

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 60 Номер 6 2017

• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССОПЕРЕНОСА В КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ КОМПЛЕКСОВ ШЛАКОПЕРЕРАБОТКИ

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ

РАЗРУШЕНИЕ СТАЛЬНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПРИ ДЕФЕКТЕ РАСКАТНОЙ ПРИГАР

• МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИ УПРОЧНЕННОЙ БАЛКИ

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, РАЗМЕРА ЗЕРЕН И ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВОЙНИКОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ Э2412

• ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ В ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

НЕКОТОРЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМА ИЗ ОКСИДА WO_3 КРЕМНИЕМ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 6, 2017

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 60

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)

Ответственный секретарь: ПОЛУЛЯХ Л.А.
(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

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 Цветмет-обработка», 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)

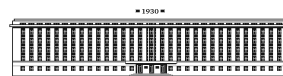
КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫГЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
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)
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 Циньхуа, 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:

119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел./факс: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@isis.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@sibsiiu.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»

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)

Executive secretary: POLULYAKH L.A.
(National Research Technological University "MISIS", Moscow)

Deputy Executive secretary: BASHCHENKO L.P.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

N.P. ALESHIN (Russian Academy 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 "**Metallur-
gical 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)

S.S. LAZUTKIN (Group of Companies "MetProm",
Moscow)

H. LINN (Linn High Therm GmbH, Hirschbach,
Germany)

V.I. LYSAK (Volgograd State Technical University,
Volgograd)

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)

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
"**Innovations 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)

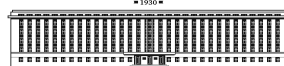
M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

V.I. ZOLOTUKHIN (Tula State University, Tula)

Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

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

Editorial Addresses:

119049, Moscow, Leninskii prosp., 4
National Research Technological University "MISIS",
Tel./fax: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@isis.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.

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

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Кузнецов С.Н., Протопопов Е.В., Фейлер С.В., Темлянец М.В. Математическое моделирование процессов гидродинамики и массопереноса в конвертерной ванне при использовании железосодержащих концентратов комплексов шлакопереработки 425
- Лехов О.С., Михалев А.В. Исследование установки непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Сообщение 1 430
- Шинкин В.Н. Разрушение стальных труб большого диаметра при дефекте раскатной пригар 436
- Савельев А.Н., Савельева Е.А., Локтева Н.А. Оценка прочностных свойств материалов элементов технологических машин на основе синергетически организованных сигналов акустической эмиссии 443

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В., Спирин Н.А. Разработка и исследование устройств воздушного охлаждения вращающегося вала печного высокотемпературного вентилятора многодискового типа 451

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Иванов Ю.Ф., Белов Е.Г., Громов В.Е., Коновалов С.В., Косинов Д.А. Структурно-фазовые состояния, механические и трибологические свойства термомеханически упрочненной балки 457
- Полетаев Г.М., Зоря И.В., Кулабухова Н.А., Новоселова Д.В., Старостенков М.Д. Исследование методом молекулярной динамики взаимодействия водорода с наночастицами палладия и никеля 463
- Федоров В.А., Кириллов А.М., Плужникова Т.Н. Влияние скорости деформирования, размера зерен и температуры на механическое двойникование в электротехнической стали Э2412 469

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Меламуд С.Г., Юрьев Б.П., Гольцев В.А. Изучение процесса окисления в железорудных материалах при низких температурах 474
- Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Шурупов В.М. Некоторые термодинамические аспекты восстановления вольфрама из оксида WO_3 кремнием 481

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Шорохова А.В., Новичихин А.В. Комплексирование и математическое моделирование технологий переработки железорудных отходов обогащательных фабрик 486

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора УНРС 493

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- S.N. Kuznetsov, E.V. Protopopov, S.V. Feiler, M.V. Temlyantsev Mathematical modeling of hydrodynamic processes and mass transfer in the converter bath when using the iron-containing concentrates of slag processing complexes 425
- O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev Continuous casting and deformation installation for the production of steel plates for welded pipes. Report 1 430
- V.N. Shinkin Destruction of large-diameter steel pipes at rolled burnout defect 436
- A.N. Savel'ev, E.A. Savel'eva, N.A. Lokteva Strength properties evaluation of materials of technological machines elements based on the synergetically organized signals of acoustic emission 443

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- L.A. Zainullin, M.V. Kalganov, D.V. Kalganov, N.A. Spirin Development and study of devices for air cooling of the rotating shaft in high-temperature furnace fan of multi-disc type 451

MATERIAL SCIENCE

- Yu.F. Ivanov, E.G. Belov, V.E. Gromov, S.V. Kononov, D.A. Kosinov Structure-phase states, mechanical and tribological properties of thermomechanically strengthened beam 457
- G.M. Poletaev, I.V. Zorya, N.A. Kulabukhova, D.V. Novoselova, M.D. Starostenkov The study of hydrogen interaction with palladium and nickel nanoparticles by the method of molecular dynamics 463
- V.A. Fedorov, A.M. Kirillov, T.N. Pluzhnikova Influence of deformation rate, grain size and temperature on mechanical twinning in electrical steel E2412 469

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

- S.G. Melamud, B.P. Yur'ev, V.A. Gol'tsev Oxidation process in iron ore materials at low temperatures 474
- Yu.V. Bendre, V.F. Goryushkin, R.E. Kryukov, N.A. Kozyrev, V.M. Shurupov Some thermodynamic aspects of WO_3 recovery by silicon 481

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

- A.V. Shorokhova, A.V. Novichikhin Integration and mathematical modeling of processing technologies of concentrating plant iron ore waste 486

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- V.I. Odinokov, E.A. Dmitriev, A.I. Evstigneev Numerical modeling of the process of filling the CCM mold with metal 493

УДК 621.785:536.212

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССОПЕРЕНОСА В КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ КОМПЛЕКСОВ ШЛАКОПЕРЕРАБОТКИ

Кузнецов С.Н., соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов (mchmsis@mail.ru)

Протопопов Е.В., д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов (protopopov@sibsiu.ru)

Фейлер С.В., к.т.н., и.о. заведующего кафедрой металлургии черных металлов (feylersv@gmail.com)

Темлянцева М.В., д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии,

проректор по научной работе и инновациям (uchebn_otdel@sibsiu.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Значительную часть отходов металлургического производства составляют сталеплавильные шлаки, выход которых оценивается в среднем от 150 до 200 кг/т стали. При существующих объемах производства стали в Российской Федерации ежегодно образуется в среднем 9 млн. т шлаков сталеплавильного производства, в составе которых 8 – 11 % чистого металла, 15 – 40 % – оксидов железа. Общее количество железа достигает 20 – 30 % от массы шлака. Сталеплавильные шлаки являются ценными железосодержащими техногенными материалами, которые необходимо подвергать дальнейшей переработке и возвращению в производство. Для переработки образующихся сталеплавильных шлаков на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» функционирует комплекс шлакопереработки, который представляет собой технологическую линию, позволяющую путем магнитной сепарации поэтапно выделять из конвертерного шлака железосодержащие включения. Образующийся железосодержащий концентрат представляет собой материал фракций 0 – 10 мм (предназначен для использования в агломерационном производстве), 10 – 80 мм (для использования в доменном производстве) и 80 – 250 мм (для использования в сталеплавильном производстве). В работе выполнен анализ возможности применения фракцией 0 – 10 и 10 – 80 мм железосодержащих концентратов при выплавке стали в 160-т конвертерах. На основе разработанной математической модели проведена серия многовариантных расчетов для исследования динамики плавления и распределения в металлическом расплаве присадки железосодержащих концентратов при различных траекториях ввода и различных его количествах. Анализ результатов математического моделирования позволил получить новую информацию о гидродинамических процессах при продувке конвертерной ванны с присадками железосодержащих концентратов комплекса шлакопереработки АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Ключевые слова: конвертер, сталеплавильный шлак, рециклинг, моделирование, плавление, гидродинамика.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-425-429

В настоящее время мировыми металлургическими производителями накоплены значительные объемы техногенных отходов [1 – 6], основными из которых являются шлаки доменного, конвертерного, электросталеплавильного производств. Так, в зависимости от марки выплавляемой стали, конструкции сталеплавильного агрегата и особенностей технологии в конвертерном производстве нормальный технологический ход процесса обеспечивается при направленном формировании шлака по ходу продувки в количестве 10 – 12 % от массы металлозавалки. Следует учитывать, что помимо оксидов кремния, кальция, магния, марганца, алюминия, железосодержащих оксидов FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, шлаки содержат металлическое железо в виде корольков, общее количество которых может достигать 8 – 11 % от массы шлака [7]. За время работы металлургических предприятий сформированы шлаковые отвалы, занимающие значительные площади потенциально полезных земель, а объемы стале-

плавильных шлаков исчисляются десятками миллионов тонн. В частности, в Кузбассе шлаковые отвалы АО «ЕВРАЗ ЗСМК» – это более 40 млн. т сталеплавильных шлаков [8], которые являются ценными железосодержащими техногенными материалами. Совершенно очевидно, что требуется их дальнейшая переработка и возвращение в производство.

Одним из малозатратных способов утилизации сталеплавильных шлаков является их обогащение, например, методом магнитной сепарации и путем использования магнитной фракции в качестве железосодержащего шихтового компонента [9 – 11]. В процессе переработки железосодержащего концентрата может быть получен материал с общим содержанием железа в пределах 40 – 80 %, классифицируемый по фракциям 0 – 10, 10 – 80 и 80 – 250 мм. Железосодержащие концентраты комплексов шлакопереработки можно присаживать в завалку, по ходу продувки или комбинированно, а также использовать в качестве частичного

(полного) заменителя металлического лома – основного охладителя конвертерной операции [11].

При возвращении таких отходов в плавку важной технологической задачей является определение рациональной схемы присадки материала и отработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной операции. В этом случае предварительно выполненное численное моделирование динамики плавления железосодержащего концентрата в расплаве позволит получить дополнительную информацию для разработки рациональной ресурсосберегающей технологии конвертерной плавки. Большой научный и практический интерес может представлять изучение особенностей протекания гидродинамических и массообменных процессов в рассматриваемых условиях и динамика усвоения железосодержащего концентрата в конвертерной ванне. При постановке задачи и изучении особенностей процессов массопереноса и плавления концентрата использовали ранее полученные сведения о гидродинамических и тепловых условиях поведения расплава при верхней продувке конвертерной ванны [12 – 16].

В основу математической модели положен метод коллективного движения частиц в расплаве [17, 18], который правомерно применять при объемной плотности дисперсного концентрата в расплаве менее 0,2. При этом движение и превращение частиц рассматриваются не зависящими от движения и превращений других частиц, а их влияние учитывается исключительно через характеристики среды в целом. В таких условиях объектом наблюдения служит не отдельная частица, находящаяся в расплаве, а целая группа частиц – конгломерат частиц твердой дисперсной фазы β в конвертерной ванне, одной из основных характеристик которого является объемная плотность. Пространственное распределение частиц конгломерата в определенный момент времени зависит не только от средней скорости движения твердой фазы, которая характеризует конвективный перенос, но и от эффективного коэффициента диффузии, характеризующего динамику распределения частиц, которая вызвана неоднородностями течения и циркуляционными потоками в ванне.

С целью упрощения постановки задачи и уменьшения объемов вычислений в математической модели использован ряд допущений. В частности, поскольку частицы фазы β имеют относительно небольшой размер, межфазной скоростью твердой и жидкой (расплава) фаз пренебрегаем. Такое допущение позволяет рассматривать гидродинамическую задачу как односкоростную, заключающуюся в нахождении поля скоростей среды в целом [19]. Таким образом, математическая модель учитывает только процесс плавления и распределения материала в расплаве в результате плавления железосодержащего концентрата в конвертерной ванне. При этом механическое влияние на фазу β дисперсных шлакообразующих материалов не учитывали и динамику шлакообразования не рассматривали.

В такой постановке задачи шлакообразующие присадки оказывают только локальное тепловое воздействие за счет первоначального прогрева до температуры расплава.

Совместно с твердой примесной фазой β рассматривали жидкую фазу η продуктов ее плавления. Принимали, что фаза η включала в себя все продукты плавления фазы β , и учитывали тепловые эффекты взаимного превращения компонентов фазы η между собой.

Таким образом, изучаемые процессы массопереноса можно описать системой следующих уравнений:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \bar{v}(\beta \bar{v}) = \bar{v}(D_{\beta} \bar{v} \beta) + \Phi; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \bar{v}(\eta \bar{v}) = \bar{v}(D_{\eta} \bar{v} \eta) - \frac{\rho_{\beta}^{\circ}}{\rho_{\eta}} \Phi, \quad (2)$$

где $\bar{v}$ – скорость среды в целом; D_{β} и D_{η} – коэффициенты эффективной диффузии фаз β и η ; ρ_{β}° и ρ_{η}° – истинные плотности фаз β и η ; Φ – объемная плотность твердой фазы.

Тепловая сторона рассматриваемого процесса описывается уравнением

$$C_e \frac{dT}{dt} = \bar{v}(\lambda'_e \bar{v} T) + L_e \frac{\rho_{\beta}^{\circ}}{\rho_0} \Phi + \Theta, \quad (3)$$

где $\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \bar{v} T$ – субстанциональная производная

от температуры T среды; C_e – эффективная теплоемкость среды; λ'_e – эффективная теплопроводность среды, поделенная на среднюю плотность среды ρ_0 ; L_e – эффективная удельная теплота фазового превращения, учитывающая теплоту плавления фазы β и тепловой эффект от растворения и химических реакций фазы η ; Θ – коэффициент, учитывающий тепловое влияние на расплав при вводе шлакообразующих.

Тогда

$$\Theta_e \left[(C_b + \phi C_c)(T_b^0 - T_p) + \phi L_c \right] \psi, \quad (4)$$

где C_b и C_c – теплоемкость твердой извести и плавикового шпата; ϕ – доля плавикового шпата (от общего количества шлакообразующих присадок); L_c – удельная теплота плавления плавикового шпата; T_b^0 – начальная температура присадок шлакообразующих; T_p – температура расплава; ψ – массовый расход шлакообразующих присадок в месте их ввода, позволяющий описать интенсивность их подачи.

Первое слагаемое в квадратных скобках формулы (4) учитывает тепло, затрачиваемое на нагрев шлакообразующих до температуры расплава, а второе слагаемое учитывает тепло, расходуемое на плавление плавикового шпата.

В такой постановке задачи объемная плотность твердой фазы Φ определяет кинетику фазового превращения. В случае подачи в расплав железосодержащего концентрата предположим, что дисперсный материал имеет нерегулярную форму, неоднородный фракционный состав и включает все частицы, находящиеся в единичном объеме [18]. Тогда

$$\frac{d\beta}{dt} = \Phi = -K'\beta^{1/3}\Delta_f T_f,$$

где $K' = \sqrt[3]{3(4\pi N)^2 \frac{Nu\lambda_e}{2L\rho_\beta^0}}$ – кинематический коэффициент; N – количество частиц твердой фазы в единичном объеме; T_f – температура плавления концентрата; ρ_β^0 – плотность частиц концентрата; Nu – число Нуссельта.

Граничные условия для уравнений (1) и (2) на всех границах расчетной области определяются условиями непротекания фаз β и η (подача фазы β в расплав учитывается объемной плотностью твердой фазы Φ). Граничные условия для уравнения (3) выбираются по аналогии с работой [20].

Численное решение поставленной задачи реализовывали с применением явной разностной схемы с использованием аппроксимационных слагаемых для эффективных коэффициентов диффузии и теплопроводности [17].

На основе математической модели проведена серия многовариантных расчетов для исследования динамики плавления и распределения присадки железосодержащего концентрата при различных траекториях ввода и различных его количествах. Расчеты проведены для геометрии конвертерной ванны, соответствующей рабочему пространству 160-т агрегатов АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Количество присаживаемого концентрата на плавку составляло 4 – 6 т или 3,5 – 7,5 кг/т годной стали. Траектория подачи материала была определена особенностями конструкции тракта подачи сыпучих материалов, а при использовании завалочных совков – условиями распределения материала в объеме ванны в области реакционных зон взаимодействия с кислородными струями. Время ввода концентрата принимали 30 – 40 с, зона ввода концентрата составляла 0,2 м от оси симметрии конвертера. Гидродинамическая обстановка в конвертере принята в соответствии с полученной ранее информацией [20].

Пример визуализированных результатов математического моделирования представлен на рисунке (стрелками показано направление движения циркуляционных потоков расплава, локальными кривыми – линии изо-концентрации фазы β (сплошные) и фазы η (прерывистые)).

При поступлении в конвертер железосодержащий концентрат захватывается восходящими вверх вдоль реакционной зоны потоками расплава и вращающими-

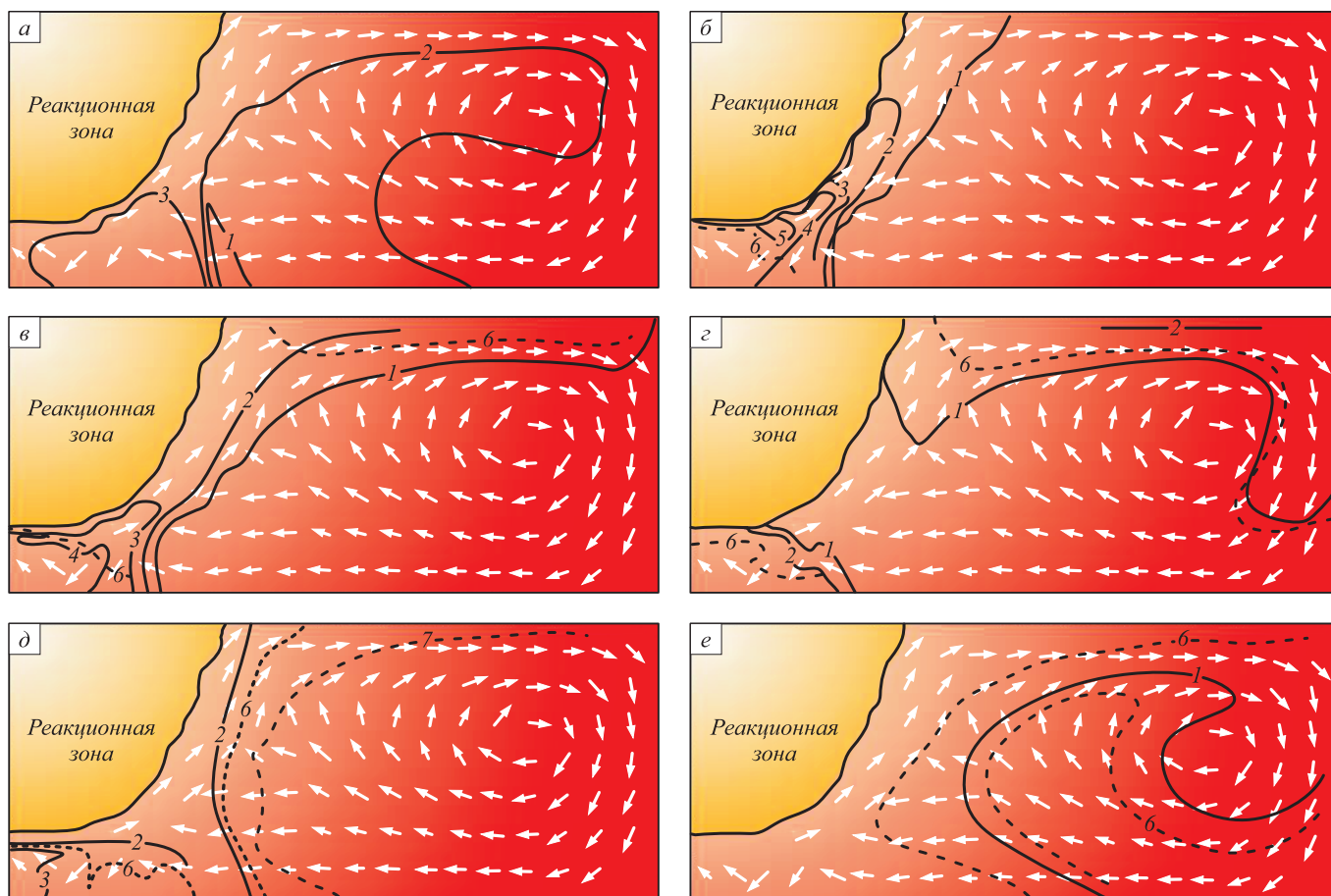
ся под реакционными зонами турбулентными вихрями (см. поз. *a* рисунка). После прекращения подачи концентрата (см. поз. *a* рисунка) последний, как правило, распределяется на две условные части: первая захватывается в глобальный вихрь и распространяется по всему объему ванны; вторая часть материала остается в зоне действия локальных вихрей под реакционными зонами. Указанные обстоятельства в целом определяют особенности распределения фазы β при подаче железосодержащих концентратов. Одновременно с распределением в ванне фазы β происходит ее плавление, в результате чего образуется фаза η (см. поз. *б* рисунка). Процесс плавления вследствие локального температурного перегрева [19] происходит наиболее интенсивно, на поз. *б* рисунка показана изолиния концентрации фазы η в нижней части объема ванны конвертера (под реакционными зонами). На поз. *в* рисунка – аналогичное распространение изолиний появляется уже и в верхней части конвертерной ванны. Плавление фазы β приводит к уменьшению ее общего количества. Например, уже к 110 с (см. поз. *е* рисунка) фаза β исчезает из области под реакционными зонами. Указанные обстоятельства приводят также к увеличению количества фазы η , которая занимает в течение продувки все больший объем в конвертерной ванне.

В результате интенсивного движения расплава при подаче концентрата материал интенсивно разносится по всему объему ванны конвертера и в дальнейшем расплавляется. По ходу продувки фаза η образуется практически равномерно по всему объему ванны.

Выводы. Методами математического моделирования исследованы гидродинамические процессы при продувке металлического расплава в конвертере с присадкой железосодержащего концентрата комплекса шлакопереработки АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (использовали фракцию 10 – 80 мм). Установлено, что при подаче материала по ходу плавки в результате интенсивного движения твердые частицы концентрата равномерно распределяются по объему ванны и в дальнейшем расплавляются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов С.Н., Волынкина Е.П., Протопопов Е.В., Зоря В.Н. Металлургические технологии переработки техногенных мезотерождений, промышленных и бытовых отходов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 294 с.
2. Kuhn M., Drissen P., Schrey H. Successful treatment of liquid BOF slag at ThyssenKrupp Steel works to solve the problem of volume stability // Proc. 3rd European Oxygen Steelmaking Conf.: 30 Oct - 1 Nov 2000. 2000. P. 521 – 531.
3. Sahay J.S., Nadpal O.P., Prasad S. Waste management of steel slag // Steel Times International. 2000. No. 2. P. 38 – 40.
4. Barella S., Gruttadauria A., Magni F. etc. Survey about Safe and Reliable Use of EAF Slag // ISIJ International. 2012. Vol. 52. No. 12. P. 2295 – 2302.
5. Balajee S.R., Callaway P.E., Keilman L.M. Production and BOF recycling of waste oxide briquettes at inland steel // Iron and Steelmaker. 1995. Vol. 22. No. 8. P. 11 – 21.



Поля концентраций фаз в объеме конвертера после завершения подачи концентрата (а) и через 20 с (б), 40 с (в), 60 с (г), 100 с (д) и 110 с (е) после завершения подачи:
1 – 0,05 % β; 2 – 0,2 % β; 3 – 1 % β; 4 – 4 % β; 5 – 6 % β; 6 – 10^{-4} % η; 7 – 10^{-3} % η

Areas of phase concentrations in converter volume after completion of concentrate input (a), in 20 s (b), 40 s (v), 60 s (g), 100 s (d) and 110 s (e) after filing:
1 – 0,05 % β; 2 – 0,2 % β; 3 – 1 % β; 4 – 4 % β; 5 – 6 % β; 6 – 10^{-4} % η; 7 – 10^{-3} % η

6. Weber R. Steelproduction with optimized energy and raw matetial inhut. ASM-Congress Cincinnati. Ohio, 1992. P. 21 – 27.
7. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. Учебник для вузов. – М.: Мир, АСТ, 2003. – 528 с.
8. Анашкин Н.С., Павленко С.И. Мартеновские шлаки и их использование в металлургии и других отраслях народного хозяйства. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 136 с.
9. Гладских В.И., Гостенин В.А., Бочкарев А.В. и др. Переработка сталеплавильных шлаков на установке AMCOM // Сталь. 2009. № 10. С. 107, 108.
10. Голов Г.В., Ситников С.М., Калимулина Е.Г. Технология извлечения металла из отвальных шлаков // Сталь. 2001. № 8. С. 83.
11. Тарабрина Л.А., Курган Т.А., Игнатьева Н.С. Процессы переработки шлаков на ОАО «ММК» // Металлург. 2000. № 9. С. 26, 27.
12. Булгаков В.Г., Бондарев Ю.А., Агеев Е.Е. Использование брикетов из отходов металлургического производства для частичной или полной замены передельного чугуна при выплавке стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 1985. № 9. С. 72.
13. Noro Katsnhiko, Takenchi Mitsugu, Mitukami Yoshimasa Necessity of scrap reclamation technologies and present conditions of technical development // ISIJ Int. 1997. Vol. 37. No. 3. P. 27 – 31.
14. Bernard Trentini. Scrap consumption in the oxygen converter // Steel Times. 1985. No. 2. P. 608 – 610.
15. Goodman N. Slag splashing of BOF converters // Iron and Steel Inst. 1996. No. XXX. P. 24 – 33.
16. Singh V.A., Lenka S.N., Ajmani S.K. etc. Novel bottom stirring scheme to improve BOF performance through mixing and mass transfer modelling // ISIJ International. 2009. Vol. 49. No. 12. P. 1889 – 1894.
17. Самохвалов С.Е. Теплофизические процессы в многофазных средах: теоретические основы компьютерного моделирования. – Киев: изд. Института системных исследований. Мин. обр. Украины, 1994. – 172 с.
18. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Наука, 1976. – 296 с.
19. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Самохвалов С.Е. и др. Численное моделирование перемешивания и теплообмена в конвертерной ванне при комбинированной продувке // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 12. С. 3 – 8.
20. Протопопов Е.В., Мокринский А.В., Чернятевич А.Г., Жибинова И.А. Исследование гидродинамики конвертерной ванны при продувке расплава в агрегате жидкофазного восстановления // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 6. С. 7 – 11.

Поступила 13 апреля 2017 г.

MATHEMATICAL MODELING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES AND MASS TRANSFER IN THE CONVERTER BATH WHEN USING THE IRON-CONTAINING CONCENTRATES OF SLAG PROCESSING COMPLEXES

S.N. Kuznetsov, E.V. Protopopov, S.V. Feiler, M.V. Temlyantsev

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. A significant part of the steel industry wastes are steel smelting slags, the output of which is estimated at an average from 150 to 200 kg/ton of steel. With the existing volumes of steel production in the Russian Federation annually approximately 9 million tons of steelmaking slag is generated. They contain 8–11 % of pure metal, and 15–40 % in the form of iron oxides. The total amount of iron reaches 20–30 % of the mass of the slag. Steelmaking slags are valuable iron-containing technogenic materials that require further processing and recycling in the production. For the processing of the formed steel-smelting slags, JSC “EVRAZ ZSMK” operates a slag processing complex, which is a technological line allowing step-by-step separation of iron-containing inclusions from converter slag due to the use of magnetic separation methods. The obtained iron-containing concentrate is a fraction material: 0–10 mm – intended for use in agglomeration production, 10–80 mm – in blast-furnace production and 80–250 mm in steelmaking. The analysis of the possibility of the use of iron-containing concentrates with the fraction of 0–10 and 10–80 mm during steel smelting in 160-ton converters was carried out. On the basis of the developed mathematical model, a series of multivariate calculations were carried out to study the dynamics of melting and averaging the addition of iron-containing concentrates at various trajectories of input and its various amounts. Analysis of the results of mathematical modeling made it possible to obtain new information on hydrodynamic processes during the blowing of the converter bath with addition of iron-containing concentrates of the slag processing complex JSC “EVRAZ ZSMK”.

Keywords: converter, steelmaking slag, recycling, modeling, melting, hydrodynamics.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-425-429

REFERENCES

1. Kuznetsov S.N., Volynkina E.P., Protopopov E.V., Zorya V.N. *Metallurgicheskie tekhnologii pererabotki tekhnogennykh mestorozhdenii, promyshlennykh i bytovykh otkhodov* [Metallurgical technologies for processing technogenic deposits, industrial and domestic waste]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2014, 294 p. (In Russ.).
2. Kuhn M., Drissen P., Schrey H. Successful treatment of liquid BOF slag at Thyssen Krupp Steel works to solve the problem of volume stability. In: *Proc. 3rd European Oxygen Steelmaking Conf.: 30 Oct - 1 Nov 2000*. 2000, pp. 521–531.
3. Sahay J.S., Nadpal O.P., Prasad S. Waste management of steel slag. *Steel Times International*. 2000, no. 2, pp. 38–40.
4. Barella S., Gruttadauria A., Magni F., Mapelli C., Mombelli D. Survey about Safe and Reliable Use of EAF Slag. *ISIJ International*. 2012, vol. 52, no. 12, pp. 2295–2302.
5. Balajee S.R., Callaway P.E., Keilman L.M. Production and BOF recycling of waste oxide briquettes at inland steel. *Iron and Steelmaker*. 1995, vol. 22, no. 8, pp. 11–21.
6. Weber R. Steel production with optimized energy and raw material input. *ASM-Congress Cincinnati. Ohio*, 1992, pp. 21–27.
7. Kudrin V.A. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali. Uchebnik dlya vuzov* [Theory and technology of steel production. Textbook for universities]. Moscow: Mir, AST, 2003, 528 p. (In Russ.).
8. Anashkin N.S., Pavlenko S.I. *Martenovskie shlaki i ikh ispol'zovanie v metallurgii i drugikh otraslyakh narodnogo khozyaistva* [Marten slags and their use in metallurgy and other branches of the national economy]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2006, 136 p. (In Russ.).
9. Gladkikh V.I., Gostenin V.A., Bochkarev A.V., Sukinova N.V., Murzina Z.N. Processing of steelmaking slags at the AMCOM plant. *Stal'*. 2009, no. 10, pp. 107–108. (In Russ.).
10. Golov G.V., Sitnikov S.M., Kalimulina E.G. Technology for extracting the metals from dump slag. *Stal'*. 2001, no. 8, pp. 83. (In Russ.).
11. Tarabrina L.A., Kurgan T.A., Ignat'eva N.S. Processing the steelmaking slags at 'MMK' company. *Metallurg*. 2000, no. 9, pp. 26–27. (In Russ.).
12. Bulgakov V.G., Bondarev Yu.A., Ageev E.E. Use of briquettes from metallurgical waste for partial or complete replacement of pig iron in steelmaking. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1985, no. 9, pp. 72. (In Russ.).
13. Noro Katsnhiko, Takenchi Mitsugu, Mitukami Yoshimasa. Necessity of scrap reclamation technologies and present conditions of technical development. *ISIJ Int*. 1997, vol. 37, no. 3, pp. 27–31.
14. Bernard Trentini. Scrap consumption in the oxygen converter. *Steel Times*. 1985, no. 2, pp. 608–610.
15. Goodman N. Slag splashing of BOF converters. *Iron and Steel Inst*. 1996, no. XXX, pp. 24–33.
16. Singh V.A., Lenka S.N., Ajmani S.K., Bhanu C., Pathak S. Novel Bottom Stirring Scheme to Improve BOF Performance through Mixing and Mass Transfer Modelling. *ISIJ International*. 2009, vol. 49, no. 12, pp. 1889–1894.
17. Samokhvalov S.E. *Teplofizicheskie protsessy v mnogofaznykh sredakh: teoreticheskie osnovy komp'yuternogo modelirovaniya* [Thermophysical processes in multiphase environments: theoretical foundations of computer modeling]. Kiev: izd. Instituta sistemnykh issledovaniy. Min. obr. Ukrainy, 1994, 172 p. (In Russ.).
18. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow: Nauka, 1976, 296 p. (In Russ.).
19. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Samokhvalov S.E., Ganzer L.A., Kosukhina E.S. Numerical modeling of mixing and heat transfer in a converter bath with combined blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 12, pp. 3–8. (In Russ.).
20. Protopopov E.V., Mokrinskii A.V., Chernyatevich A.G., Zhibinova I.A. Converter-bath hydrodynamics with injection in a liquid-reduction unit. *Steel in Translation*. 2006, vol. 36, no. 6, pp. 1–4.

Information about the authors:

S.N. Kuznetsov, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy (mchmsis@mail.ru)

E.V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy, Rector (protopopov@sibsiu.ru)

S.V. Feiler, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Acting Head of the Chair of Ferrous Metallurgy (feylersv@gmail.com)

M.V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Power and Ecology”, Vice-Rector for Research and Innovations (uchebn_otdel@sibsiu.ru)

Received April 13, 2017