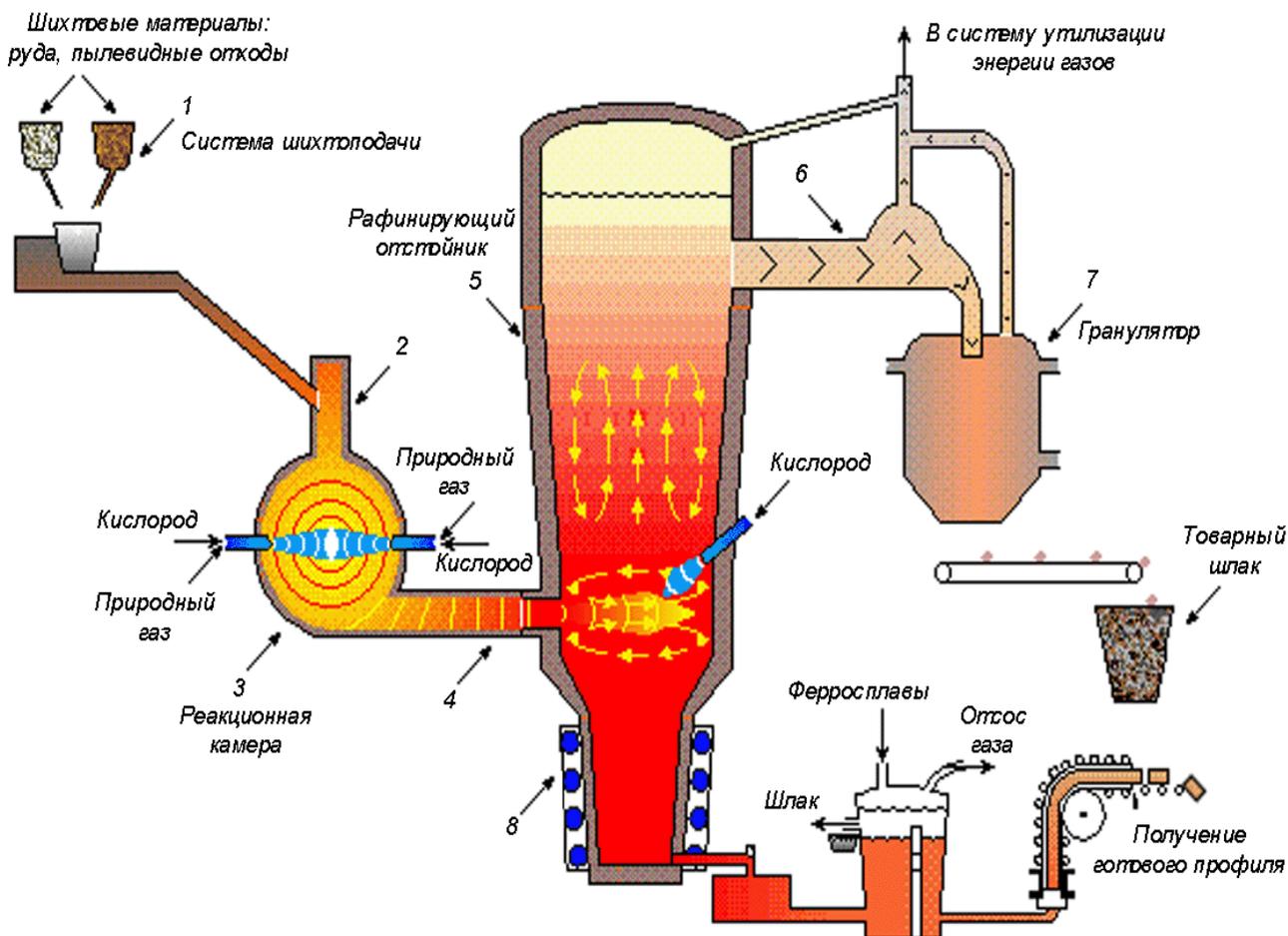


Рисунок 9 – Технологическая схема реализации струйно-эмульсионного процесса в агрегате типа СЭР

Основные принципы, положенные в основу процесса СЭР сформулированы следующим образом: создание в реакционной камере большой реакционной поверхности с последующей организацией вынужденного движения образовавшейся газовой взвеси под давлением; использование эффекта газодинамического запирания выходного канала; создание неравновесного стационарного колебательного режима при заданном уровне давления; нижняя подача образовавшейся в реакционной камере двухфазной рабочей смеси в вертикальный колонный реактор. На основе этих принципов удалось перейти от системы пространственно разделенных металла, шлака и газа к потоку двухфазной среды, представляющей собой систему, состоящую из огромного числа микро-реакторов, в которых в соизмеримых массовых соотношениях присутствуют металлическая, шлаковая и газовая фазы, что обеспечивает высокие скорости тепломассообменных процессов, окислительно-восстановительных реакций и фазовых превращений. В связи с этим теплообмен с окружающей средой протекает значительно медленнее всех остальных процессов в сопоставлении со временем пребывания компонентов в агрегате, поэтому систему можно считать условно изолированной. При этом основные допущения равновесной термодинамики выполняется с достаточно хорошим приближением, позволяющим представить струйно-эмульсионный агрегат как проточный реактор текущего

равновесия, в котором устанавливаются постоянные по времени скорости химических и фазовых превращений, что в стационарном режиме приводит к постоянным значениям параметров и концентраций компонентов в выходном потоке.

В общем виде математическая модель реактора текущего равновесия представлена следующим образом:

$$\frac{\partial p_j}{\partial \tau} = -\text{div} J_j + \sum_p v_{jp} w_p, \quad (10)$$

где p_j – поверхностная концентрация j -го вещества; J_j – диффузионный поток; v_{jp} – стехиометрический коэффициент; w_p – скорость реакции в единице объема; τ – время.

Эта модель может быть дополнена дифференциальным уравнением Гиббса, которое можно использовать при решении задач минимизации производства энтропии в моделируемой проточной системе:

$$\frac{\partial S_v}{\partial \tau} = -\sum_j \frac{\mu_j}{T} \cdot \frac{\partial \rho_j}{\partial \tau}, \quad (11)$$

где μ_j – химический потенциал единицы массы j -го компонента; S_v – плотность энтропии; T – температура.

Для случая равновесия это уравнение имеет следующий вид:

$$TdS = dU + PdV - \sum_j \mu_j dm_j, \quad (12)$$

где U – полная внутренняя энергия; P – давление; V – объем; m – масса.

С использованием уравнений (5) – (12) разработана и реализована в инструментальной системе «Инжиниринг-Металлургия» математическая модель нового непрерывного металлургического процесса с учетом особенностей различных вариантов технологий.

5 Определение оптимальных режимов при разработке технологий получения металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа

С использованием инструментальной системы «Инжиниринг-Металлургия» были проведены исследования и определены оптимальные режимы ряда ресурсосберегающих технологий прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа. Полученные результаты использовались при проектировании и отладке технологий в ходе проведения экспериментов на опытной установке.

Технология получения стали из чугуна и окалины была создана по заданию руководства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с целью переработки в струе чугуна порядка 25 % техногенных железосодержащих материалов – конвертерных шламов и прокатной окалины.

Для исследования возможности переработки различного количества окалины в шихте были проведены исследования для расхода чугуна 10 кг/с при изменении расхода окалины в пределах от 1 до 10 кг/с и степени дожигания CO до CO_2 50 %. Расход отработанного масла, исходя из технологических требований, задан в расчете 0,9 кг/с на 4 кг/с окалины. В принятом диапазоне изменения расхода окалины параметры α^* и γ менялись в пределах от 0,547 до 0,495 и

от 0,693 до 0,669 соответственно. При увеличении доли твердого окислителя в шихте удельные расходы кокса, извести и кислорода, а также массы фаз выходных потоков линейно увеличиваются. Энергоемкость процесса снижается с 24,5 до 18,5 ГДж/т. Результаты исследования влияния степени дожига отходящих газов на параметры процесса показали, что наилучшие показатели достигаются при значении $Z = 50 \%$ и расходе окалина 6 кг/т, которым соответствуют минимальные удельные расходы материалов и энергоемкость 21,2 ГДж/т, значения показателей α^* и γ при $Z = 50 \%$ составляют 0,479 и 0,639 соответственно.

Технология прямого получения металла разработана с целью переработки железосодержащих материалов (прокатной окалина, конвертерного шлама и железной руды) без использования чугуна.

В результате исследований с использованием инструментальной системы определили, что для заданной производительности опытной установки при расходе железорудной смеси 6 кг/с расход кокса составляет 6,03 кг/с и кислорода – 5,74 кг/с (4,02 м³/с). Этим параметрам соответствует температура 1873 К, степень восстановления железа 96 %, содержание углерода в металле 0,49 % и содержание оксида железа в шлаке 9,47 %. Изменение соотношения CO и CO_2 в газовой фазе за счет дожига отходящих газов при постоянном выходе металла приводит к снижению абсолютных расходов материалов и уменьшению количества газа. Существенно снижается энергоемкость процесса. Значения показателей α^* и γ меняются в пределах от 0,41 и 0,46 при отсутствии дожига и до 0,55 и 0,81 при полном дожигании отходящих газов. Однако, оптимальной является область ведения процесса в диапазоне изменения Z от 30 % до 50 %, так как при более низких значениях наблюдается лишь незначительное уменьшение расходных показателей, но при этом возникает риск перехода системы в окислительную область.

В соответствии с возможностями опытной установки путем решения оптимизационной задачи при $Z = 40 \%$ были получены следующие значения расходов материалов: расход железосодержащей смеси – 6 кг/с, пластификатора – 1,35 кг/с, ферросилиция – 0,27 кг/с и алюминия – 0,07 кг/с. Расчетный расход коксика в ориентации на получение металла с содержанием углерода 0,5 % составил 0,83 кг/с, кислорода – 2,62 кг/с. Реализуемость технологии подтверждена результатами экспериментов на опытной установке.

Технология получения марганцевых сплавов в агрегате СЭР направлена на переработку бедных мелкофракционных карбонатных и оксидных марганцевых руд. Для предварительного восстановления марганца из высших оксидов или разложения карбонатов, а также удаления влаги из руды предлагается использовать восстановительный газ, который является продуктом реализации технологии восстановления марганца в агрегате СЭР, и, таким образом, замкнуть процесс, то есть создать согласованный поток вещества и энергии, проходящий через основной агрегат СЭР и подготовительный агрегат кипящего слоя.

Схема материальных и энергетических потоков для предлагаемой технологии приведена на рисунке 10.

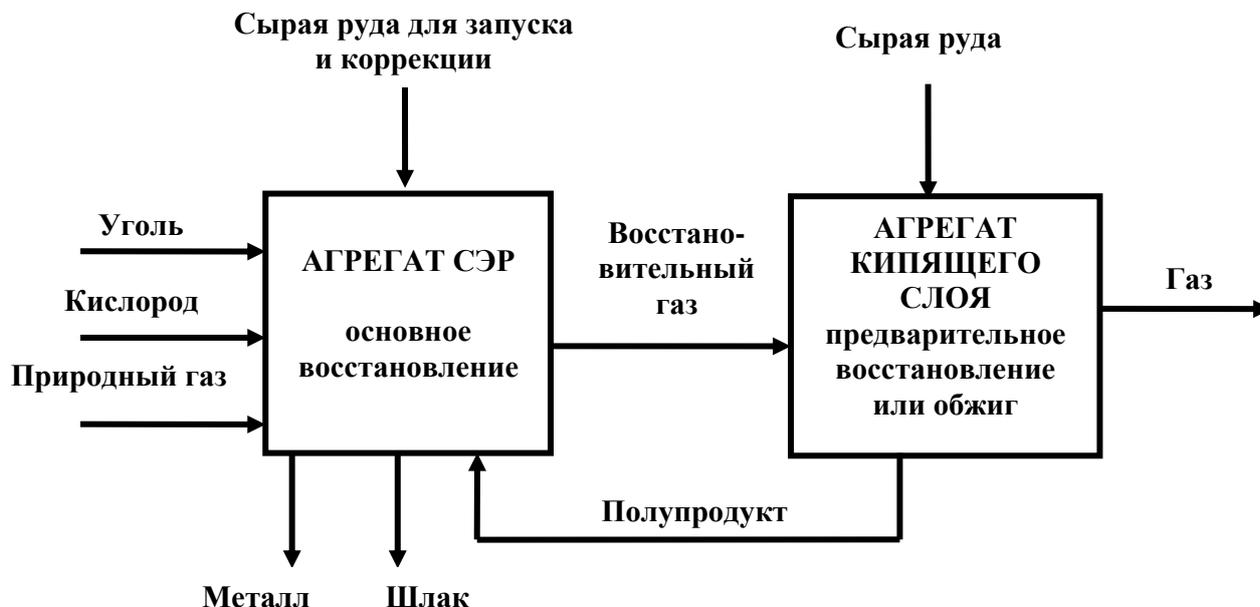


Рисунок 10 – Схема реализации технологии переработки марганцевых руд

Основная задача заключалась в определении такого расхода сырой руды в агрегате кипящего слоя, чтобы получить заданный выход полупродукта (в расчете выход полупродукта принят 1 кг/с) и одновременно обеспечить возможность полного перевода высших оксидов или карбонатов сырой руды в низшие оксиды восстановительным газом, получаемым в основном агрегате. Для решения этой проблемы была поставлена и решена задача оптимизации, включающая два этапа. На первом этапе осуществлялся подбор состава и расхода восстановительного газа, необходимого для полного восстановления высших оксидов марганца или разложения карбонатов, и определялся расход исходной марганцевой руды, обеспечивающий выход заданного количества полупродукта. Затем проводился расчет процесса в основном агрегате СЭР и определялся состав продуктов. При этом решалась задача оптимизации по выходу и составу газа, который должен обеспечивать процесс восстановления во втором агрегате. Определялись такие расходы угля и кислорода, при которых состав отходящего газа соответствовал необходимому при выполнении ограничений на условия материального и теплового баланса при заданной температуре и на условия реализации восстановительных процессов при заданной степени восстановления железа и марганца.

Расчеты были проведены для двух типов руд: оксидной руды Селезеньского и карбонатной руды Усинского месторождений. Сравнительный анализ двух вариантов переработки марганцевых руд по предлагаемой технологии и по технологии без предварительного восстановления и обжига представлен в таблице 1. Расчеты показали, что предложенная технология переработки марганцевых руд в агрегате типа СЭР с замкнутым циклом позволяет значительно улучшить показатели процесса: снизить удельные расходы материалов, повысить производительность и значительно уменьшить энергоемкость процесса по сравнению с технологией переработки бедных марганцевых руд без предварительного восстановления или обжига.

Таблица 1 – Сравнительный анализ показателей технологий переработки марганцевых руд Селезеньского и Усинского месторождений

Показатель	Селезеньская руда		Усинская руда	
	С предв. восстановлением	Без предв. восстановления	С предв. обжигом	Без предв. обжига
Удельные расходы материалов, кг/т (м ³ /т)				
Марганцевая руда	2811,12	2969,04	3850,7	4062,2
Уголь	1063,42	2917,22	1363,82	2488,8
Кислород	793,8	2184,30	1035,1	2012,6
Природный газ	151,99	202,27	186,58	276,7
Показатели				
Производительность, кг/с	0,45	0,34	0,37	0,25
Энергоемкость, ГДж/т	43,1	97,6	54,6	94,1
Содержание марганца в сплаве, %	66,17	66,00	77,47	72,15

Результаты исследования и оптимизации процессов переработки марганцевых руд Селезеньского месторождения использовались при отладке технологий получения марганцевых сплавов на ООО УК «СГМК».

Одним из вариантов нового непрерывного металлургического процесса является безотходная технология переработки титано-магнетитовых концентратов, обеспечивающая одновременно с выплавкой природно-легированного металла получение товарного титанистого шлака.

Для эксперимента на опытной установке был приготовлен концентрат следующего состава: 26,8 % FeO , 46,1 % Fe_2O_3 и 17,5 % TiO_2 , полученный путем разбавления нестандартного ильменитового концентрата добавкой прокатной окалины и шлама конвертерного производства. Были рассчитаны показатели процесса для секундного расхода шихты, кислорода и углеродосодержащих материалов, в целом представляющих собой газовзвесь с объемным газосодержанием порядка 99 % и секундным расходом металлической части шихты 4 кг.

Результаты исследований показали, что расход коксика в количестве от 1,4 до 1,5 кг/с обеспечивает полное восстановление железа и высших оксидов титана без образования его карбида. Расчетное содержание оксида титана в шлаке при этом составляет 43 % (при содержании CaO – 30 % и Al_2O_3 – 15 %). Однако после проведения экспериментальной плавки фактическое содержание оксида титана в шлаке оказалось значительно ниже из-за интенсивного смыва футеровки высокорективным шлаком, в результате чего было принято решение о создании автоматизированной системы поддержания гарнисажа. С учетом коррекции на смыв из футеровки балластных составляющих результаты расчета и эксперимента оказались близкими.

Подобные расчеты были также проведены для неразбавленного ильменитового концентрата с содержанием TiO_2 – 44,9 % и железа – 36,4 %. Оптимальный расход восстановителя составил от 1,9 до 2,0 кг/с. Было определено предельно возможное содержание оксида титана в шлаке порядка 78 – 79 %.

С использованием инструментальной системы «Инжиниринг-металлургия» была решена задача определения расходов шихтовых материалов, восстановителей и топлива при различных параметрах процесса. На основании полученных результатов были оценены технологически допустимые рас-

ходы углеродосодержащих материалов, получены зависимости масс металла и шлака от возможного содержания оксидов железа в шлаке при различном содержании CO в газовой фазе, а также предельно возможное содержание оксидов титана в шлаке в зависимости от доли титанового концентрата в шихте. Эти результаты легли в основу при реализации процесса на опытной установке, эксперименты на которой подтвердили результаты расчетов с учетом отмеченного выше замечания о смыве футеровки.

С использованием инструментальных средств моделирования была разработана технология прямого восстановления металла с получением попутного высококалорийного синтез-газа. Основной задачей разработки технологии явилось создание условий для более гибкого управления составом отходящих газов с малой зависимостью от технологии получения металла за счет разделения потоков металла, шлака и газа, а также обеспечение коррекции состава технологического газа до параметров кондиционного синтез-газа путем совмещения паругольного газификатора с металлургическим агрегатом, что дало возможность создания энергометаллургического процесса, так как технологический газ превращается в товарный продукт.

По технологии отходящий газ с общим объемным содержанием CO и H_2 в пределах от 70 до 90 % из основного агрегата СЭР поступает в коррекционную камеру через водоохлаждаемую решетку с постоянно пополняемым слоем коксика или угля, через которую также пропускается водяной пар. Для окончательной коррекции состава газа в камеру подается природный газ и кислород для достижения объемного отношения CO к H_2 в получаемом газе 2:3.

Для подтверждения возможности реализации технологии были проведены вычислительные эксперименты по коррекции состава попутного технологического газа. Определены расходы угля и кислорода, необходимые для получения металла с содержанием углерода 0,50 % и температурой 1873 К при расходе железной руды 1 кг/с, которые составили 0,674 кг/с и 0,382 кг/с соответственно. Отходящий технологический в количестве 1,06 кг/с в виде газошлаковой эмульсии поступает в шлакоприемник, куда навстречу шлаковому потоку через фурму вдувается пар. За счет тепла шлака пар нагревается с 423 до 973 К и через решетку вместе с технологическим газом, отсепарированным от шлака и имеющим температуру 1773 К, непрерывно поступает в слой угля в камере коррекции газа, которая осуществляется за счет конверсии метана кислородом, подаваемым в камеру через фурмы.

Задача по оптимизации расходов угля, пара и природного газа решалась путем исследования в интерактивном режиме пространства параметров объекта и нахождения оптимальной области. Результаты расчетов приведены в таблице 2, из которой видно, что в третьем варианте удалось получить соотношение $CO : H_2$ равным 2:3. В результате реализации процесса получается удвоенное количество синтез-газа (2,22 кг/с вместо 1,06 кг/с) по сравнению с полученным технологическим. Его калорийность возрастает с 12089 до 16525 кДж/кг, при этом расход природного газа составляет всего 20 % от количества синтез-газа. Для получения технологического газа требуется в два раза меньше газообразного кислорода, чем при обычной газификации, так как половина кислорода высвобождается из оксидов железорудных материалов.

Таблица 2 – Результаты расчетов состава газа с применением метана

Вариант	Управляющие воздействия						Объемный состав газа, %					Отношение $CO:H_2$
	Уголь, кг/с	Пар, кг/с	Пр. газ, кг/с	Кислород, кг/с	T, К	Масса газа, кг/с	CH_4	CO	CO_2	H_2	H_2O	
1	0,3	0,45	0,20	0,20	1051	2,12	1,09	46,88	4,56	43,83	3,64	1,07:1
2	0,3	0,45	0,25	0,25	1053	2,22	1,13	45,95	4,22	45,13	3,57	1:1
3	0,3	0,45	0,45	0,25	1056	2,22	2,37	34,13	5,82	51,4	6,26	2:3

Совмещение прямого восстановления металлов из оксидов с газификацией угля с учетом предложенного способа и конструкции агрегата позволяет создать энергометаллургический агрегат, в котором отходящий газ представляет собой высококалорийный продукт для последующего использования при производстве моторного топлива, полностью использовать химическую и физическую энергии попутного технологического газа, получив на основе коррекционной камеры химический утилизатор тепла.

Полученные результаты моделирования и оптимизации технологий получения металла из чугуна и окалины, прямого восстановления железа, а также переработки марганцевых руд и титаномагнетитовых концентратов легли в основу при реализации плавок на опытной установке, созданной в ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК», на которой было проведено 40 экспериментов, каждый из которых являлся очередным этапом по совершенствованию конструкции агрегата и отладке технологий. Результатами экспериментов на опытной установке подтверждены преимущества процесса и агрегата струйно-эмульсионного типа: высокие скорости тепломассообменных процессов; экологичность; управляемость, универсальность и мобильность, возможность реализации различных вариантов технологий.

Одной из важных задач экспериментальной реализации была проверка адекватности моделей и результатов термодинамических расчетов. Сравнительный анализ расчетных и опытных данных показал, что относительные ошибки по содержанию углерода, марганца в металле и FeO в шлаке равны 15,5; 21,1 и 18,4 %, что соответствует отклонению от реальных значений по концентрации углерода 0,13 %, марганца – 0,14 %, FeO – 3,44 %, что можно считать достаточно приемлемых в условиях отладки технологий при наличии большого количества помех, технических и технологических ограничений.

6 Разработка оптимальных технологических режимов ресурсосберегающих технологий легирования стали с использованием оксидных материалов

Инструментальная система и результаты термодинамического моделирования использовались для совершенствования технологий легирования металла с применением оксидных материалов в условиях электросталеплавильного производства. Для оптимизации технологических режимов процессов обработки стали оксидными материалами разработана и реализована в инструментальной системе математическая модель процесса получения стали в дуговой электросталеплавильной печи и раскисления и легирования металла в ковше.

Технология прямого легирования стали никелем в печи с использованием никельсодержащих окатышей, состоящих из никелевого концентрата и коксика, разработана для условий 40-тонной дуговой электропечи. Результаты модельных экспериментов показали, что при прочих равных условиях содержание никеля в стали на выпуске увеличивается пропорционально расходу окатышей (таблица 3). Концентрации остальных составляющих металла остаются практически постоянными за исключением углерода, содержание которого незначительно возрастает из-за увеличения его количества в составе окатышей. Коэффициент извлечения никеля в среднем составляет 98,5 %.

Таблица 3 – Результаты модельных экспериментов процесса прямого легирования стали никелем в печи

Расход окатышей, кг/т	Состав металла, %						Коэффициент извлечения никеля, %
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	
0,00	0,16	0,25	0,08	0,09	0,018	0,023	94,3
4,25	0,18	0,25	0,37	0,09	0,019	0,023	98,5
8,48	0,20	0,25	0,65	0,09	0,020	0,024	99,2
12,73	0,22	0,25	0,93	0,09	0,021	0,024	98,8
17,00	0,23	0,25	1,21	0,09	0,022	0,024	98,5

Максимальный коэффициент извлечения никеля 99,2 % соответствует расходу никелевых окатышей 8,5 кг/т металла. Результаты моделирования процесса использовались при разработке технологии, которая была апробирована в лабораторных и промышленных условиях. Лабораторные испытания проводили на лабораторной печи емкостью 2 кг с магнезитовой футеровкой. Из никелевого концентрата и коксовой мелочи в соотношении 1 : 0,07 были изготовлены окатыши, которые загружали в печь в завалку вместе с шихтой, состоящей из металлического лома и извести. Результаты анализа полученных проб выплавленного металла показали, что степень извлечения никеля из концентрата составляет от 94 до 98 %. Промышленные эксперименты по выплавки стали 08(12)X18H10T были реализованы в условиях электросталеплавильного цеха на ОАО «Сталь НК».

В связи с тем, что большинство технологий легирования с использованием ванадиевого шлака разработаны для выплавки стали без последующей ее внепечной обработки, актуальной задачей является разработка технологии легирования стали в ковше с использованием в качестве восстановителей более дешевых материалов, например коксика.

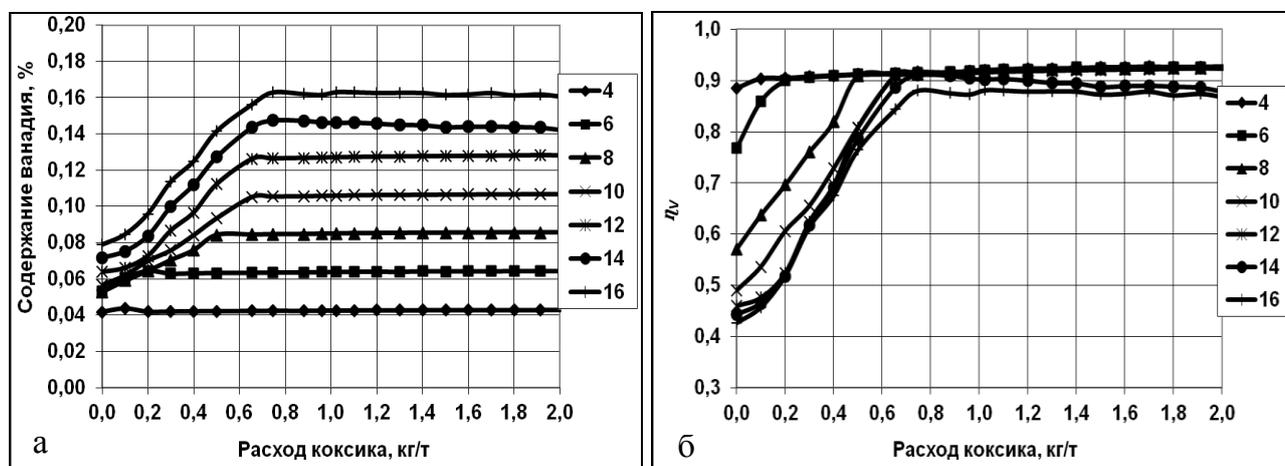
Для решения поставленной задачи были проведены расчеты и оптимизация процесса микролегирования стали ванадием на выпуске металла из печи и в агрегате «ковш-печь» в диапазоне температур от 1823 до 1923 К, различном содержании углерода в стали и расходах конвертерного ванадиевого шлака.

При моделировании процесса обработки стали на выпуске количество печного шлака, попадающего в ковш, принято 1 кг/т металла, присадки извести и ферросилиция ФС 75 составили 2 кг/т соответственно, расход конвертерного ванадиевого шлака варьировали в пределах от 0 до 30 кг/т металла. Результаты расчетов показали, что максимальное извлечение ванадия возможно при леги-

ровании высокоуглеродистых сталей. При варьировании расходом конвертерного ванадиевого шлака в пределах от 0 до 28 кг/т возможно получение содержания ванадия в стали до 0,16 % при $[C] = 0,7 \%$ с коэффициентом извлечения η_V от 0,75 до 0,98; до 0,14 % при $[C] = 0,5 \%$ с η_V от 0,64 до 0,96; 0,097 % при $[C] = 0,3 \%$ с $\eta_V = 0,54$; 0,038 % при $[C] = 0,1 \%$ с $\eta_V = 0,58$.

Для оценки конечного результата внепечной обработки стали на установке «ковш-печь» были проведено исследование процесса восстановления ванадия из конвертерного ванадиевого шлака с учетом присадок восстановителей.

Расчеты проведены при температуре 1873 К для среднеуглеродистой стали при расходах ванадиевого конвертерного шлака от 4 до 16 кг/т стали в диапазоне изменения расхода коксика от 0 до 2 кг/т металла при расходе ферросилиция 2 кг/т. Результаты исследования, приведенные на рисунке 11, показали, что для заданных условий при расходе коксика более 0,6 кг/т стали, содержание ванадия в металле не меняется, а коэффициент извлечения ванадия составляет порядка 90 % при любых расходах конвертерного ванадиевого шлака.



а – содержание восстановленного ванадия, %,
 б – коэффициент извлечения ванадия

Рисунок 11 – Зависимости параметров процесса восстановления ванадия в агрегате «ковш-печь» от расхода коксика при различных расходах конвертерного ванадиевого шлака

Марганец восстанавливается полностью, его концентрация в металле увеличивается пропорционально расходу конвертерного ванадиевого шлака. Содержание углерода в стали в зависимости от расхода коксика изменяется в пределах от 0,2 до 0,8 % независимо от расхода конвертерного ванадиевого шлака. Шлак представлен оксидами кальция, магния, алюминия и кремния. Оксиды ванадия исчезают при расходах коксика от 0,5 до 0,6 кг/т стали в диапазоне изменения расхода конвертерного ванадиевого шлака от 4 до 16 кг/т.

С целью подтверждения результатов теоретического исследования была проведена серия опытных плавов на лабораторной двухкилограммовой дуговой печи. В состав исходных материалов входили углеродистая сталь следующего состава 0,27 % *C*, 0,49 % *Mn*, 0,02 % *Si*, 0,02 % *V*, конвертерный ванадиевый шлак, кристаллический кремний, графит и известь. Спектральный анализ выплавленного металла показал содержание ванадия в пределах от 0,10 до 0,13 %,

марганца от 0,39 до 0,52 %. Среднее значение коэффициента извлечения ванадия составило 98 %.

Результаты моделирования и оптимизации использовались при разработке технологии обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком в ковше на выпуске и в агрегате «ковш-печь». Технология была апробирована в ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», всего было проведено 23 экспериментальные плавки, по которым была произведена оценка адекватности математических моделей. Сравнительный анализ расчетных и опытных показал, что относительные ошибки по содержанию углерода, марганца, кремния и ванадия в металле равны 2,99; 3,39; 8,5 и 12,6 %, что соответствует отклонению от реальных значений по концентрации углерода 0,0027 %, марганца – 0,007 %, кремния – 0,0048 % и ванадия 0,0016 %, что не превышает погрешности измерения при проведении химического анализа состава металла. Разработанная технология обеспечивает практически полное извлечение ванадия из конвертерного ванадиевого шлака со средним коэффициентом извлечения близким к 1. Качество металла, изготовленного по данной технологии, не уступает показателям, полученным при реализации стандартной технологии микролегирования металла ванадием с применением ванадийсодержащих ферросплавов.

Заключение

1. Создан метод системного решения комплекса взаимосвязанных задач по определению оптимальных условий протекания процессов восстановления металлов в термодинамических системах и оптимальных режимов ресурсосберегающих металлургических технологий прямого получения металлов в агрегате СЭР и легирования стали с использованием оксидных материалов.

2. Разработаны методика термодинамического моделирования по определению оптимальных условий восстановления металлов из оксидных систем и система показателей, отражающих окислительно-восстановительный потенциал не только расплава, но и объемлющей системы, в том числе газовой фазы рабочего пространства металлургического агрегата.

3. Разработан комплекс математических моделей, описывающих на основе фундаментальных законов термодинамики взаимосвязь параметров входных-выходных потоков и физико-химических процессов в металлургическом агрегате струйно-эмульсионного типа, представленном как реактор текущего равновесия.

4. Создана инструментальная система «Инжиниринг-Металлургия», представляющая взаимосвязанную систему математических моделей, методов оптимизации и баз данных, реализованная в виде комплекса программ применительно к решению широкого круга оптимизационных задач ряда металлургических технологий (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2017617445).

5. В инструментальной системе поставлена и решена оптимизационная задача по определению управляющих воздействий на процесс путем поиска экстремума требуемого критерия, в качестве которого могут быть выбраны суммарный расход шихтовых материалов на единицу продукции, себестоимость, энергоемкость или производительность агрегата, при соблюдении ограничений на состав и температуру получаемых продуктов, диапазоны изменения

расходов компонентов входных потоков и параметров состояния системы, соблюдение закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов, соблюдение закона сохранения энергии и выполнение целевых условий по остальным критериям.

7. С использованием термодинамического моделирования определены:

– оптимальные соотношения компонентов в термодинамических системах $Fe-O-C$, $Fe-O-H-C$, $Fe-Mn-O-C$, обеспечивающие необходимый температурный режим и максимальную степень восстановления металлов;

– оптимальные термодинамические условия и соотношения компонентов в системе $Ti-Fe-C-O-Si-Al$, обеспечивающие полное восстановление железа и перевод высших оксидов титана в низшие без образования карбидов;

– тип, расходы восстановителей и температуры для реализации процессов восстановления никеля и ванадия из оксидов в модельных термодинамических системах.

6. С использованием инструментальной системы «Инжиниринг-Металлургия» разработаны оптимальные режимы энерго- и ресурсосберегающих технологий для нового непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа в агрегате СЭР:

– получения металла из чугуна и прокатной окалины с энергоемкостью 21,2 ГДж/т при расходе окалины 6 кг/с и степени дожигания отходящих газов 50 %;

– прямого восстановления металла из пылевидных руд и железосодержащих техногенных материалов без агломерации с энергоемкостью процесса 14 – 16 ГДж/т при степени дожигания отходящих газов от 50 до 70 %;

– получения марганцевых сплавов из карбонатных и оксидных руд, особенностью которой является предварительное восстановление или обжиг руды в агрегате кипящего слоя в потоке технологического газа, отходящего из агрегата СЭР, в результате чего достигается снижение энергоемкости процесса – с 97,6 до 43,1 ГДж/т для оксидной селезеньской марганцевой руды и с 94,1 до 54,6 ГДж/т для карбонатной усинской руды;

– переработки титано-магнетитовых концентратов с практически полным разделением железосодержащей и титансодержащей (с содержанием оксидов титана 46 %) составляющей.

7. Технологии опробованы на крупномасштабной опытной установке, созданной в ККЦ–2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Результатами экспериментов подтверждены преимущества процесса и агрегата струйно-эмульсионного типа: высокие скорости тепломассообменных процессов (от 100 до 200 раз выше, чем в конвертере); малые размеры и материалоемкость агрегатов (от 10 до 20 раз меньше, чем в традиционной металлургии); низкие сквозные энергозатраты (от 15 до 18 ГДж/т); высокая экологичность и безотходность технологий; управляемость, универсальность и мобильность, возможность реализации различных технологий.

8. Разработана технология прямого восстановления железа с попутным получением высококалорийного синтез-газа в агрегате струйно-эмульсионного типа, которая в результате совмещения пароугольного газификатора с металлургическим агрегатом позволяет использовать химическую и физическую энергию отходящего технологического газа и дает возможность получения

удвоенного количества кондиционного синтез-газа с калорийностью 16525 кДж/кг, являющегося товарным продуктом для последующей его переработки в моторное топливо (патент № 2371482).

9. На основе теоретических и экспериментальных исследований определены оптимальные параметры процессов восстановления никеля из никелевого концентрата и ванадия из конвертерного ванадиевого шлака, обеспечивающие максимальную степень извлечения металлов. Технология прямого легирования стали никелем с использованием никелевого концентрата в дуговой электропечи апробирована в промышленных условиях на АО «Сталь-НК». Технология обработки стали в ковше на выпуске металла конвертерным ванадиевым шлаком и в агрегате «ковш-печь» с использованием коксика и ферросилиция внедрена в производство в ЭСПЦ на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», экономический эффект от внедрения составил 200 – 250 руб/т металла.

10. Результаты теоретических, экспериментальных исследований и разработанные математические модели внедрены и используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 22.03.02, 22.04.02 – Metallургия, 09.03.02, 09.04.02 – Информационные системы и технологии, 09.03.01, 09.04.01 – Информатика и вычислительная техника.

Основные публикации по теме диссертации

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Разработка методики и программного обеспечения для расчета оптимального состава шихтовых материалов различных вариантов технологий непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа / С. П. Мочалов, В. П. Цымбал, И. А. Рыбенко [и др.] // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1996. - № 12. – С. 4 – 8.

2. Рыбенко, И. А. Разработка средствами Excel системы расчета металлургических процессов / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2005. - № 2. – С. 55 – 58.

3. Процесс и агрегат типа самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор как пример наукоемкой технологии в металлургии / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2005. - № 6. – С. 60 – 65.

4. Климов, В. Ю. Разработка и применение компьютерной инструментальной системы для термодинамических расчетов на базе программного комплекса "Астра" / В. Ю. Климов, И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2006. - № 4. – С. 55 – 64.

5. Процесс и агрегат типа самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор позволяет снизить требования к уровню обогащения руд / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко [и др.] // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2009. - № 4. – С. 44 – 48.

6. Исследование условий и режимов процесса восстановления ванадия в элементарных системах / М. А. Голодова, В. И. Дмитриенко, И. Д. Рожихина, И. А. Рыбенко // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2010. - № 4. – С. 7 – 11.

7. Термодинамическая оценка возможности легирования стали при обработке ее ванадийсодержащим шлаком / О. И. Норхина, В. И. Дмитриенко, И. Д., Рожихина, И. А. Рыбенко // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2010. - № 10. – С. 17 – 20.

8. Исследование условий процесса восстановления ванадия и железа из конвертерного ванадиевого шлака / И. А. Рыбенко [и др.] // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2011. - № 4. – С. 3 – 5.

9. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса / В. П. Цымбал, В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко [и др.] // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2015. - Т. 58, № 8. – С. 572 – 577.

10. Цымбал, В. П. Нетрадиционный подход к переработке титано-магнетитовых и железомарганцевых руд / В. П. Цымбал, И. А. Рыбенко, В. В. Павлов // Бюл. Черная металлургия. – 2015. - № 10. – С. 90 – 94.

11. Разработка основ энергоэффективных процессов металлизации с использованием термодинамического моделирования / И. Е. Ходосов, И. Д. Рожихина, О. И. Нохрина, И. А. Рыбенко // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2016. - Т. 59, № 4. – С. 237 – 244.

12. К вопросу о термодинамическом моделировании процесса восстановления элементов конвертерного ванадиевого шлака / М. А. Голодова, И. Д. Рожихина, О. И. Нохрина, И. А. Рыбенко // Бюл. Черная металлургия. – 2016. - № 10. – С. 27 – 34.

13. Разработка ресурсосберегающих технологий прямого легирования стали на основе методов термодинамического моделирования процессов восстановления металлов в элементарных системах / И. А. Рыбенко [и др.] // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2017. - Т. 60, № 2. – С. 91 – 98.

14. Рыбенко, И. А. Применение инструментальной системы моделирования и оптимизации для разработки теоретических основ технологий легирования и модифицирования стали / И. А. Рыбенко // Бюл. Черная металлургия. – 2017. - № 2. – С. 37 – 43.

15. Рыбенко, И. А. Оптимизация технологий в струйно-эмульсионном металлургическом агрегате с использованием методики и инструментальной системы моделирования / И. А. Рыбенко // Бюл. Черная металлургия. – 2017. - № 3. – С. 60 – 65.

16. Рыбенко, И. А. Разработка оптимальных технологических режимов получения металлов с использованием методов математического моделирования и инструментальных систем / И. А. Рыбенко // Бюл. Черная металлургия. – 2018. - № 2. – С. 57 – 61.

17. Рыбенко, И. А. Решение задач оптимизации металлургических процессов с использованием инструментальной системы «Инжиниринг-Металлургия» / И. А. Рыбенко // Бюл. Черная металлургия. – 2018. - № 3. – С. 42 – 47.

Статьи в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science:

18. Development of a procedure and software for calculating the optimum composition of charge materials for different versions of technologies of a continuous metallurgical process of the jet-emulsion / S. P. Mochalov, V. P. Tsymbal,

I. A. Rybenko [at all] // Steel in Translation. – 1996. - Vol. 26 (12), – PP. 44 – 48.

19. Automated systems and information science self-organizing jet-emulsion reactor / V. P. Tsymbal, S. P. Mochalov, I. A. Rybenko [at all] // Steel in Translation. – 2005. - Vol. 35, Issue 6. – PP. 79 – 85.

20. Ore Enrichment Required for a Self-Organizing Jet-Emulsion Reactor / V. P. Tsymbal, S. P. Mochalov, I. A. Rybenko [at all] // Steel in Translation. – 2009. - Vol. 39, Issue 4. – PP. 310 – 312.

21. Reduction of vanadium in elementary systems / I. A. Rybenko, M. A. Golodova, V. I. Dmitrienko, I. D. Rozhikhina // Steel in Translation. – 2010. - Vol. 40, Issue 4. – PP. 310 – 313.

22. A new jet-emulsion metallurgical process / V. P. Tsymbal, S. P. Mochalov, I. A. Rybenko [at all] // Steel in Translation. – 2015. - Vol. 45, Issue 8. – PP. 550 – 554.

23. Energy-Efficient Reduction of Iron from Its Ores / O. I. Nokhrina, I. D. Rozhikhina, I. E. Khodosov, I. A. Rybenko // Steel in Translation. – 2016, - Vol. 46, Issue 4. – PP. 245 – 550.

24. Rybenko, I. A. Modelling of CWS combustion process / I. A. Rybenko, L. A. Ermakova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 45 (2016) 012016 doi:10.1088/1755-1315/45/1/012016.

25. A study on reduction processes of elements in the system V_2O_5 -Si / M. A. Golodova, I. D. Rozhikhina, O. I. Nakhrina, I. A. Rybenko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 150 (2016) 012006 doi:10.1088/1757-899X/150/1/012006.

26. Thermodynamic modeling of restoring items converter vanadium slag / M. A. Golodova, I. D. Rozhikhina, O. I. Nakhrina, I. A. Rybenko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 150 (2016) 012016 doi:10.1088/1757-899X/150/1/012016.

27. Background and principles of self-organizing jet-emulsion metallurgical unit / V. P. Tsymbal, V. I. Kozhemyachenko, I. A. Rybenko [at all] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 150 (2016) 012018 doi:10.1088/1757-899X/150/1/012018.

28. Resource-saving direct alloying of steel / I. A. Rybenko [at all] // Steel in Translation. – 2017. - Vol. 47, Issue 2. – PP. 85 – 90.

29. Development of resource-saving technologies of steel direct alloying on the basis of thermodynamic modeling of metals recovery processes in elementary systems / I. A. Rybenko [at all] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya. – 2017. - Vol. 60, Issue 2. – PP. 91 – 98.

Публикации в других изданиях:

30. Новый экологически безопасный металлургический процесс и агрегат на принципах самоорганизации и комплекс безотходных технологий / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко [и др.] // Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе : сб. докл. первой междун. науч.-практ. конф., посвященной 75-летию СибГИУ. – Новокузнецк, 2005. – С. 252 – 261.

31. Рыбенко, И. А. Методика и система расчета и оптимизации статических и стационарных режимов технологических процессов / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов, П. С. Мочалов // *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество*: тр. XVII всерос. науч.-практ. конф. ; под ред. Е. В. Протопопова : Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2013. – С. 29 – 32.
32. Рыбенко, И. А. Моделирование условий и режимов восстановления железа и марганца в элементарной системе *Fe-Mn-C-O* / И. А. Рыбенко, В. Н. Буинцев // *Наука и образование в современной конкурентной среде* : мат. междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2014. – С. 142 – 145.
33. Рыбенко, И. А. Термодинамическое моделирование условий и режимов восстановления железа в системе *Fe-C-O-H* / И. А. Рыбенко // *Международный научный журнал "Символ науки"*. – 2015. -№ 3. – С. 60 – 64.
34. Цымбал, В. П. Нетрадиционный подход к переработке титано-магнетитовых и железомарганцевых руд / В. П. Цымбал, В. В. Павлов, И. А. Рыбенко // *Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР* : тр. науч.-практ. конф. с международным участием и элементами школы молодых ученых. – Екатеринбург : Уральский рабочий, 2015. – С. 91 – 96.
35. Термодинамическое моделирование процесса восстановления элементов из конвертерного ванадиевого шлака / М. А. Голодова, И. Д. Рожихина, О. И. Нохрина, И. А. Рыбенко // *Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах*: тр. IV всерос. науч.-практ. конф. с международным участием : в 2 ч. Ч. I. ; под общ. ред. В. П. Цымбала, Т. В. Киселевой. – Новокузнецк, 2016. – С. 112 – 117.
36. Использование методов термодинамического моделирования для описания процессов восстановления элементов из чистых оксидных систем / М. А. Голодова, И. Д. Рожихина, О. И. Нохрина, И. А. Рыбенко // *Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах*: тр. IV всерос. науч.-практ. конф. с международным участием : в 2 ч. Ч. I. ; под общ. ред. В. П. Цымбала, Т. В. Киселевой. – Новокузнецк, 2016. – С. 117 – 123.
37. Предпосылки и принципы создания самоорганизующегося струйно-эмульсионного реактора / В. П. Цымбал, В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко [и др.] // *Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах*: тр. IV всерос. науч.-практ. конф. с международным участием : в 2 ч. Ч. I. ; под общ. ред. В. П. Цымбала, Т. В. Киселевой. – Новокузнецк, 2016. – С. 27 – 36.
38. Efficient utilization of fuel energy in the steel industry using a spray-emulsion reactor within a new structure of energy and metallurgical units / V. P. Tsybmal, A. A. Olennikov, V. I. Kozhemyachenko, I. A. Rybenko // *2015 Sustainable Industrial Processing Summit : Canada : Gudenau Intl. Symp. On Iron and Steel Making*. Edited by F. Kongoli, G. Kleinschimdt, H. Pook, K. Ohn, 2016. – PP. 259 – 265.
39. Basic Principles And Features Of Self-Organizing Jet-Emulsion Technology (SER) / V. Tsybmal, A. Olennikov, I. Rybenko, V. Kozhemyachenko, E. Prottopov, F. Kongoli // *Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition SIPS 2016*

Volume 1: D'Abreu Intl. Symp. / Iron and Steel Making. Volume 1. Montreal (Canada) : FLOGEN Star Outreach, 2016. – PP. 214 – 227.

40. Рыбенко, И. А. Метод и инструмент разработки оптимальных технологических режимов при совершенствовании существующих и создании новых металлургических процессов / И. А. Рыбенко // «Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX междунар. науч.-практ. конф. : В 2 ч. Ч. 1 / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под ред. Е. В. Протопопова. – Новокузнецк, 2017. – С. 107 – 113.

41. Экспериментальное исследование восстановления ванадия в системе $V_2O_5 - C - Si$ / М. А. Голодова, О. И. Нохрина, И. Д. Рожихина, И. А. Рыбенко // «Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX междунар. науч.-практ. конф. : В 2 ч. Ч. 2 / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под ред. Е. В. Протопопова. – Новокузнецк, 2017. – С. 35 – 39.

42. Рыбенко, И. А. Инструментальная система «Инжиниринг-Металлургия» для широкого круга оптимизационных задач / И. А. Рыбенко // «Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под ред. Е. В. Протопопова. – Новокузнецк, 2017. – С. 75 – 82.

43. К вопросу о совершенствовании технологии обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком / И. А. Рыбенко, М. А. Голодова, О. И. Нохрина, И. Д. Рожихина // «Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под ред. Е. В. Протопопова. – Новокузнецк, 2017. – С. 114 – 118.

44. Рыбенко, И. А. Экспериментальная проверка адекватности математических моделей нового непрерывного металлургического процесса СЭР / И. А. Рыбенко, В. П. Цымбал // «Металлургия: технологии, инновации, качество : тр. XX междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 2 / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под ред. Е. В. Протопопова. – Новокузнецк, 2017. – С. 97 – 101.

45. Рыбенко, И. А. Разработка метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации технологических режимов металлургических процессов / И. А. Рыбенко // Инновационные технологии и стратегии развития промышленности : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (15 мая 2018, Волгоград). – Уфа : АЭТЕРНА, 2018. – С. 79 – 81.

Монографии:

46. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор : монография / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко [и др.]. – М. : Металлургиздат, 2014. – 488 с.

47. Рыбенко, И. А. Моделирование и оптимизация стационарных режимов металлургических процессов : монография / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2015. – 168 с.

48. Рыбенко, И. А. Применение методики и инструментальной системы расчета металлургических процессов для разработки теоретических основ ресурсосберегающих технологий : монография / И. А. Рыбенко ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2016. – 183 с.

49. Рыбенко, И. А. Термодинамическое моделирование процессов в элементарных системах : монография / И. А. Рыбенко ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2016. – 97 с.

Патент:

50. Пат. 2371482 Россия, МПК С21 В13/14. Способ прямого восстановления металлов с получением синтез-газа и агрегат для его осуществления / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко, [и др.]. № 2007144892/02 ; заявлено 03.12.2007 ; опубл. 27.10.2009. – 12 с..

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

51. Рыбенко, И. А. Инжиниринг-Металлургия / И. А. Рыбенко, А. А. Оленников // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617445; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.07.2017.

Подписано в печать 21.09.2018. Формат 60x90 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,5 Тираж 100 экз. Заказ 268.

Сибирский государственный индустриальный университет

654007, г. Новокузнецк, ул. Крова, 42.

Издательский центр СибГИУ