ISSN 0368-0797 *(Print)*
ISSN 2410-2091 *(Online)*

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 5 2020

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY Vol. 63 No. 5 2020

Web: fermet.misis.ru

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 5, 2020 Издается с января 1958 г. ежемесячно Том 63

МОСКВА • МИСИС • 2020

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. *(Российская Академия Наук, г. Москва)*
АСТАХОВ М.В. *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
АШИХМИН Г.В. *(ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва)*
БАЙСАНОВ С.О. *(Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)*
БЕЛОВ В.Д. *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
БРОДОВ А.А., *редактор раздела* ***«Экономическая эффективность металлургического производства»*** *(ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)*
ВОЛЫНКИНА Е.П. *(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)*
ГЛЕЗЕР А.М. *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
ГОРБАТЮК С.М. *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
ГРИГОРОВИЧ К.В., *редактор раздела* ***«Металлургические технологии»*** *(Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)*
ГРОМОВ В.Е. *(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)*
ДМИТРИЕВ А.Н. *(Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)*
ДУБ А.В. *(ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)*
ЖУЧКОВ В.И. *(Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)*
ЗИНГЕР Р.Ф. *(Институт Фридриха-Александра, Германия)*
ЗИНИГРАД М. *(Институт Ариэля, Израиль)*
ЗОЛОТУХИН В.И. *(Тульский государственный университет, г. Тула)*
КОЛМАКОВ А.Г. *(Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)*
КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. *(Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)*
КОСТИНА М.В. *(Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)*
КОСЫРЕВ К.Л. *(АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)*
КУРГАНОВА Ю.А. *(МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)*
КУРНОСОВ В.В. *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
ЛИНН Х. *(ООО «Линн Хай Терм», Германия)*
ЛЫСАК В.И. *(Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)*
МЕШАЛКИН В.П. *(Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва)*
МУЛЮКОВ Р.Р. *(ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа)*
МЫШЛЯЕВ Л.П. *(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)*
НИКУЛИН С.А. *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
НУРУМГАЛИЕВ А.Х. *(Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Караганда, Республика Казахстан)*
ОСТРОВСКИЙ О.И. *(Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)*
ПИЕТРЕЛЛИ ЛОРИС *(Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия)*
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., *редактор раздела* ***«Ресурсосбережение в черной металлургии»*** *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., *редактор раздела* ***«Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах»*** *(Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)*
РАШЕВ Ц.В., *редактор раздела* ***«Стали особого назначения»*** *(Академия наук Болгарии, Болгария)*
РУДСКОЙ А.И. *(Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)*
СИВАК Б.А. *(АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)*
СИМОНЯН Л.М., *редактор раздела* ***«Экология и рациональное природопользование»*** *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
СМИРНОВ Л.А. *(ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)*
СОЛОДОВ С.В., *редактор раздела* ***«Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии»*** *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
СПИРИН Н.А. *(Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)*
ТАНГ ГУОИ *(Институт перспективных материалов университета Цинхуа, г. Шеньжень, Китай)*
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. *(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)*
ФИЛОНОВ М.Р., *редактор раздела* ***«Материаловедение»*** *(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)*
ЧУМАНОВ И.В. *(Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)*
ШЕШУКОВ О.Ю. *(Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)*
ШПАЙДЕЛЬ М.О. *(Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)*
ЮРЬЕВ А.Б. *(ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)*
ЮСУПОВ В.С. *(Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)*

Учредители:

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».
Тел.: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7.
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» индексируется в международной базе данных Scopus.

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-35456

IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

Editor-in-Chief: LEONT'EV L.I.
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

Deputy Editor-in-Chief: PROTOPOPOV E.V.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Deputy Coordinating Editor: BASHCHENKO L.P.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

N.P. ALESHIN *(Russian Akademy of Sciences, Moscow)*
G.V. ASHIKHMIN *(JSC "Institute Tsvetmetobrabotka", Moscow)*
M.V. ASTAKHOV *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
S.O. BAISANOV *(Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan)*
V.D. BELOV *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
A.A. BRODOV, *Editor of the section* ***"Economic efficiency of metallurgical production"*** *(IP Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow)*
I.V. CHUMANOV *(South Ural State Research University, Chelyabinsk)*
A.N. DMITRIEV *(Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal University, Ekaterinburg)*
A.V. DUB *(JSC "Science and Innovations", Moscow)*
M.R. FILONOV, *Editor of the section* ***"Material science"*** *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
A.M. GLEZER *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
S.M. GORBATYUK *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
K.V. GRIGOROVICH, *Editor of the section* ***"Metallurgical Technologies"*** *(Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow)*
V.E. GROMOV *(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)*
A.G. KOLMAKOV *(Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow)*
V.M. KOLOKOL'TSEV *(Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk)*
M.V. KOSTINA *(Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow)*
K.L. KOSYREV *(JSC "NPO "TSNIITMash", Moscow)*
YU.A. KURGANOVA *(Bauman Moscow State Technical University, Moscow)*
V.V. KURNOSOV *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
H. LINN *(Linn High Therm GmbH, Hirschbach, Germany)*
V.I. LYSAK *(Volgograd State Technical University, Volgograd)*
V.P. MESHALKIN *(D.I. Mendeleyev Russian Chemical-Technological University, Moscow)*
R.R. MULYUKOV *(Institute of Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa)*
L.P. MYSHLYAEV *(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)*
S.A. NIKULIN *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
A.KH. NURUMGALIEV *(Karaganda State Industrial University, Karaganda, Republic of Kazakhstan)*
O.I. OSTROVSKI *(University of New South Wales, Sidney, Australia)*
LORIS PIETRELLI *(Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Rome, Italy)*
G.S. PODGORODETSKII, *Editor of the section* ***"Resources Saving in Ferrous Metallurgy"*** *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
I.YU. PYSHMINTSEV, *Editor of the section* ***"Inovations in metallurgical industrial and laboratory equipment, technologies and materials"*** *(Russian Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk)*
TS.V. RASHEV, *Editor of the section* ***"Superduty steel"*** *(Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria)*
A.I. RUDSKOI *(Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg)*
O.YU. SHESHUKOV *(Ural Federal University, Ekaterinburg)*
L.M. SIMONYAN, *Editor of the section* ***"Ecology Rational Use of Natural Resources"*** *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
R.F. SINGER *(Friedrich-Alexander University, Germany)*
B.A. SIVAK *(VNIIMETMASH Holding Company, Moscow)*
L.A. SMIRNOV *(OJSC "Ural Institute of Metals", Ekaterinburg)*
S.V. SOLODOV, *Editor of the section* ***"Information Technologies and Automatic Control in Ferrous Metallurgy"*** *(National Research Technological University "MISIS", Moscow)*
M. SPEIDEL *(Swiss Academy of Materials, Switzerland)*
N.A. SPIRIN *(Ural Federal University, Ekaterinburg)*
TANG GUOI *(Institute of Advanced Materials of Tsinghua University, Shenzhen, China)*
M.V. TEMLYANTSEV *(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)*
E.P. VOLYNKINA *(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)*
A.B. YUR'EV *(OJSC "ZSMK", Novokuznetsk)*
V.S. YUSUPOV *(Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow)*
V.I. ZHUCHKOV *(Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal University, Ekaterinburg)*
M. ZINIGRAD *(Ariel University, Israel)*
V.I. ZOLOTUKHIN *(Tula State University, Tula)*

Founders:

MISIS
National Research Technological University "MISIS"

Siberian State Industrial University

This issue of the journal was prepared by
Siberian State Industrial University

Editorial Addresses:

119991, Moscow, Leninskii prosp., 4
National Research Technological University "MISIS",
Tel.: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Novokuznetsk, Kemerovo region,
Kirova str., 42
Siberian State Industrial University,
Tel.: +7 (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the "List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications. in which should be published major scientific results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences" by the decision of the Higher Attestation Commission.

The journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is indexed in Scopus.

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is registered
in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications **PI number FS77-35456**

СОДЕРЖАНИЕ

Протопопов Е.В. СибГИУ – 90! Гордимся прошлым, развиваемся в настоящем, создаем будущее! 291

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянцев М.В., Головатенко А.В. Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов 298

Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Бащенко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование 305

Фастыковский А.Р., Никитин А.Г., Беляев С.В., Добрянский А.В. Особенности освоения технологии прокатки-разделения на действующем непрерывном мелкосортном стане 313

Уманский А.А., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами 318

Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И. Влияние теплофизических характеристик сплава и материала литейной формы на скорость затвердевания отливок 327

Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксидсодержащих отходов металлургического производства ... 335

ЭКОЛОГИЯ
И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А. Марганцевые руды Кемеровской области – Кузбасса и методы их обогащения 344

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Осколкова Т.Н., Симачев А.С. Влияние импульсно-плазменного модифицирования титаном и бором поверхности твердого сплава ВК10КС на его структуру и свойства 351

Зоря И.В., Полетаев Г.М., Старостенков М.Д., Ракитин Р.Ю., Коханенко Д.В. Влияние примесей легких элементов на процесс кристаллизации никеля в области тройного стыка границ зерен: молекулярно-динамическое моделирование 357

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ,
ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Рыбенко И.А., Роос Х.-Г. Метод и инструментальная система для моделирования и оптимизации технологических режимов процессов прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа 364

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Зимин А.В., Золин И.А., Буркова И.В., Зимин В.В. Планирование развертывания сервисных активов, основанное на данных о применении ИТ-сервисов 373

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Глушакова О.В., Черникова О.П., Стрекалова С.А. Интегральная оценка эффективности реализации корпоративных стратегий предприятиями черной металлургии 379

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

Цымбал В.П., Буинцев В.Н., Кожемяченко В.И., Калашников С.Н., Сеченов П.А. Математическое моделирование в учебном процессе, исследованиях и малоэнергоемких металлургических технологиях 389

CONTENTS

E.V. Protopopov To the 90th Anniversary of Siberian State Industrial University 291

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

E.V. Protopopov, V.V. Chislavlev, M.V. Temlyantsev, A.V. Golovatenko Increasing efficiency of rail steel refining in CCM tundish based on rational organization of hydrodynamic processes 298

N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov, L.P. Bashchenko Welding of differentially heat-strengthened rails. Industrial testing 305

A.R. Fastykovskii, A.G. Nikitin, S.V. Belyaev, A.V. Dobryanskii Features of the rolling-separation technology development on operating continuous small-grade mill 313

A.A. Umanskii, V.V. Dorofeev, L.V. Dumova Theoretical foundations for energy-efficient production of railway rails with improved performance properties 318

O.G. Prikhod'ko, V.B. Deev, E.S. Prusov, A.I. Kutsenko Influence of thermophysical characteristics of alloy and mold material on castings solidification rate 327

A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva Technological modes of efficient metallization of iron-oxide-containing waste from metallurgical production 335

ECOLOGY AND RATIONAL USE
OF NATURAL RESOURCES

O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, A.I. Edil'baev, B.A. Edil'baev Manganese ores of the Kemerovo Region – Kuzbass and methods of their enrichment 344

MATERIAL SCIENCE

T.N. Oskolkova, A.S. Simachev Influence of pulse-plasma modification of VK10KS solid alloy surface by titanium and boron on its structure and properties 351

I.V. Zorya, G.M. Poletaev, M.D. Starostenkov, R.Yu. Rakitin, D.V. Kokhanenko Effect of light elements impurity on process of nickel crystallization near the triple interface of grain boundaries: A molecular dynamics simulation 357

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL
AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS

I.A. Rybenko, Roos Hans-Georg Technological modes of metals direct reduction in an aggregate of jet-emulsion type 364

INFORMATION TECHNOLOGIES
AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

A.V. Zimin, I.A. Zolin, I.V. Burkova, V.V. Zimin Planning service assets deployment based on information about dynamics of IT services use 373

ECONOMIC EFFICIENCY
OF METALLURGICAL PRODUCTION

O.V. Glushakova, O.P. Chernikova, S.A. Strekalova Integral assessment of corporate strategies implementation efficiency of ferrous metallurgy enterprises 379

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

V.P. Tsymbal, V.N. Buintsev, V.I. Kozhemyachenko, S.N. Kalashnikov, P.A. Sechenov Mathematical modeling in education process, research and low-energy metallurgical technologies 389

ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Том 63. № 5. С. 364 – 372.
© 2020. *Рыбенко И.А., Роос Ханс-Гёрг*

УДК 669.02.001.57

МЕТОД И ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССОВ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В АГРЕГАТЕ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО ТИПА

Рыбенко И.А.[1], *д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий и программирования* (rybenkoi@mail.ru)

Роос Ханс-Гёрг[2], *д.т.н., профессор математики* (hans-goerg.roos@tu-dresden.de)

[1] **Сибирский государственный индустриальный университет**
(6540007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)
[2] **Технический университет Дрездена**
(Mommsenstraße13, 01069 Dresden, Sachsen, Deutschland)

Аннотация. Представлены метод и инструментальная система моделирования и оптимизации технологических режимов процессов прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа. Рассмотрены этапы метода: постановка задачи (формирование целевых условий, выбор типа процесса, вида задачи и системы критериев оптимизации); выделение объекта исследования (задание параметров входных-выходных потоков, процесса, стадий и подпроцессов); термодинамическое моделирование для оценки конечного равновесного состояния (решается задача оптимизации по определению наилучших условий реализации процессов восстановления металлов из оксидов в модельных системах и 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). В рамках четвертого этапа разработан комплекс математических моделей, отражающих взаимосвязь потоков и процессов в металлургическом агрегате. Представлена структура инструментальной системы, в которой реализованы математические модели и алгоритм определения оптимальных технологических режимов металлургической технологии. Разработан комплекс критериев оптимизации. Приведена схема решения двухконтурной задачи оптимизации для решения оптимизационных задач: нахождение оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах; определение оптимальных режимов технологий прямого восстановления металлов. Показано применение метода для разработки оптимальных технологических режимов процессов прямого получения металла в агрегате типа СЭР: получение металла из чугуна и прокатной окалины, прямое восстановление металла из пылевидных руд и железосодержащих техногенных материалов, получение марганцевых сплавов из карбонатных и оксидных руд, переработка титано-магнетитовых концентратов с практически полным разделением железо- и титансодержащей составляющих, прямое восстановления железа с попутным получением высококалорийного синтез-газа в агрегате струйно-эмульсионного типа.

Ключевые слова: метод, инструментальная система, математическое моделирование, прямое восстановление металлов, технологический режим.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-364-372

Введение

Металлургия является одной из ресурсоемких отраслей промышленности. Необходимость снижения энерго- 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 также находится в стадии проектирования и разработки более 100 установок прямого восстановления [1 – 5]. 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. К таким процессам относится непрерывный металлургический процесс струйно-эмульсионного типа (СЭР), характеризующийся низкими себестоимостью, энергоемкостью и высокой экологичностью, обладающий универсальностью, позволяющий реализовать в одном агрегате различные технологии.

Принципы создания и теоретические основы процесса и агрегата СЭР подробно изложены в работе [6]. В этом процессе высокая степень диспергации шихты позволяет создавать газовзвесь 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 ис-

пользование 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 применения, могут быть использованы только для конкретного типа задач в определенной области знаний и не позволяют решать оптимизационные задачи [7 – 16]. 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.

Разработка метода моделирования и оптимизации

Для решения этих задач разработан метод, особенностью которого является решение ряда оптимизационных задач по определению наилучших условий их реализации и путей достижения этих условий. Метод включает ряд этапов (рис. 1) [17].

Рис. 1. Этапы, задачи и результаты метода моделирования и оптимизации

Fig. 1. Stages, tasks and results of the method of modeling and optimization

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

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

На третьем этапе с использованием методов термодинамического моделирования выделяют области протекания окислительно-восстановительных процессов, проводят оценку конечного равновесного состояния, решают задачу оптимизации по определению наилучших условий реализации процессов восстановления металлов из оксидов в модельных системах, а также проводят лабораторные эксперименты. Для решения этих задач предложен метод термодинамического моделирования, основанный на поиске принципа максимума энтропии, и разработана методика, включающая следующие этапы: выделение областей протекания окислительных и восстановительных процессов; определение условий (диапазона температур, расходных показателей, составов газовой фазы) осуществления моделируемого процесса; формирование параметров входного потока, обеспечивающих достижение необходимых условий реализации процесса и оптимизацию параметров входного потока и системы при заданных условиях осуществления процесса.

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

– окислительный потенциал $\alpha = m/k$ газовой фазы, определяемый как отношение количества газообразного кислорода m к количеству k углерода в веществах газовой фазы;

– окислительный потенциал $\alpha^* = \dfrac{m}{n+k}$ системы – отношение количества газообразного кислорода к общему количеству углерода в системе;

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

$$Z = \frac{\{CO\} + \{H_2\}}{\{CO\} + \{H_2\} + \{CO_2\} + \{H_2O\}} 100\ \%;$$

– показатель $\gamma = \dfrac{m+p}{n+k}$, характеризующий окислительный потенциал системы и учитывающий количество кислорода в оксидах; здесь m, k, n и p – количество газообразного кислорода, углерода в веществах газовой фазы, конденсированного углерода и 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 [18], а также модифицированная версия предыдущего варианта (АвтоАстра) программы Терра, 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.

По результатам термодинамического моделирования формируют 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.

Разработка математической модели

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

Уравнения материального баланса разработаны 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:

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

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

Баланс на уровне потоков веществ представлен уравнением:

$$\sum_{k=1}^{K^f}\sum_{m=1}^{N_k^f}\frac{G_k^f\left|R_m\right|_k}{100}+\sum_{k=1}^{K^г}\sum_{m=1}^{N_k^г}\frac{G_k^г\left\{R_m\right\}_k}{100}=$$
$$=\sum_{l=1}^{L^f}\sum_{n=1}^{N_l^f}\frac{G_l^f\left|R_n\right|_l}{100}+\sum_{n=1}^{N^г}\frac{G^г\left\{R_n\right\}}{100}, \qquad (2)$$

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

$$\sum_{k=1}^{K^f}\sum_{m=1}^{N_k^{E_i^f}}\frac{G_k^f\left|E_{ix_m}E_{jy_m}\right|_k}{100}\frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m}E_{jy_m}}}+$$
$$+\sum_{k=1}^{K^г}\sum_{m=1}^{N_k^{E_i^г}}\frac{G_k^г\left\{E_{ix_m}E_{jy_m}\right\}_k}{100}\frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m}E_{jy_m}}}=$$
$$=\sum_{l=1}^{L^f}\sum_{n=1}^{N_l^{E_i^f}}\frac{G_l^f\left|E_{ix_n}E_{jy_n}\right|_l}{100}\frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n}E_{jy_n}}}+$$
$$+\sum_{n=1}^{N_l^{E_i^г}}\frac{G_l^г\left\{E_{ix_n}E_{jy_n}\right\}_l}{100}\frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n}E_{jy_n}}}, \qquad (3)$$

где $\left|E_{ix_m}E_{jy_m}\right|_k$, $\left\{E_{ix_m}E_{jy_m}\right\}_k$ – концентрация m-го вещества, содержащего элемент E_i в k-ом конденсированном или газообразном входном потоке, %; $\left|E_{ix_n}E_{jy_n}\right|_l$, $\left\{E_{ix_n}E_{jy_n}\right\}_l$ – концентрация n-го вещества, содержащего элемент E_i в l-ом конденсированном или газообразном выходном потоке, %; $N_k^{E_i^f}$ и $N_k^{E_i^г}$ – количество веществ, содержащих элемент E_i в k-ом конденсированном и газообразном входном потоке; $N_l^{E_i^f}$ и $N_l^{E_i^г}$ – количество веществ, содержащих элемент E_i в l-ом конденсированном и газообразном выходном потоке; x_m, y_m и 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:

$$\sum_{k=1}^{K^f}G_k^f\Delta H_k^f+\sum_{k=1}^{K^г}G_k^г\Delta H_k^г+Q_{ист}=$$
$$=\sum_{l=1}^{L^f}G_l^f\Delta H_l^f+G^г\Delta H^г+\sum\Delta H_{х.р}+Q_{пот}, \qquad (4)$$

где ΔH_k^f, $\Delta H_k^г$, ΔH_l^f, $\Delta H^г$ – изменение удельных энтальпий входных-выходных потоков при нагреве от 298 К до температуры T, кДж/кг; $Q_{ист}$ – приход тепла внешних источников, кДж; $Q_{пот}$ – тепловые потери в окружающую среду, кДж; $\sum\Delta H_{х.р}$ – суммарный тепловой эффект независимых реакций перехода системы из начального состояния в конечное, кДж.

Уравнение (4) можно представить следующим образом:

$$\sum_{k=1}^{K^f}\sum_{m=1}^{N_k^f}\left(\Delta H_T^\circ\right)_m\frac{G_k^f\left|R_m\right|_k}{100M_{R_m}}+$$
$$+\sum_{k=1}^{K^г}\sum_{m=1}^{N_k^г}\left(\Delta H_T^\circ\right)_m\frac{G_k^г\left\{R_m\right\}_k}{100M_{R_m}}+Q_{ист}=$$
$$=\sum_{l=1}^{L^f}G_l^f\Delta H_l^f+G^г\Delta H^г+$$
$$+\sum_{w=1}^{W}\Delta H_w^\circ\left(\sum_{k=1}^{K}\frac{G_k R_{kw}}{100}-\sum_{l=1}^{L}\frac{G_l R_{lw}}{100}\right)+Q_{пот}, \qquad (5)$$

где W – число независимых реакций в системе; $\left(\Delta H_T^\circ\right)_m$ и $\left(\Delta H_T^\circ\right)_n$ – 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° – тепловой эффект w-ой химической реакции, кДж/моль.

Используемые в моделях термодинамические функции веществ и химических реакций рассчитываются при любой температуре в диапазоне температур 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 используют теорию К. Вагнера.

Создание инструментальной системы «Инжиниринг – Металлургия»

Математические модели реализованы в инструментальной системе «Инжиниринг – Металлургия», разработанной средствами MS Excel и Delphi, путем осуществления связей и математических расчетов между элементами совокупности таблиц и применения встроенного программного сервиса Solver. Модель представляет собой комплекс программ и

баз данных, адаптированных для ряда металлургических технологий [19]. 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 созданы следующие базы данных: «Химический состав материалов», «Термодинамические свойства индивидуальных веществ», «Параметры взаимодействия первого 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. 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.

В рамках четвертого этапа с использованием инструментальной системы осуществляют разработку металлургической технологии путем нахождения оптимальных режимов и определения путей достижения этих режимов для заданных параметров выходного потока и процесса при оптимизации технико-экономических показателей.

Определение оптимальных технологических режимов проводят по следующему алгоритму. После формирования исходных данных рассчитывают все стадии и подпроцессы для заданного варианта технологии: горение топлива, выделение и горение летучих компонентов, испарение влаги, разложение карбонатов, окислительно-восстановительные процессы, шлакообразование. Осуществляют расчет материального баланса процесса на уровне потоков, веществ и элементов, а также определяют массы и химический состав продуктов (металла, шлака, газа). Проводят термодинамический анализ независимых химических реакций перехода системы из начального состояния в конечное. Определяют энтальпии входных и выходных потоков и изменение энтальпии системы в результате протекания химических реакций, после чего рассчитывают тепловой баланс и определяют температуры металла, шлака и газа. Рассчитывают технико-экономические показатели, решают задачу оптимизации по формальным критериям.

Решение оптимизационной задачи

Постановка оптимизационной задачи заключается в определении управляющих воздействий на процесс путем поиска экстремума требуемого критерия при соблюдении системы ограничений. В качестве критериев могут быть выбраны следующие показатели:

– суммарный расход шихтовых материалов на единицу продукции, кг/т:

$$P = \sum_{k=1}^{K} g_k = \frac{\sum_{k=1}^{K} G_k}{G_{\text{прод}}} 1000 \to \min, \tag{6}$$

– затраты на единицу продукции, руб/т:

$$C = \frac{\sum_{k=1}^{K} G_k Ц_k}{G_{\text{прод}}} \to \min, \tag{7}$$

– энергозатраты на единицу продукции, ГДж/т:

$$Э = \frac{\sum_{k=1}^{K} G_k Э_k}{G_{\text{прод}}} \to \min, \tag{8}$$

– производительность агрегата:

$$П = G_м = \sum_{n=1}^{N_м} G_{[K_n]}^{\text{вых}} \to \max, \tag{9}$$

где g_k – удельный расход k-го материала, кг/т; G_k – расход k-го материала, кг; $G_{\text{прод}}$ – выход продукта, кг; $Ц_k$ – цена k-го материала входного потока, руб/т; $Э_k$ – удельная энергоемкость k-го материала, ГДж/т; $G_м$ – масса металла, кг; $N_м$ – количество компонентов металла; $G_{[R_n]}^{\text{вых}}$ – масса n-го компонента металла, кг.

Решение задачи оптимизации заключается в определении экстремума одного из вышеперечисленных критериев при соблюдении следующих ограничений.

1. Ограничения на диапазоны изменения расходов компонентов входных потоков:

$$G_{k_{\min}} < G_k < G_{k_{\max}}. \tag{10}$$

2. Ограничения на параметры выходных потоков:

$$\begin{gathered} R_{n_{\min}} < R_n < R_{n_{\max}}; \\ T_{\min} < T < T_{\max}. \end{gathered} \tag{11}$$

3. Соблюдение закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов:

$$\sum_{k=1}^{K^f} G_k^f + \sum_{k=1}^{K^г} G_k^г = \sum_{l=1}^{L^f} G_l^f + G^г; \tag{12.1}$$

$$\sum_{k=1}^{K^f}\sum_{m=1}^{N_k^f}\frac{G_k^f\left|R_m\right|_k}{100}+\sum_{k=1}^{K^г}\sum_{m=1}^{N_k^г}\frac{G_k^г\left\{R_m\right\}_k}{100}=$$
$$=\sum_{l=1}^{L^f}\sum_{n=1}^{N_l^f}\frac{G_l^f\left|R_n\right|_l}{100}+\sum_{n=1}^{N^г}\frac{G^г\left\{R_n\right\}}{100}; \qquad (12.2)$$

$$\sum_{k=1}^{K^f}\sum_{m=1}^{N_k^{E_i^f}}\frac{G_k^f\left|E_{ix_m}E_{jy_m}\right|_k}{100}\frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m}E_{jy_m}}}+$$
$$+\sum_{k=1}^{K^г}\sum_{m=1}^{N_k^{E_i^г}}\frac{G_k^г\left\{E_{ix_m}E_{jy_m}\right\}_k}{100}\frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m}E_{jy_m}}}=$$
$$=\sum_{l=1}^{L^f}\sum_{n=1}^{N_l^{E_i^f}}\frac{G_l^f\left|E_{ix_n}E_{jy_n}\right|_l}{100}\frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n}E_{jy_n}}}+$$
$$+\sum_{n=1}^{N_l^{E_i^г}}\frac{G_l^г\left\{E_{ix_n}E_{jy_n}\right\}_l}{100}\frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n}E_{jy_n}}}; \qquad (12.3)$$

4. Соблюдение закона сохранения энергии:

$$\sum_{k=1}^{K^f}\sum_{m=1}^{N_k^f}\left(\Delta H_T^\circ\right)_m\frac{G_k^f\left|R_m\right|_k}{100M_{R_m}}+$$
$$+\sum_{k=1}^{K^г}\sum_{m=1}^{N_k^г}\left(\Delta H_T^\circ\right)_m\frac{G_k^г\left\{R_m\right\}_k}{100M_{R_m}}+Q_{\text{ист}}=$$
$$=\sum_{l=1}^{L^f}G_l^f\Delta H_l^f+G^г\Delta H^г+$$
$$\sum_{w=1}^{W}\Delta H_w^\circ\left(\sum_{k=1}^{K}\frac{G_k R_{kw}}{100}-\sum_{l=1}^{L}\frac{G_l R_{lw}}{100}\right)+Q_{\text{пот}}. \qquad (13)$$

5. Выполнение целевых условий по остальным критериям.

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

При реализации этапов разработанного метода осуществляется двухконтурная оптимизация (рис. 2) путем решения оптимизационных задач двух видов: нахождение оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах и определение оптимальных режимов технологий прямого восстановления металлов.

Применение метода моделирования и оптимизации при разработке технологий в агрегате СЭР

С использованием созданных метода и инструментальной системы разработаны оптимальные режимы ряда энерго- и ресурсосберегающих технологий для нового непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа в агрегате СЭР [20]:

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

– прямое восстановление 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 %;

– получение марганцевых сплавов из карбонатных и оксидных руд, особенностью которого 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;

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

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 энергии отходящего технологического газа и дает возможность получения удвоенного количества кондиционного синтез-газа с калорийностью 16 525 кДж/кг, являющегося товарным продуктом для последующей его переработки в моторное топливо.

Выводы

Создан метод системного решения взаимосвязанных задач по определению наилучших условий реализации технологий прямого восстановления металлов, особенностью которого является решение в рамках двухконтурной оптимизации многокритериальных задач двух видов: нахождение оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамической системе и определение оптимальных режимов ресурсосберегающих металлургических технологий. В рамках решения задачи определения оптимальных условий протекания процессов в металлургической системе разработана методика термодинамического моделирования и предложены показатели, отражающие окислительно-восстановительный потенциал системы. Разработаны математические модели, осуществляющие взаимосвязь параметров потоков и физико-химических процессов в металлургическом агрегате на основе фундаментальных законов термодинамики и современных теорий строения фаз. Математические модели реализованы в инструментальной системе «Инжиниринг – Металлургия», которая включает комплекс программ и баз

Рис. 2. Схема решения задачи оптимизации

Fig. 2. Scheme for optimization problem solving

данных применительно к решению широкого круга оптимизационных задач ряда металлургических технологий. Разработана методика исследования и расчета оптимальных технологических режимов процессов прямого восстановления металлов с использованием инструментальной системы «Инжиниринг – Металлургия». 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, при соблюдении закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов, закона сохранения энергии и выполнении целевых условий по остальным критериям. С использованием инструментальной системы «Инжиниринг – Металлургия» разработаны оптимальные режимы энерго- и ресурсосберегающих технологий для нового непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа в агрегате СЭР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юсфин Ю.С., Гиммельфарб А.А., Пашков Н.Ф. Новые процессы получения металла. – М.: Металлургия, 1994. – 320 с.
2. Лисиенко В.Г., Соловьева Н.В., Трофимова О.Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.
3. Процессы преимущественно жидкофазного восстановления железа // Технические науки. Металлургия и обработка металлов. [Электронный ресурс]. URL: http://knigi.link/obrabotka-metallov-metallurgiya/protsessyi-preimuschestvenno-jidkofaznogo-12575.html. (дата обращения: 09.04.2020).
4. Князев В.Ф., Гиммельфарб А.И., Неменов А.М. Бескоксовая металлургия железа. – М.: Металлургия, 1972. – 272 с.
5. Роменец В.А. Процесс Ромелт. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2005. – 400 с.
6. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. – М.: Металлургиздат, 2014. – 488 с.
7. Chemical WorkBench. URL: http://www.kintech.ru/. (дата обращения: 09.04.2020).
8. NIST-JANAF URL: http://webbook.nist.gov. (дата обращения: 09.04.2020).
9. NASA CEA URL: http://www.lerc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/. (дата обращения: 09.04.2020).
10. MTDATA URL: http://www.npl.co.uk/npl/cmmt/mtdata/mtdata.htm. (дата обращения: 09.04.2020).
11. Thermo-Calc. URL: http://www.thermocalc.se. (дата обращения: 09.04.2020).
12. MALT2 URL: http://www.kagaku.com/malt. (дата обращения: 09.04.2020).
13. HSC Chemistry. URL: (http://www.outokumpu.fi/hsc/. (дата обращения: 09.04.2020).
14. EQS4WIN. URL: http://www.mathtrek.com/. (дата обращения: 09.04.2020).
15. ThermoChemical Calculator. URL: http://blue.caltech.edu/tcc/index.html. (дата обращения: 09.04.2020).
16. F*A*C*T. URL: http://www.crct.polymtl.ca/fact/fact.htm. (дата обращения: 09.04.2020).

17. Рыбенко И.А. Развитие теоретических основ и разработка ресурсосберегающих технологий прямого восстановления металлов с использованием метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации. Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.16.02. – Новокузнецк, 2018. – 40 с.
18. Рыбенко И.А. Инструментальная система «Инжиниринг – Металлургия» для широкого круга оптимизационных задач. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2017. С. 75 – 81.
19. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. – В кн.: III межд. симпозиум «Горение и плазмохимия». 24 – 26 августа 2005. Алматы, Казахстан. – Алматы: изд. Казак университетi, 2005. С. 52 – 58.
20. Рыбенко И.А. Разработка оптимальных технологических режимов получения металлов с использованием методов математического моделирования и инструментальных систем // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2018. № 2. С. 57 – 61.

Поступила в редакцию 20 января 2020 г.
После доработки 5 февраля 2020 г.
Принята к публикации 7 февраля 2020 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 364–372.

TECHNOLOGICAL MODES OF METALS DIRECT REDUCTION IN AN AGGREGATE OF JET-EMULSION TYPE

I.A. Rybenko[1], *Roos Hans-Görg*[2]

[1] **Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia**
[2] **Technische Universität Dresden, Dresden, Sachsen, Germany**

Abstract. The paper presents the method and instrumental system for modeling and optimizing technological modes of direct metal reduction processes in a jet-emulsion aggregate (JER). Stages of the method are considered. The first one is the problem statement: formation of target conditions, choice of the process type, the task and system of optimization criteria. The second stage includes selection of the object of study: setting parameters of input and output flows, process parameters, stages and subprocesses. The third one includes thermodynamic modeling to assess the final equilibrium state in which optimization problem is solved to determine the best conditions for implementation of the processes of metal reduction from oxides in model systems. The fourth stage is development of metallurgical technology (finding the optimum modes and ways for achieving these modes by specified output stream parameters). And the final one is process optimization in technical and economic indicators. As part of the fourth stage, the complex of mathematical models has been developed that reflects relationship of flows and processes in a metallurgical unit. The structure of instrumental system is presented, in which mathematical models and an algorithm for determining optimal technological modes are implemented. A set of optimization criteria has been developed and a scheme for solving two types of optimization problems are presented: finding optimal conditions for reduction processes in thermodynamic systems and determining optimal modes of direct metal reduction. Application of the method to develop optimal technological modes of direct metal production in a JER-type aggregate is shown: metal production from cast iron and mill scale; direct reduction of metal from dusty ores and iron-containing man-made materials; obtaining manganese alloys from carbonate and oxide ores; processing titanium-magnetite concentrates with an almost complete separation of iron-containing and titanium-containing component; and direct reduction of iron with associated production of high-calorie synthesis gas.

Keywords: method, instrumental system, mathematical modeling, optimization, direct metal reduction, technological mode.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-364-372

REFERENCES

1. Yusfin Yu.S., Gimmel`farb A.A., Pashkov N.F. *Novye protsessy polucheniya metalla* [New processes of metal production]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 320 p. (In Russ.).
2. Lisienko V.G., Solov`eva N.V., Trofimova O.G. *Al'ternativnaya metallurgiya: problema legirovaniya, model'nye otsenki effektivnosti* [Alternative metallurgy: problem of alloying, model effectiveness evaluation]. Moscow: Teplotekhnik, 2007, 440 p. (In Russ.).
3. Processes of predominantly liquid-phase reduction of iron. *Tekhnicheskie nauki. Metallurgiya i obrabotka metallov* [Technical science. Metallurgy and metal processing]. Available at URL: http://knigi.link/obrabotka-metallov-metallurgiya/protsessyi-preimuschestvenno-jidkofaznogo-12575.html. (Accessed: 09.04.2020). (In Russ.).
4. Knyazev V.F., Gimmel`farb A.I., Nemenov A.M. *Beskoksovaya metallurgiya zheleza* [Non-coking metallurgy of iron]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 272 p. (In Russ.).
5. Romenets V.A. *Protsess Romelt* [Romelt process]. Moscow: ID Ruda i Metally, 2005, 400 p. (In Russ.).
6. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Rybenko I.A. etc. *Protsess SER – metallurgicheskii struino-emul'sionnyi reaktor* [JER process – metallurgical jet-emulsion reactor]. Moscow: Metallurgizdat, 2014. 488 p. (In Russ.).
7. *Chemical WorkBench*. Available at URL: http://www.kintech.ru/. (Accessed: 09.04.2020).
8. *NIST-JANAF*. Available at URL: http://webbook.nist.gov. (Accessed: 09.04.2020).
9. *NASA CEA*. Available at URL: http://www.lerc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/. (Accessed: 09.04.2020).
10. *MTDATA*. Available at URL: http://www.npl.co.uk/npl/cmmt/mtdata/mtdata.htm. (Accessed: 09.04.2020).
11. *Thermo-Calc*. Available at URL: http://www.thermocalc.se. (Accessed: 09.04.2020).
12. *MALT2*. Available at URL: http://www.kagaku.com/malt. (Accessed: 09.04.2020).
13. *HSC Chemistry*. Available at URL: http://www.outokumpu.fi/hsc/. (Accessed: 09.04.2020).
14. *EQS4WIN*. Available at URL: http://www.mathtrek.com/. (Accessed: 09.04.2020).
15. *ThermoChemical Calculator*. Available at URL: http://blue.caltech.edu/tcc/index.html. (Accessed: 09.04.2020).
16. *F*A*C*T*. Available at URL: http://www.crct.polymtl.ca/fact/fact.htm. (Accessed: 09.04.2020).
17. Rybenko I.A. *Razvitie teoreticheskikh osnov i razrabotka resursosberegayushchikh tekhnologii pryamogo vosstanovleniya metallov s ispol'zovaniem metoda i instrumental'noi sistemy modelirovaniya i optimizatsii. Avtoref. dis... dokt. tekhn. nauk* [Development of theoretical foundations and resource-saving technologies for direct reduction of metals using method and instrumental system of modeling and optimization. Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Novokuznetsk, 2018, 40 p. (In Russ.).
18. Rybenko I.A. "Engineering-Metallurgy" instrumental system for a wide range of optimization tasks. In: *Metallurgiya: tekhnologii,*

innovatsii, kachestvo: tr. XX mezhdunar nauch.-prakt. konf Ch. 1. [Metallurgy: technology, innovation, quality: Papers of the XX Int. Sci.-Pract. Conf. Part 1]. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2017. pp. 75–81. (In Russ.).

19. Trusov B.G. TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures. In: *III mezhd simpozium "Gorenie i plazmokhimiya", 24 – 26 avgusta 2005, Almaty, Kazakhstan* [III Int. Symposium "Combustion and Plasma Chemistry". August 24 – 26, 2005, Almaty, Kazakhstan]. Almaty: izd. Kazak universiteti, 2005, pp. 52–58. (In Russ.).

20. Rybenko I.A. Development of optimal technological modes for producing metals using methods of mathematical modeling and instrumental systems. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2018, no. 2, pp. 57–61. (In Russ.).

Information about the authors:

I.A. Rybenko, *Dr Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Applied Information Technology and Programming* (rybenkoi@mail.ru)
Roos Hans-Görg, *Ph.D, Professor of Mathematics*
hans-goerg.roos@tu-dresden.de)

Received January 20, 2020
Revised February 5, 2020
Accepted February 7, 2020

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Киселева Н.Н., *ведущий редактор*

Расенець В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

Подписано в печать 25.05.2020. Формат 60×90 $^{1}/_{8}$. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,0. Заказ. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35

Индекс 70383

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY