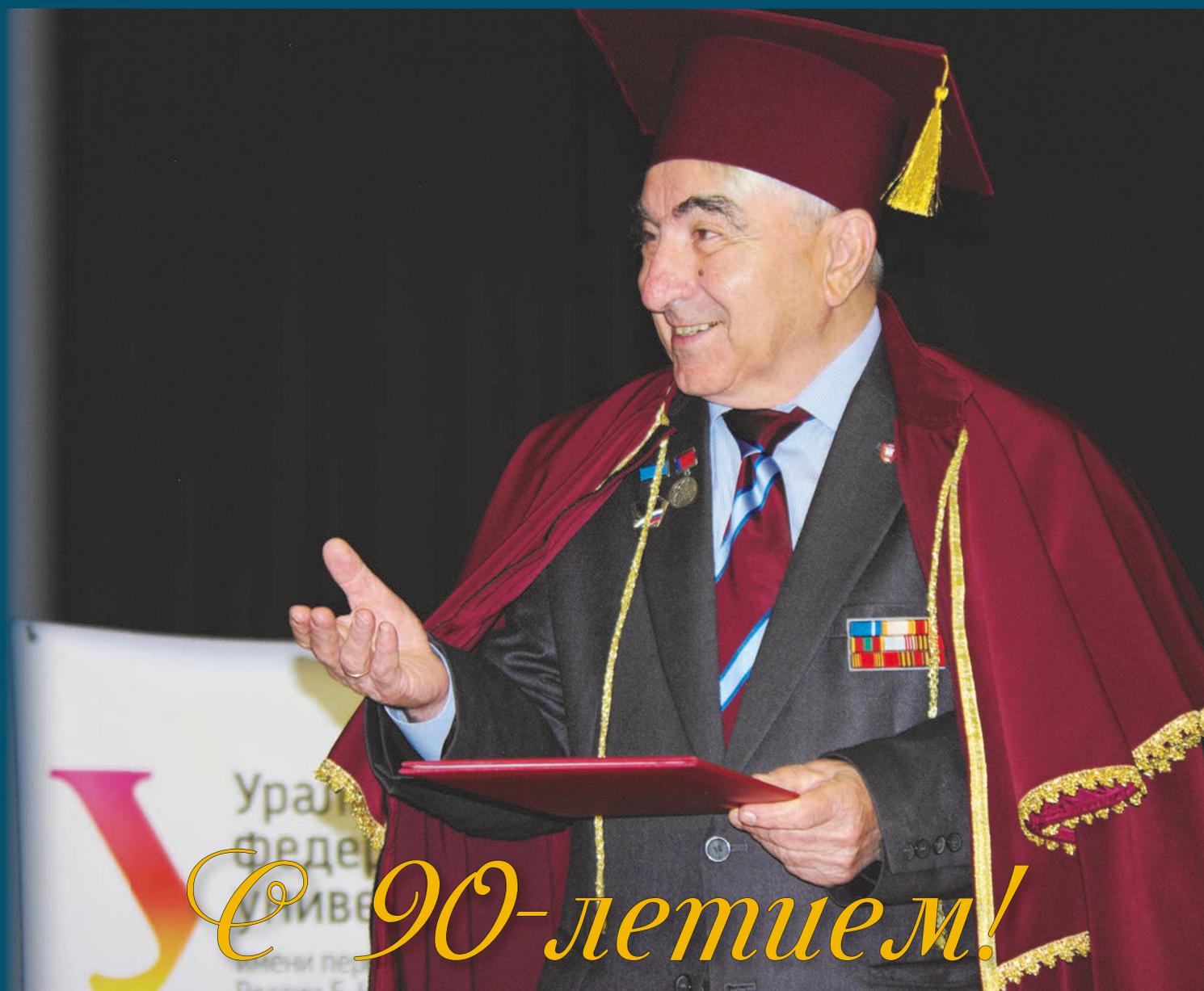


# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 60 Номер 8 2017



*90-летием!*

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

# ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

---

№ 8, 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)

ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)

ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)

ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)

КОЛЖАКОВ 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)

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)

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)

ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)

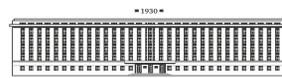
ЮРЬЕВ А.Б. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

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  
Национальным исследовательским технологическим университетом «МИСиС»

#### 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@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@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:** LEONTEV 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)

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)

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)

M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

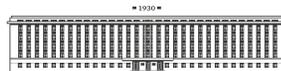
V.I. ZOLOTUKHIN (Tula State University, Tula)

---

### Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

---

This issue of the journal was prepared by  
National Research Technological University "MISIS"

### 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@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.

---

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

Ярошенко Ю.Г. Теплофизика – научная база энерго- и ресурсосберегающих металлургических технологий .....	587
Гордон Я.М., Садри А., Миронов К.В., Спириин Н.А. Обобщение опыта и развитие методов диагностики состояния футеровки доменных печей .....	603
Дмитриев А.Н. Аналитическое исследование влияния качества титаномagnetитового сырья на показатели доменной плавки .....	609
Казяев М.Д., Самойлович Ю.А., Казяев Д.М., Вохмяков А.М., Спитченко Д.И. Определение поля температур в рабочих валках холодной прокатки при скоростном нагреве в камерной печи .....	616
Лисенко В.Г., Чесноков Ю.Н., Лаптева А.В. Использование триады доменная печь, кислородный конвертер, электродуговая печь для уменьшения углеродного следа .....	623
Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Матюхина А.В., Дудко В.А., Пуненков С.Е. Использование природного газа при отоплении шахтных печей ваграночного типа для повышения энергоэффективности технологических процессов выплавки чугуна .....	629
Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю., Курунов И.Ф., Титов В.Н. Анализ путей повышения энергоэффективности выплавки чугуна в доменных печах НЛМК .....	637

### ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Дружинин Г.М., Лошкарев Н.Б., Лошкарев А.Н., Мухамадиева А.Х., Муксин Д.Ф. Теплообменный блок для регенеративной горелки .....	643
Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В., Спириин Н.А. Исследование эффективности охлаждения вала печного вентилятора, оснащенного устройствами стержневого типа .....	651

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю. Кинетика высокотемпературной дегидратации лисаковского железорудного концентрата .....	656
Торопов Е.В., Лымбина Л.Е., Ярошенко Ю.Г. Факельные процессы с позиций теории вероятности .....	662

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Дружинин Г.М., Ашихмин А.А., Лошкарев Н.Б., Маслов П.В., Хамматов И.М. Разработка и внедрение автоматизированной системы отопления печей-миксеров для цветной металлургии .....	670
Лавров В.В., Спириин Н.А., Гуриин И.А., Рыболовлев В.Ю., Краснобаев А.В. Современная методология и компьютерные технологии создания программного обеспечения модельных систем поддержки принятия решений в металлургии (на примере доменного производства) .....	679

## CONTENTS

### METALLURGICAL TECHNOLOGIES

Yu.G. Yaroshenko Thermophysics – research base of energy- and resource-saving metallurgical technologies .....	587
Ya.M. Gordon, A. Sadri, K.V. Mironov, N.A. Spirin Experience and development of methods to estimate blast furnace refractory lining conditions .....	603
A.N. Dmitriev Analytical study of quality influence of titanomagnetite raw materials on blast furnace indicators .....	609
M.D. Kazyayev, Yu.A. Samoilovich, D.M. Kazyayev, A.M. Vokhmyakov, D.I. Spitchenko Determination of the temperatures field in working rollers of cold rolling with high speed heating in the chamber furnace .....	616
V.G. Lisienko, Yu.N. Chesnokov, A.V. Lapteva The use of triad of blast furnace, oxygen converter and electric arc furnace for carbon footprint reduction .....	623
V.I. Matyukhin, Yu.G. Yaroshenko, A.V. Matyukhina, V.A. Dudko, S.E. Punenkov The use of natural gas for heating of shaft furnaces of cupola type to increase the technological processes efficiency of pig iron smelting .....	629
S.V. Filatov, S.A. Zagainov, I.F. Kurunov, V.N. Titov, L.Y. Gileva Analysis of energy efficiency increase of cast iron smelting in NLMK blast furnaces .....	637

### INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

G.M. Druzhinin, N.B. Loshkarev, A.N. Loshkarev, A.Kh. Mukhamadiev, D.F. Muksinov Heat exchange block for regenerative burner .....	643
L.A. Zainullin, M.V. Kalganov, D.V. Kalganov, N.A. Spirin Study of the cooling efficiency of furnace fan's shaft equipped with devices of rod type .....	651

### PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

V.G. Karelin, L.A. Zainullin, A.Yu. Epishin Kinetics of high-temperature dehydration of Lisakovsk iron ore concentrate .....	656
E.V. Toropov, L.E. Lymbina, Yu.G. Yaroshenko Flame processes from positions of probability theory .....	662

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

G.M. Druzhinin, A.A. Ashikhmin, N.B. Loshkarev, P.V. Maslov, I.M. Khammatov Development and implementation of automated heating system for holding furnaces in non-ferrous metallurgy ..	670
V.V. Lavrov, N.A. Spirin, I.A. Gurin, V.Yu. Rybolovlev, A.V. Krasnobayev Modern methodology and computer technologies for creating software of model systems supporting decision-making in metallurgy (on the example of blast-furnace production) .....	679

# С 90-летием!

19 сентября 2017 г. Юрию Гавриловичу Ярошенко, доктору технических наук, профессору кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина исполняется 90 лет.

Сегодня имя профессора Ю.Г. Ярошенко – ученика профессора Бориса Ивановича Китаева, хорошо известно не только в нашей стране, но и за рубежом. Его научная деятельность связана с изучением теплофизических явлений в металлургических печах и тепловых агрегатах, с развитием методов математического и физического моделирования, с экологизацией металлургических технологий. Из его учеников 47 стали кандидатами наук и 9 из них – докторами наук. Он автор более 800 печатных работ, среди них: 31 монография, 30 учебников и учебных пособий для вузов СССР и России, 42 авторских свидетельства и патента.

Результаты исследований в области металлургической теплотехники использованы Ю.Г. Ярошенко

при разработке и внедрении ресурсо- и энергосберегающих технологий в металлургии. Они обобщены им вместе с коллегами и учениками в монографиях «Теплообмен в шахтных печах», «Теплотехника доменного процесса», «Охлаждение агломерата и окатышей», «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии» и др.

Значительны его заслуги в создании учебников и учебных пособий, рекомендованных высшими органами образования для студентов вузов страны. Среди них изданные дважды «Тепломассоперенос» и «Механика жидкости и газов». Учебник «Экология», выдержавший семь изданий, удостоен премии Правительства Российской Федерации в области образования.

Имя профессора Ю.Г. Ярошенко хорошо известно не только в научных кругах России и странах, входящих в состав СНГ, но и за рубежом. Монография «Теплообмен в шахтных печах» переведена во Франции и



Англии. Более 200 научных работ вошли в зарубежные издания и труды 77 международных конгрессов и конференций в Люксембурге, Польше, Австралии, Чехословакии, Югославии, Великобритании, Болгарии, США, Канаде и др.

Высокий научный и педагогический авторитет профессора Ю.Г. Ярошенко, глубокое уважение к нему сотрудников и коллег не только родного университета определили присуждение ему звания «Почетный профессор Уральского федерального университета» и «Почетный профессор Национальной металлургической академии Украины». Его заслуги отмечены присвоением ему почетного звания «Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации». Он награжден орденами «Знак почета» (СССР, 1986 г.), «Почета» (РФ, 2007 г.), медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941 – 1945 гг.», «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина», «Ветеран труда» и другими юбилейными медалями. Московский институт

стали и сплавов наградил его орденом «За заслуги в материаловедении», а Президиум Академии инженерных наук орденом «А.М. Прохоров».

Профессор Ю.Г. Ярошенко своей плодотворной деятельностью сумел обогатить творческое наследие кафедры, а также многое сделать для того, чтобы научные достижения преподавателей и сотрудников кафедры были внедрены в учебный процесс и практику металлургических предприятий, что укрепило авторитет и научные позиции кафедры в нашей стране и за рубежом.

Дорогой Юрий Гаврилович! Мы, Ваши коллеги, ученики и друзья поздравляем Вас с юбилеем, желаем доброго здоровья, хорошего настроения, душевного спокойствия, благополучия и дальнейших творческих успехов!

Редколлегия и редакция журнала присоединяются к поздравлениям и желают крепкого здоровья, долгих лет и дальнейших успехов в реализации творческих планов в научной и педагогической деятельности!



УДК 669.1.01:536.4

## ТЕПЛОФИЗИКА – НАУЧНАЯ БАЗА ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Ярошенко Ю.Г., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (yury-y@planet-a.ru)*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

**Аннотация.** В работе представлены достижения Уральской школы ученых и инженеров металлургов-теплотехников в совершенствовании широкого спектра металлургических технологий, достигнутых на научной базе творческого союза двух наук – теплофизики и информатики. В последние годы математическое моделирование в сочетании с физическим позволило существенно сократить время и область поиска оптимальных решений и тем самым обеспечить более надежное проектирование и наладку тепловых режимов создаваемых технологий и оборудования. Модернизация агломерационных машин осуществлялась путем внедрения систем автоматического управления тепловыми и газодинамическими процессами, а также за счет оснащения машин зажигательными горнами нового типа. Эти мероприятия, наряду с интенсификацией тепло-массообменных процессов, обеспечили улучшение технико-экономических и экологических показателей работы агломерационных фабрик в России и за рубежом. Технологические и теплофизические решения при обжиге окатышей связаны с организацией переточной системы газовых потоков и реконструкцией газоходной системы. В результате реконструкции производительность машин увеличилась на 10 – 17 %, удельный расход топлива снизился на 8 – 15 %, а сброс газов после их очистки уменьшился на 50 – 58 %. Реконструкции подверглись обжиговые машины в России, Бразилии, Иране. В последние годы разработано программное обеспечение для решения комплекса задач в области доменного производства, внедряемое в промышленную эксплуатацию на крупнейшем металлургическом предприятии России – ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Новые воздухонагреватели дутья для доменных печей способны обеспечить нагрев до 1300 °С и более за счет подогрева доменного газа и воздуха, используемых для отопления воздухонагревателей при отказе от добавок природного газа. Проблема по переработке металлургических жидких шлаков решена созданием на заводах черной металлургии России, Украины, Индии и Китая установок, которые способны обеспечить высокую производительность по скорости слива шлака (от 3 до 15 т/мин) и по годовым объемам получения гранулированного шлака (от 0,66 до 2,0 млн т). Успешно работает и установка на предприятии «Норильский никель». Совершенствование тепловых режимов и оборудования нагревательных печей и установок различного назначения опирается на математическое моделирование теплофизических процессов, основу которого составляет созданный динамический зонально-узловой метод моделирования радиационного и сложного теплообмена. Этот метод успешно развивается. За последние годы разработаны новые конструкции печей, модернизированы сотни нагревательных печей. Организация тепловых режимов их работы привела к существенному снижению удельных расходов топлива, повышению качества нагрева металла, а при термообработке – качества готовой продукции.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, агломерат, окатыши, доменное производство, воздухонагреватели, жидкий шлак, нагревательные печи и установки, оснащение оборудованием.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-587-602

Авторство первой теории металлургических печей принадлежит В.Е. Грум-Гржимайло. Его гидравлическую теорию печей [1] образно можно считать «первым камнем» в металлургическую отрасль науки, которая сегодня получила название теплофизика. Для того, чтобы теплофизика завоевала сегодняшние рубежи в металлургии, потребовались десятилетия упорных теоретических, экспериментальных и промышленных исследований.

Теплофизика, как наука, изучающая металлургические технологии, объединяет четыре достаточно широкие области научных знаний: термодинамику, теорию тепломассообмена, молекулярную физику (для металлургии – теорию металлургических процессов), механику жидкости и газов, а также механику движения материалов (шихты) в печах.

Творческий союз теплофизики и информатики в последние годы обеспечил успешное совершенство-

вание металлургических технологий. Математическое моделирование позволило существенно сократить время и область поиска оптимальных решений и тем самым обеспечить более надежное проектирование и наладку тепловых режимов создаваемой технологии и оборудования. Физическое моделирование процессов металлургических технологий, с одной стороны, обеспечивает математические модели необходимыми теплофизическими характеристиками – коэффициентами теплопроводности, теплоемкости, теплопередачи и пр., а с другой – адаптацию модели к конкретным производственным условиям.

Естественно, что для разработки путей повышения энергоэффективности ресурсосбережения металлургических технологий необходимы кадры, владеющие техникой постановки физического, как лабораторного, так и промышленного эксперимента, а также методами математического моделирования и анализа получаемых

результатов. К настоящему времени сформировалась Уральская научная школа металлургов-теплотехников (теплофизиков), которая является одной из старейших в России. Ее создателем и организатором был д.т.н., профессор Б.И. Китаев. Творческое ядро этой школы составляют выпускники кафедры «Металлургические печи» и «Металлургия чугуна» УГТУ-УПИ и в последние годы (с 1998 г.) – кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» и «Металлургия железа и стали» УрФУ. В создании и развитии научной школы активное участие принимают сотрудники ОАО «НИИ металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»), Института металлургии УрО РАН, ОАО «Уральский институт металлов», «Уралмеханобр», «НПВП ТОРЭКС», ПКБ «Энергоцветмет». Благодаря их научному творчеству, достигнуты значительные результаты в области развития теории и математического моделирования теплофизических процессов, обеспечившие возможность совершенствования металлургических технологий и оборудования с позиций энерго- и ресурсосбережения не только в России, но и за рубежом.

### Развитие теории и математического моделирования теплофизических процессов

На современном этапе развития технологий одной из главных проблем является максимальное использование объема агрегатов, теплового и восстановительного потенциала газов и, в конечном счете, достижение максимальной эффективности тепловых агрегатов в металлургии. С точки зрения этой проблемы исключительно большое значение имеет разработка теории металлургических объектов, т. е. математического описания физико-механических, тепловых и химических процессов, протекающих в этих объектах, создание математических моделей агрегатов различного назначения.

Несмотря на информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации, банки сертифицированных (верифицированных) математических моделей остаются слабо заполненными. Это связано с большими интеллектуальными и временными затратами на создание адекватных математических моделей сложных процессов и систем. Для новых процессов и систем высокой сложности это создает большие трудности, так как эти процессы и системы, как правило, не могут функционировать без управления, а математическая модель часто не может быть идентифицирована и сертифицирована без реально функционирующей системы.

Развитие математического моделирования теплофизических процессов в металлургии связано:

– с широким использованием общей теории систем и системного анализа. Необходимость решения задач в самых разных сферах человеческой деятельности потребовала разработки приемов, способов, подходов,

которые, в конечном счете, позволили бы разработать единую технологию исследований применительно к объектам любой природы. Общая теория систем возникла как обобщение именно тех принципов и закономерностей, которые в значительной степени могут быть применимы к объектам разной природы. Металлургическая теплотехника, или, как ее сейчас называют, теплофизика и является составным элементом общей теории систем [2 – 4];

– с развитием и широким использованием численных методов решения задач теплопереноса. Аналитические решения уравнений, описывающих сложные явления теплопереноса в металлургических процессах, получить практически невозможно. Как правило, использование только численных методов позволяет решить эти задачи. Состояние, развитие и использование численных методов решения задач теплопереноса представлены в работах [4 – 5];

– с совершенствованием моделей путем более полного учета особенностей дутьевого, газодинамического, шлакового режимов, механики движения материалов, а также реально доступной информации о работе тепловых агрегатов металлургии значительно расширили возможности этих моделей [6 – 14];

– с появлением коммерческих пакетов программного обеспечения теплофизических расчетов. Несмотря на вполне естественные ограничения постановки граничных условий и описания реальных металлургических объектов, существенную помощь в изучении и совершенствовании технологий оказывают такие программные продукты, как ANSYS различных релизов, COMSOL Multiphysics, MatLAB, Maple, STAR – CD, Flow Vision, SolidWorks и др. Однако доступными в учебном процессе являются только пакеты Mathcad, Maple и MatLAB, остальные лицензионные продукты очень дороги для вузов. В научном и практическом плане отдельные пакеты являются несколько избыточными по возможностям, однако это скорее можно отнести к их недостаточной изученности;

– с использованием современных технологий и программных средств разработки программного обеспечения для управления теплофизическими процессами в металлургии [15 – 18]. Так, для формализации математических моделей и проектирования алгоритмического обеспечения широко используют функциональное моделирование, в основу которого положены идеи и нотации методики структурного анализа и проектирования IDEF0, а также принципы структурного системного анализа и формализации процедурно-ориентированного подхода в виде диаграмм потоков данных (Data Flow Diagram, DFD). Использование этих методов обеспечивает возможность эффективного обмена информацией по описанию и анализу модельных систем между специалистами в области теплофизики, металлургических технологий и разработчиками информационных систем. Реализация программного кода модельных систем

выполняется на основе Agile-метода – гибкой методологии разработки программного обеспечения, ориентированной на использование итеративной разработки, динамического формирования функциональных требований и обеспечение их программной реализации в результате постоянного взаимодействия с пользователями системы.

### Подготовки железорудного сырья

**Технологии производства агломерата.** ОАО «ВНИИМТ» один из немногих институтов, активно сотрудничающих с УрФУ и сохранивший свои научные возможности в области теплофизики в металлургии после развала прикладных научных организаций России. Институт, используя и развивая достижения высокотемпературной теплофизики и информатики в металлургии, обеспечивает реализацию достижений теоретической теплофизики на заводах и фабриках всего металлургического передела, начиная с теплотехнической подготовки железорудного сырья и заканчивая получением высококачественной стали и изделий из нее с самыми лучшими потребительскими свойствами. За последние годы ОАО «ВНИИМТ» разработана и реализована в промышленности теплотехническая схема агломерационной машины с установкой рециркуляции агломерационного газа и системой автоматического управления ею, устройством для подачи теплоносителя в слой спекаемой шихты [19] и автоматикой безопасности, способной обеспечить в рабочей зоне концентрацию СО не выше ПДК для этого газа. После реализации проекта на четырех машинах агломерационной фабрики № 2 ОАО «Челябинский металлургический комбинат» существенно были снижены такие показатели работы агломерационной машины, как удельный расход топлива (на 3,6 – 3,8 кг/т агломерата), содержание мелочи в выходе годного (на 2,0 – 2,5 % (абс.)) и выбросы пыли и СО в окружающую среду (на 26 – 28 %).

Не менее эффективными оказались результаты физического и математического моделирования при создании способа зажигания агломерационной шихты [20 – 22] и конструкций зажигательных горнов, оснащенных системами автоматического управления тепловыми и газодинамическими режимами. Исследованиям были подвергнуты агломерационные машины разных типоразмеров, эксплуатация которых связана с использованием различных видов газообразного топлива. Новые зажигательные горны обеспечивают:

- минимальный расход тепла сжигания топлива на зажигание шихты и повышение качества агломерата;
- увеличение срока эксплуатации бортов и роликов спекательных тележек за счет их обдува вентиляторным воздухом и отсутствия водяных холодильников горна;
- уменьшенный объем топочного пространства, низкие потери тепла в окружающую среду за счет конструктивных особенностей свода горна.

Итоги этих исследований внедрены на 13 агломерационных машинах металлургических предприятий – ПАО «Челябинский металлургический комбинат», ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат», АО «Уральская сталь» (Россия), ОАО «Запорожсталь» (Украина) совместно с ПАО «Уралмашзавод» на ОАО «ММК», на заводе Визакхапатнам, Бокаро (Индия) и Аксуском ферросплавном заводе (Казахстан). В результате эксплуатации этих горнов экономия газообразного топлива достигла 7 кг/т агломерата.

Сотрудники ООО «НПВП ТОРЭКС», опираясь на математическую модель, отражающую особенности процесса спекания железорудных материалов различных месторождений, работу зажигательного горна и устройств по охлаждению готового агломерата и газодинамические характеристики агломерационной шихты и тракта агломерационных машин, предложили три варианта тепловых схем работы агломерационных машин с совмещенным охлаждением [23]. Эти схемы учитывают необходимость разделения отходящих с агломерационной машины газов на два, три и более потоков, которые характеризуются индивидуальными свойствами по температуре, влажности, составу газа. Один из потоков можно вернуть в агломерационный процесс, другой – использовать в энергетических целях, третий – направить в аппараты для улавливания и последующего производства отдельных элементов, таких как S, Zn и др. [23].

Их реализация на агломерационных фабриках ОАО «Северсталь», ОАО «Мечел» (Россия) и АО «ИСПАТ-Кармет» (Казахстан) подтвердили высокую эффективность этих схем. За рубежом решение подобных задач достигается в несколько иной, менее эффективной форме [24].

Значительными возможностями для анализа агломерационного процесса и разработки мероприятий с целью ресурсосбережения и улучшения энергоэффективности технологии получения агломерата обладает модель, названная трехмерной математической (динамической) моделью процесса агломерации [25 – 27]. В этой модели учтены все основные теплофизические явления, отражающие особенности практически всех этапов технологии производства агломерата. Расчеты процесса агломерации с использованием этой модели, как отмечают авторы, «по точности и объему его описания превосходят все локальные балансовые методики и известные комплексные модели» [27]. Теплофизический анализ работы агломерационных машин на основе результатов математического моделирования позволил получить технические решения для проектирования, реконструкции агломерационных фабрик в России и за рубежом (Украине, Казахстане, Индии, Югославии, Египте, Венгрии, Иране, Алжире). Примером может служить совершенствование технологии спекания и реконструкция агломерационной машины № 7 на агломерационной фабрике № 2 металлургического завода

«Арселор Миттал Темиртау». В результате внедрения технических решений производительность машины увеличилась на 30 %.

Положительный эффект при совершенствовании технологии производства агломерата может быть достигнут в результате наложения акустического поля на слой спекаемой шихты. Оценку влияния энергии акустического поля произвели сотрудники кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» в процессе исследований на крупненной лабораторной установке типа «Аглочаша» и в промышленных условиях на агломерационной машине агломерационной фабрики ОАО «Серовский металлургический завод» [28]. Акустические излучатели, представляющие собой волноводы трубчатой конструкции (свистки Гартмана), устанавливали в первых двух вакуум-камерах. При этом давление компрессорного воздуха составляло 3,0 атм., а общий расход компрессорного воздуха на один излучатель не превышал 50 м<sup>3</sup>/ч. При исследовании влияния энергии акустического поля на слой шихты все технологические операции, как и состав шихты, соответствовали традиционной технологии.

Образующееся акустическое поле вовлекает в колебательный процесс колосниковую решетку, пронизывает нижние горизонты обрабатываемой агломерационной шихты (сырой и высушиваемый слои), достигает зоны горения и расплавления. Частицы слоя и пыли также вовлекаются в колебательный процесс, в результате этого в поровых каналах на поверхностях твердых компонентов слоя уменьшается толщина пограничного слоя и усиливаются массообменные процессы. При этом происходит разрыхление слоя мелкодисперсных частиц, благодаря чему появляются условия по увеличению расхода газа для тепловой обработки слоя шихты, что дополнительно активизирует развитие и тепловых, и массообменных процессов в слое шихты с одновременным уменьшением выноса пыли за счет ее осаждения в самом слое шихты и за его пределами – в вакуум-камерах.

Промышленные испытания при установке в вакуум-камерах акустических излучателей суммарной мощностью звука 1,0 – 1,2 кВт/м<sup>2</sup>, перекрывающих акустическим полем не более 15 – 20 % площади спекания агломерационной машины, а также в объеме сборного коллектора со стороны его торца при мощности звука 0,3 – 0,4 Вт/м<sup>3</sup>, показали рост производительности в пределах 3,2 – 8,3 %, снижение запыленности агломерационных газов на 29,2 – 36,2 % и концентрации монооксида углерода в них на 26,7 – 33,4 %.

Подобные результаты по энергоэффективности и выбросам в окружающую природную среду могут быть получены и в технологиях обжига окатышей.

Улучшение показателей процесса агломерации железорудного сырья может быть достигнуто, если будут обеспечены одинаковые температурно-временные условия спекания по высоте слоя агломерируемой шихты.

С целью создания теплового режима, способного удовлетворить этим условиям, на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» были разработаны способ и конструкция устройства для совместного сжигания твердого и газообразного (комбинированного) топлива в слое агломерируемой шихты, а также проведены испытания этого способа в промышленных условиях [29].

Специальное устройство для подачи в надслоевое пространство природного газа и воздуха для его горения – газо-воздушно-распределительное устройство (ГВРУ), устанавливается за зажигательным горном. К этому времени в спекаемом слое уже сформировалась устойчивая зона горения твердого топлива. После смешения газовых сред в надслоевом пространстве между ГВРУ и поверхностью слоя шихты образовавшаяся газо-воздушная смесь, проходя через горячий слой агломерата верхнего горизонта слоя шихты, подогревается до температуры воспламенения (450 – 600 °С) с образованием активной зоны горения протяженностью 40 – 60 мм с температурами 1100 – 1150 °С. Выделяемая при этом теплота обеспечивает дополнительный подогрев верхних горизонтов слоя до требуемой температуры спекания шихтовых материалов.

Промышленные испытания разработанной конструкции ГВРУ проведены на агломерационной машине Серовского металлургического завода. В ходе исследований было установлено, что при использовании комбинированного топлива в слое происходит выравнивание температурно-временных условий нагрева в объеме слоя шихты как по его высоте, так и ширине. При увеличении доли природного газа на ГВРУ до 40 % от его общего расхода повышается производительность агломерационной машины на 30 – 35 % и сокращается выход мелких фракций в барабанной пробе.

**Технологии производства окатышей.** Качеству железорудных окатышей, как перспективному виду металлургического сырья для доменных печей и для альтернативных технологий получения железа, в последние годы уделяется повышенное внимание. В этом направлении работают и другие научные и проектные организации как в нашей стране [30 – 31], так и за рубежом [32].

С целью устранения неравномерности термообработки окатышей по высоте слоя на обжиговых машинах конвейерного типа и улучшения качества окатышей на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» были разработаны устройства для сжигания газа в слое и тепловые схемы обжиговых конвейерных машин, а также проведены испытания этого способа в промышленных условиях. Поскольку при технологии сжигания газа в слое появляется еще один источник тепловой энергии, дополняющий основной, расположенный в зоне обжига, то такой технологический способ обжига получил название комбинированного [33].

Технология такого способа обжига окатышей организуется в следующей последовательности: сушку

и подогрев слоя окатышей осуществляют также, как описано выше, а обжиг окатышей верхних горизонтов при температуре 1200 – 1300 °С на глубину 75 – 100 мм ведут просасываемыми продуктами факельного сжигания газа в горновом пространстве. После этого в слой подают холодную газо-воздушную смесь (коэффициент расхода воздуха  $\alpha = 3,0 - 5,0$ ), которая, проходя через нагретый материал, подогревается до температуры воспламенения. При этом начинается устойчивый процесс горения газа в слое. Продукты горения газо-воздушной смеси проходят через нижележащие слои окатышей и нагревают их. По мере нагрева окатышей до температуры, при которой происходит воспламенение газо-воздушной смеси, процесс горения распространяется ниже, что обеспечивает равномерный нагрев окатышей до заданной технологической температуры по всей высоте слоя.

Реализация комбинированного способа обжига окатышей на двух обжиговых конвейерных машинах Качканарского ГОКа показала надежность использованного газо-горелочного устройства, обеспечившего устойчивое и безопасное сжигание газа в слое окатышей. Новая технология термообработки шихты по сравнению с технологией обжига окатышей без сжигания газа в слое, наряду с устранением неравномерности термообработки окатышей по высоте слоя на обжиговых машинах конвейерного типа и улучшением качества окатышей, обеспечила увеличение производительности агрегатов на 10 – 12 %, снижение расхода природного газа на 10 – 15 %, электроэнергии на 6 – 8 % [33].

Разработанные специалистами ООО «НПВП ТОРЭКС» и реализованные в новой тепловой схеме МОК-1-592 Михайловского ГОКа основные технологические и теплофизические решения [34, 35] связаны с организацией трехсекционной зоны сушки [36, 37], переточной системы газовых потоков и реконструкцией газовой системы. Решения затронули реконструкцию оборудования новой обжиговой машины МОК-1-592, которая введена на Михайловском ГОКе. В результате реконструкции производительность машины увеличилась на 10 – 17 %, удельный расход топлива снизился на 8 – 15 %, а общий сброс газов в атмосферу после их очистки уменьшился на 50 – 58 %. Реконструкция также проведена на обжиговых машинах № 1, 2 Михайловского ГОКа [37, 38]. Опыт и технико-экономические показатели работы обжиговой машины четвертого поколения послужили примером для реконструкции всех обжиговых машин металлургических предприятий России. Более того, к подобной реконструкции проявили интерес и за рубежом – Бразилии и Иране, где в настоящее время активно ведутся реконструктивные монтажные работы под руководством специалистов ООО «НПВП ТОРЭКС».

Глубокие научные исследования по обжигу окатышей проведены и в ОАО «ВНИИМТ». Сотрудниками этого института научно обоснован, разработан и внед-

рен комплекс новых технических решений на обжиговой конвейерной машине АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение», позволивший увеличить ее производительность на 24,6 %, уменьшить расход природного газа более, чем в 2 раза, электроэнергии на привод тягодутьевых установок на 21,3 %, а также снизить техногенное давление на окружающую среду благодаря установке газоочисток на газопотоках, сокращению расходов топлива и электроэнергии, что позволило приблизить показатели ее работы к уровню лучших современных обжиговых машин [39, 40].

### Доменное производство

Кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий УрФУ [41 – 51] тесно связана с доменным цехом ОАО «ММК». В последние годы разработано программное обеспечение для решения комплекса задач в области доменного производства, внедряемое в промышленную эксплуатацию на крупнейшем металлургическом предприятии России – ОАО «ММК». Результаты этой работы включают:

- интегрированный пакет прикладных программ автоматизированного рабочего места инженерно-технического персонала доменной печи;
- интегрированный пакет для инженерно-технического персонала доменного цеха;
- программное обеспечение для моделирования технологических процессов и аналитической оценки отчетных показателей работы доменного цеха;
- комплекс программ распознавания образов для прогноза теплового состояния технологических процессов в металлургии (на примере доменной плавки);
- пакет программ для оптимального распределения природного газа и технологического кислорода в группе печей;
- пакет программ выбора поставок сырья и оптимального состава шихт в аглодоменном производстве;
- программное обеспечение для управления объектами в металлургии во время их пуска (на примере пуска доменной печи);
- программное обеспечение для моделирования теплового, газодинамического режима доменной плавки при использовании пылеугольного топлива.

Внедрение современной информационно-моделирующей системы позволило повысить эффективность принятия решений инженерно-техническим персоналом цеха в условиях нестабильности состава и качества проплавляемого железорудного сырья, топливно-энергетических ресурсов и изменений в конъюнктуре рынка. Программное обеспечение при использовании пылеугольного топлива предназначено для моделирования теплового, газодинамического режима доменной плавки и решения комплекса технологических задач.

Кафедрой «Металлургия железа и сплавов» Института новых материалов и технологий УрФУ на основе современных представлений о закономерностях тепло- и массообмена (с учетом термодинамики и кинетики поведения оксидов примесных элементов) разработана математическая модель теплового состояния нижней зоны доменной печи, позволяющая рассчитывать распределение температурных полей газа, кокса, шлака и чугуна по высоте печи. С использованием этой модели выполнен комплексный анализ восстановления примесей из оксидов в чугун. Это позволило реализовать выплавку чугуна из ванадийсодержащих титаномагнетитов с содержанием кремния в чугуне менее 0,1 %, а также провести комплекс мероприятий, обеспечивающих подавление процессов образования карбидов титана и оптимизировать шлаковый режим [52 – 55]. Реализация этих мероприятий позволила снизить удельный расход кокса более, чем на 10 кг/т чугуна и достигнуть удельной производительности более 3,0 т/м<sup>3</sup>.

В Институте металлургии УрО РАН разработана методика [56] оценки влияния металлургических характеристик железорудного сырья (восстановимость, прочность, температура размягчения и плавления) на технико-экономические показатели доменной плавки, в основе которой лежат математические модели доменного процесса [57, 58]. Эта методика использована для совершенствования технологии переработки железорудной базы черной металлургии, а также для ее расширения. Этим институтом совместно с Институтом горного дела УрО РАН предложена схема отдельной добычи низкотитанистых и высокотитанистых руд Гусевогорского месторождения [59]. Имет УрО РАН совместно с АО «ЕВРАЗ КГОК» и ОАО «ЕВРАЗ НТМК» выполнены работы по повышению качества агломерата и снижению расхода кокса в доменной плавке [60], а совместно с ОАО «Уралмеханобр» предложена технология переработки титаномагнетитовых руд Тебинбулакского месторождения (Республика Узбекистан) по схеме «доменная печь – конвертер» [61]. Успешно на пяти доменных печах Китая работает разработанная в институте система мониторинга состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи [62], которую планируется внедрить и на одной из доменных печей ОАО «ММК».

### Доменные воздухонагреватели

Устойчивая тепловая работа доменных печей, которая определяет их производительность и удельный расход кокса, зависит от многих факторов. Одним из главных среди них является использование высоконагретого дутья. В последние годы широкое распространение для нагрева доменного дутья получили воздухонагреватели бесшахтного типа Калугина (ВНК). Сегодня на металлургических заводах мира работает

194 ВНК, обеспечивая доменные печи горячим воздушным дутьем, температурный уровень которого достигает 1000 – 1150 °С, а на некоторых заводах России и Китая температуру воздушного дутья удалось увеличить до 1200 – 1250 °С [63].

Исследователи доменного процесса указывают на целесообразность нагрева дутья до 1300 °С и более. Реализация такого предложения способна обеспечить достижение этой цели, что приведет к значительному экономическому эффекту. Об этом свидетельствует теплофизический анализ, выполненный ЗАО «Калугин», который показал реальную возможность достижения указанных температур, если под куполом воздухонагревателя Калугина (ВНК) поддерживать температуру на уровне 1430 °С за счет подогрева доменного газа и воздуха, используемых для отопления воздухонагревателей при отказе от добавок природного газа к доменному газу. Технологически это достигается с помощью компактных теплообменников – термосифонов, устанавливаемых в боровых перед дымовой трубой. Подобные тепло-утилизационные аппараты требуют на установку и эксплуатацию меньше финансовых средств, чем затраты на добычу топлива, его переработку и доставку к металлургическим предприятиям с последующим использованием в виде топливных добавок к доменному газу – основному виду топлива при нагреве насадки воздухонагревателя [64].

Для подтверждения энергоэффективности подобных решений проведено исследование рабочего цикла «нагрев насадки – нагрев доменного дутья» для условий работы доменной печи объемом 2700 м<sup>3</sup>, выплавляющей обычный чугун. Производительность доменной печи обеспечивается подачей дутья, расход которого составляет 5400 м<sup>3</sup>/мин. Для базового периода температура дутья принята 1250 °С, доменный газ и воздух для нагрева ВНК не подогреваются, а расход природного газа для обогащения доменного газа составил более 5600 м<sup>3</sup>/ч. Для перспективного периода может быть организован подогрев до 200 °С доменного газа и воздуха для отопления ВНК продуктами горения с температурой 300 °С без добавок природного газа. В этих условиях температура купола ВНК составит 1430 °С, а нагрев доменного дутья – 1310 °С. Следует подчеркнуть, что для перспективного периода достигается экономия топлива на нагрев 1000 м<sup>3</sup> дутья, величина которой несколько превышает 2,0 %. В условном топливе годовая экономия составляет 4210,7 т.

Компанией ЗАО «Калугин» накоплен большой опыт по проектированию, изготовлению, монтажу и вводу в эксплуатацию теплообменных аппаратов на термосифонах. Этот опыт обеспечивает в настоящее время успешную работу систем утилизации тепла на термосифонах, установленных на 48 доменных печах России и Китая [65].

## Переработка жидких шлаков и расплавов

В этом направлении развития теплофизики ОАО «ВНИИМТ» является одним из первых как в России, так и за рубежом.

Коллективу ОАО «ВНИИМТ» удалось решить на мировом уровне сложную теплофизическую проблему по переработке жидких шлаков черной и цветной металлургии, используя для этого достижения теплофизики и ее главных разделов – теплообмена и гидродинамики. Главными на этом пути были задачи распыления шлака и организация движения охлажденной шлаковой пульпы. При изучении теплообменных процессов дробления и охлаждения струи жидкого расплава водой были установлены удельные расходы воды и предельные размеры частиц шлака. Даже значительное количество чугуна, которое может быть увлечено из печи шлаком, не создает взрывоопасной обстановки: чугун под воздействием струй воды также подвергается дроблению на мелкие капли, причем каждая из них располагает значительным запасом тепла, которое не способно вызвать парообразование взрывного характера. Изучение гидродинамических явлений, связанных с движением шлаковой пульпы, привело к разработке эрлифтной транспортной системы. Исследования в итоге явились причиной создания в комплексе оборудования доменной плавки установки припечной грануляции жидкого шлака [66]. Эта установка обеспечивает:

- более благоприятные санитарные и гигиенические условия труда;
- относительно простое управление, возможность полной автоматизации работы установки;
- полную переработку всего шлака доменной плавки в продукт высокого качества для цементной промышленности;
- локализацию вредных парогазовых выбросов и их организованное удаление;
- нейтрализацию сернистых соединений, содержащихся в парогазовых выбросах;
- взрывобезопасное получение высококачественных гранул;
- дробление и охлаждение шлакового расплава оборотной (слабо осветленной) водой;
- эвакуацию загущенной шлаководяной пульпы надежным, абразивостойким, эрлифтным способом;
- обезвоживание шлаководяной пульпы в непрерывно действующем агрегате карусельного типа;
- подсушку гранулированного шлака за счет его физического тепла.

Анализ работы этих установок на металлургических заводах России, Украины, Индии, Китая подтвердил их высокую производительность по скорости слива шлака (от 3 до 15 т/мин) и по годовым объемам переработки шлаков (от 0,66 до 2,0 млн т) [67]. Длительной эксплуатацией установок была подтверждена их полная взрывобезопасность. Накопленный опыт грануляции

жидких шлаков в черной металлургии с успехом использован при проектировании, строительстве и эксплуатации подобной установки в цветной металлургии на ПАО ГМКЗФ «Норильский никель» [68]. В настоящее время этот коллектив является основным разработчиком подобных установок для доменных печей объемом 2000 – 6000 м<sup>3</sup> [67].

Жидкий шлак обладает высокопотенциальным физическим теплом, утилизация которого является актуальной научно-технической проблемой. В настоящее время в ОАО «ВНИИМТ» разработана и опробована технология и установка для сухой грануляции шлакового расплава, основанная на кристаллизации жидкого шлака твердым теплоносителем. Эта технология готова к внедрению на металлургических предприятиях.

## Газо-печное хозяйство

Особое внимание на кафедрах университета и ОАО «ВНИИМТ» уделяется математическому моделированию теплофизических процессов в рабочем пространстве нагревательных печей и установок различного назначения. Так, созданный динамический зонально-узловой метод моделирования радиационного и сложного высокотемпературного теплообмена продолжает успешно развиваться [69]. Осуществленное совместное УрФУ и ОАО «ВНИИМТ» математическое моделирование процессов нагрева труб и трубных заготовок в секционных печах Северского трубного и Первоуральского новотрубного заводов подготовило научную основу реконструкции этих печей. На реконструированных печах достигнуто снижение удельных расходов топлива на 15 – 20 %, увеличена производительность печей на 20 – 30 % и снижена эмиссия оксидов азота. Метод был испытан в Институте технологий газа (США) с положительным результатом [70] и в настоящее время получил во всем мире широкое распространение с аббревиатурой DFI-method (Direct Flame Impingement Heating method).

Этот перечень внедренческих работ может быть продолжен:

- на термических печах Первоуральского новотрубного завода внедрены прогрессивные режимы термообработки труб, непосредственное измерение температуры металла и управление газодинамикой рабочего пространства печей, а на кольцевых печах Северского трубного завода для увеличения срока их службы установлены ребристые подины [70];
- разработан и внедрен модельный метод экспертной системы доменной печи [71];
- получили дальнейшее развитие методы энергоэкологического анализа процессов с определением технологических топливных чисел (ТТЧ), вредных и парниковых выбросов, с использованием этих методов выполнен анализ целого ряда металлургических процессов [72];

– проанализированы коксовые и бескоковые металлургические технологии и разработаны рекомендации по развитию технологий с наименьшими энерго-экологическими выбросами. В частности, проработан в деталях ЛП-процесс (процесс прямого легирования стали ванадием), элементы которого нашли применение как в России, так и за рубежом при сокращении потерь ванадия в 3 – 4 раза [73, 74].

Исторически сложилось, что сотрудники кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», развивая исследования по нагреву и охлаждению металла, традиционно уделяют внимание совершенствованию конструкций и тепловых режимов нагревательных печей. Эта работа проводится совместно с проектными и исследовательскими организациями, что обеспечивает проектирование, и строительство тепловых агрегатов по новейшим технологиям. Уделяется также серьезное внимание решению задач по улучшению энергоэффективности тепловых режимов за счет внедрения новейших газовых горелок скоростного типа с глубокой утилизацией тепла отходящих из печи продуктов горения, благодаря чему достигается экономия до 50 % природного газа по сравнению с аналогичными показателями работы печей устаревших конструкций [75].

Активная научная деятельность сотрудников кафедры с научно-производственной компанией «УралТермоКомплекс» может быть проиллюстрирована следующими результатами:

– на Кировском заводе по обработке цветных металлов построены по новым технологиям и запущены в эксплуатацию две толкательные и одна с шагающим подом методические печи для нагрева слябов (2 – 5 т) из медных сплавов. Для футеровки печи использованы волокнистые блоки. Печи оснащены современными скоростными горелками и комплексной системой автоматического управления тепловым режимом [76];

– на заводе металлоконструкций (г. Кашира, Московская область) спроектирована и построена уникальная камерная термическая печь с применением современных волокнистых футеровок и скоростных рекуперативных горелок. Уникальность этой печи заключается в том, что она создана с изменяющейся геометрией рабочего пространства в зависимости от объема нагреваемой садки, что обеспечивается устройством выкатного пода, который может перемещаться на расстояние до 60 м [77];

– на Уралмашзаводе (г. Екатеринбург) построена и введена в эксплуатацию вертикальная термическая печь для обработки длинномерных крупногабаритных изделий машиностроения переменного поперечного сечения (роторы турбин, валки прокатных станков). Эта печь футерована современными блочными керамоволокнистыми материалами. На печи установлены скоростные рекуперативные горелки. Контроль и управление тепловыми режимами термической обработки металлоизделий полностью обеспечивается комплекс-

ной автоматизированной системой. В тепловом режиме работы печи реализована новая более совершенная технология охлаждения изделий после их нагрева в печи до технологически заданных температур. Охлаждение металла обеспечивается с помощью воздуха, поступающего от вентилятора в печь через рекуперативные горелки. Такой цикл системы охлаждения связан с непрерывным снижением температуры металла и соответственно воздуха. В результате такого «мягкого» охлаждения исключается возможность образования в изделиях термических напряжений, способных вызвать появление трещин [78, 79].

Широкого внедрения комплексных систем автоматического управления тепловыми режимами печей удалось достичь за счет разработки математических моделей для каждой технологии нагрева металлоизделия и в случае необходимости – его охлаждения, в результате чего организация технологических процессов нагрева металла осуществляется без участия человека. Реализованные на всех агрегатах новые тепловые режимы привели к значительному снижению удельных расходов газа (до 50 %) и сокращению выбросов парниковых газов, среди которых наибольшую опасность представляют загрязнители атмосферы – CO, NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и др.

Не менее успешной является деятельность творческих коллективов ОАО «ВНИИМТ» и УрФУ, связанная с разработкой комплекса мероприятий по модернизации металлургических печей различного назначения. Основными из них являются: выбор регенеративной или рекуперативной системы отопления с соответствующими горелочными устройствами, определение оптимального числа зон теплового регулирования, применение для футеровки керамоволокнистых материалов, оптимизация размеров рабочего пространства (в основном, высота свода), контроль состава продуктов горения по зонам и в боровых, автоматизация систем управления на базе программируемых контроллеров, моделирование и расчетный анализ для разработки и внедрения рациональных температурно-тепловых режимов работы печей [80]. При термообработке металлов достаточно часто применяются электрические печи. Использование электрической энергии имеет свои преимущества, но вместе с тем и более высокие показатели по расходам энергии. Себестоимость электронагрева в 1,5 – 2 раза, а капитальные затраты в 7 – 8 раз выше, чем при газовом нагреве. Институт накопил опыт перевода печей с электрического обогрева на газовый.

ОАО «ВНИИМТ» значительное внимание уделяет изучению теплофизических процессов горения газообразных видов топлива. Достижения в этом направлении используются для разработки и сертификации различных видов газо-горелочных устройств как по видам газообразного топлива, так и по области их применения. Созданная в институте рекуперативная горелка превосходит по основным показателям работы

(температуре подогрева воздуха и расходу воздуха на отсос дымовых газов) известные зарубежные аналоги [81]. Рекуперативные горелки применяются при температуре греющих газов печи не более 1000 – 1050 °С. Сотрудники этого института разработали и освоили производство малогабаритных регенеративных горелочных устройств, используемых в печах различного назначения. Первая отечественная камерная печь, на которой были установлены эти горелки, была сооружена на заводе в Верхней Салде (ВСМПО) в 2000 г. [82]. Процесс управления работой горелок полностью автоматизирован. Экономия топлива (природного газа) при этом составила 55 %. Всего выполнены и реализованы более 10 проектов реконструкции для печей различного назначения.

Роль достижений теплофизики в создании новых технологий и устройств в области термической обработки изделий из металлов и сплавов трудно переоценить. Особенно это связано с необходимостью подвергать термической обработке изделия разной термической массивности, формы, добиваясь при этом получение высоких механических свойств. Традиционные способы объемной закалки изделий в водяных, масляных, селитровых и щелочных баках не способны обеспечить для них требуемые заказчиком показатели прочности, структуры и т. п. Новые технологии ОАО «ВНИИМТ» регулируемого высокоскоростного водо-воздушного охлаждения опираются на закономерности изменения температурного поля на поверхности изделия (конвективный теплообмен) и внутри его (теплообмен теплопроводностью). Таким образом, контролируются температурные напряжения в изделии. Управление скоростями охлаждения различных элементов изделия в широком диапазоне температур осуществляется изменением плотности водо-воздушного орошения, которую можно менять в цикле термообработки, не допуская развития нежелательных явлений (по механическим свойствам, структуре и пр.). Активная работа по разработке и внедрению технологий водо-воздушного охлаждения проводится металлургами-теплотехниками ООО «ВНИИМТ» в сотрудничестве с работниками заводов и кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ [83]. Водо-воздушные технологии с успехом внедрены при термообработке различных видов проката – железнодорожных колес, рельсовых накладок и подкладок, листа из различных сплавов, труб, подшипниковых колец из стали ШХ-15, изделий машиностроения. Технология упрочнения листового стали на стане 5000 «Северсталь» не имеет аналогов в мировой практике. Термообработка по такой технологии рельсовых подкладок позволяет увеличить прочностные характеристики в 3 раза, твердость – в 1,2 – 2,5 раза, длительность эксплуатации на железнодорожных путях – в 2 – 5 раз [84]. Столь значительные успехи обусловлены тем, что возможности теплофизики водо-воздушного охлаждения использованы на

все 100 % [83 – 86]. Оно обеспечивает значительное снижение себестоимости термообработки за счет отказа от масла, селитры и моечных агрегатов. Являясь перспективной технологией, она активно и плодотворно будет развиваться и в дальнейшем.

ОАО «ВНИИМТ» и кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ активно сотрудничают в развитии теплофизики металлургических технологий и в других областях металлургии, что проявляется либо в разработке новых технологий, либо в существенном совершенствовании традиционных:

- в технологиях сушки измельченных сырьевых материалов достигнуты значительные успехи. Например, технология сушки сыпучих материалов с использованием твердого теплоносителя позволяет сократить время сушки от 10 до 20 раз, что обеспечивает компактность оборудования также до 10 раз [87];

- новая технология металлизации железорудного концентрата и руды в измельченном состоянии с использованием электрической дуги обладает преимуществами перед известными технологиями благодаря компактности, исключению переделов окомкования и обжига окатышей, а также разделению металла и шлака [88];

- новые технологии сушки футеровки чугуновозных, сталеразливочных и других типов ковшей и стелды для их реализации разработаны на основе теплофизического анализа процессов нагрева и охлаждения футеровки. Благодаря научному подходу к решению проблемы стойкости футеровки достигнуто двух- трехкратное увеличение срока службы ковшей при 5 – 10-кратном снижении расхода топлива [89];

- усовершенствованы установки металлизации окатышей по технологии «Мидрекс» на Оскольском электрометаллургическом комбинате. В результате модернизации увеличена их производительность от 15 до 50 % и снижен расход природного газа на 5 – 7 % [90];

- технология и установка для переработки замасленной окалины реализованы на Синарском трубном заводе. Получаемый продукт по своей себестоимости в 2 – 2,5 меньше себестоимости рудного концентрата без учета положительного экологического эффекта [91].

**Выводы.** Область теплофизики, охватывающая технологии черной и цветной металлургии, активно развивается в направлениях:

- математического моделирования характерных для металлургии тепловых и массообменных процессов с учетом особенностей движения газа и материалов;

- физического моделирования процессов металлургических технологий для определения необходимых параметров, используемых при математическом моделировании как при разработке математических моделей, так и при их адаптации в ходе исследований промышленных технологий;

- изучения развития процессов различных металлургических технологий, что необходимо для более глубокого их понимания;

– анализа металлургических технологий с позиций энергоэффективности, ресурсосбережения и снижения техногенного давления на окружающую природную среду;

– разработки мероприятий по совершенствованию металлургических технологий и оборудования, обеспечивающих улучшение технико-экономических и экологических показателей после их внедрения в производство;

– создания научной базы для разработки систем управления технологическими процессами.

Научные и промышленные исследования последних лет, основу которых составляют достижения теплофизики, обеспечили значительное улучшение показателей работы металлургических технологий по качеству получаемых продуктов, производительности агрегатов, удельному расходу топлива, выбросам парниковых газов, а также вовлечению в современные технологии вторичных ресурсов различного происхождения. Об этом свидетельствуют успехи исследователей Уральской школы металлургов теплотехников (теплофизиков), представленные материалами как данной работы, так и других, опубликованных в этом номере журнала. В заключение важно отметить, что результаты развития теплофизики в области металлургии обогащают знаниями и студентов – будущих работников отрасли.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грум-Гржимайло В.Е. Пламенные печи. В 3-х томах. – М.: Издание теплотехнического института имени профессоров В.И. Гриневецкого и К.В. Кирша, 1925. – 104 с.
2. Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г., Шаврин В.С. Математические методы теплофизики: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение-1, 1-е изд., 2001. – 232 с., 2-е изд., 2005. – 231 с.
3. Спиринов Н.А., Швыдкий В.С., Лобанов В.И., Лавров В.В. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 205 с.
4. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / В.С. Швыдкий, Н.А. Спиринов, М.Г. Ладыгичев и др. – М.: «Интермет-Инжиниринг», 1999. – 520 с.
5. Швыдкий В.С., Дзюзер В.Я. Методы численного решения инженерных задач. – Екатеринбург, 2010. – 396 с.
6. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спиринов, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов и др.; Под ред. Н.А. Спиринова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 617 с.
7. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др.; Под ред. Н.А. Спиринова. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.
8. Frolov Y.A., Polotsky L.I. Mathematical three-dimensional and dynamic model of sintering process and its use in theoretical and practical purposes // VI International Congress on the Science ICSTI. 14 – 18 October. 2012. Rio de Janeiro. P. 1447 – 1459.
9. Yaroshenko Yu.G., Shvydkiy V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V. Steady heat transfer in melt-irrigated blast-furnace zone // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 2. P. 88 – 92.
10. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А. и др. К математическому моделированию шахтных печей с плавлением материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 6. С. 424 – 430.
11. Shvydkiy V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V. Mathematical model of layered metallurgical furnaces and units // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 012013.
12. Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Lavrov V.V. Gazification of coal dust particles in the blast furnace tuyere apparatus // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 012021.
13. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А. и др. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 9. С. 634 – 638.
14. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А. и др. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 1. С. 19 – 23.
15. Рыболовлев В.Ю., Краснобаев А.В., Спиринов Н.А., Лавров В.В. Проблемы создания современных информационно-моделирующих систем технологических процессов в металлургии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 10. С. 61 – 65.
16. Rybolovlev V.Yu., Krasnobayev A.V., Spirin N.A., Lavrov V.V. Principles of the development and introduction of an automated process control system for blast-furnace smelting at the Magnitogorsk Metallurgical Combine // Metallurgist. 2015. Vol. 59. No. 7 – 8. P. 653 – 658.
17. Спиринов Н.А., Швыдкий В.С., Лавров В.В. Современные принципы построения и реализации информационно-моделирующих систем в металлургии (на примере доменного производства): достижения и проблемы // Сб. тр. Междунар. науч.-практич. конф. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей». – М.: Изд. Дом МИСиС, 2016. С. 166 – 168.
18. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др.; Под ред. Н.А. Спиринова. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
19. Пат. 2432538 РФ. Устройство для подачи теплоносителя в слой спекаемой шихты на агломерационной машине / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, В.А. Чистополов и др.; опубл. 27.10.2011. Бюл. № 30.
20. Пат. 2275435 РФ. Способ зажигания агломерационной шихты, перемещающейся на спекательных тележках / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, В.А. Чистополов и др.; опубл. 27.04.2006. Бюл. № 12.
21. Винтовкин А.А., Чистополов В.А., Чистополов А.В., Денгуб В.В. Разработка и внедрение нового зажигательного горна для агломерационных машин // Сталь. 2015. № 3. С. 6 – 8.
22. Герасимов Л.К., Дружинин Г.М., Хамматов И.М. и др. Опыт разработки и освоения зажигательных горнов агломерационных машин // Сталь. 2010. № 3. С. 12 – 14.
23. Клейн В.И., Майзель Г.М., Ярошенко Ю.Г., Авдеев А.А. Теплотехнические методы анализа агломерационного процесса / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2004. – 224 с.
24. Akiyama Y., Oyama N., Ivami Y. etc. Development of gas fuel injection technology in iron ore sintering process (reduction of CO2 emissions with gas fuel injection technology in the sintering machines) // VI International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil. P. 1043 – 1055.
25. Фролов Ю.А., Полоцкий Л.И. Трехмерная математическая (динамическая) модель агломерационного процесса. Часть I // Металлург. 2014. № 12. С. 42 – 47.
26. Фролов Ю.А., Полоцкий Л.И. Трехмерная математическая (динамическая) модель агломерационного процесса. Часть II // Металлург. 2015. № 1. С. 27 – 31.
27. Фролов Ю.А. Агломерация. Технология. Теплотехника. Управление. Экология. – М.: Металлургиздат, 2016. – 672 с.

28. Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Матюхин О.В. Снижение пылевых потерь при агломерации железных руд с использованием энергии акустического поля // *Металлург*. 2016. № 4. С. 26 – 30.
29. Лобанов В.И., Гольцев В.А. Теплотехнические и технологические аспекты использования слоевого способа сжигания природного газа в металлургических агрегатах // *Тр. Междунар. науч.-технич. конф. «С творческим наследием Б.И. Китаева в XXI век»*. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1998. С. 122 – 125.
30. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин и др.; Под ред. акад. Л.И. Леонтьева. – Екатеринбург, УрО РАН, 2012. – 340 с.
31. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине (математическое моделирование) // Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, С.Н. Евстюгин и др.; Под ред. Б.А. Боковикова. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – 200 с.
32. Morales B., Contini A., Trindade L. etc. // *VI International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil*. P. 61 – 68.
33. Лобанов В.И., Гольцев В.А. Возможности использования комбинированного способа сжигания природного газа при обжиге железорудных окатышей на обжиговой машине ОК-228 // *Вестник ГОУ ВПО УГТУ УПИ № 13. Металлургия и образование на Урале. Тр. I науч.-практич. конф.* – Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2005. С. 139 – 152.
34. Боковиков Б.А., Брагин В.В., Солодухин А.А., Ярошенко Ю.Г. Повышение энергоэффективности обжиговых конвейерных машин путем минимизации сбросов на дымовую трубу // *Сталь*. 2016. № 8. С. 81 – 84.
35. Абзалов В.М., Брагин В.В., Вяткин А.А. и др. Разработка обжиговой конвейерной машины нового поколения // *Сталь*. 2008. № 12. С. 13 – 14.
36. Пат. 2350664 РФ. Способ трехстадийной сушки окатышей на обжиговой конвейерной машине / В.М. Абзалов, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн и др. Опубл. 27.03.2009. Бюл. № 9.
37. Абзалов В.М., Брагин В.В., Бруев В.П., Неволин В.Н. Модернизация обжиговых машин ОК-520 ОАО «Михайловский ГОК» // *Сталь*. 2005. № 2. С. 3 – 4.
38. Абзалов В.М., Борисенко Б.И., Брагин В.В., Евстюгин С.Н. и др. Эффективность модернизации фабрики окомкования ОАО «Михайловский ГОК» // *Сталь*. 2006. № 6. С. 9 – 10.
39. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах // *Сталь*. 2011. № 5. С. 4.
40. Буткарев А.А., Ащеулов В.Н., Жомирук П.А. и др. Оптимизация работы тракта эксгаустера обжиговой машины ОК-108 АО «ССГПО» для увеличения производства окатышей // *Сталь*. 2015. № 3. С. 12 – 15.
41. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, В.Л. Терентьев и др.; Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 301 с.
42. Спиринов Н.А., Лавров В.В., Паршаков С.И. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 307 с.
43. Lavrov V.V., Spirin N.A. Automated information system for analysis and prediction of production situations in blast furnace plant // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 012010.
44. Spirin N.A., Gileva L.Y., Lavrov V.V. Information modeling system for blast furnace control // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 012011.
45. Spirin N.A., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Lavrov V.V. Mathematical model and software for control of commissioning blast furnace // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 012012.
46. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Y. etc. Use of contemporary information technology for analyzing the blast furnace process // *Metallurgist*. 2016. Vol. 1. P. 1 – 7.
47. Spirin N.A., Lavrov V.V., Istomin A.S. etc. Software for the raw-materials management system in blast-furnace smelting // *Metallurgist*. 2015. Vol. 59. No. 1 – 2. P. 104 – 112.
48. Щипанов К.А., Спиринов Н.А., Бурыкин А.А. и др. Технологические особенности и программное обеспечение расчета задувочной шихты доменной печи // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 2. С. 134 – 139.
49. Щипанов К.А., Спиринов Н.А. Расчет задувочной шихты доменной печи. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012612255 от 20.02.2012.
50. Онорин О.П., Спиринов Н.А., Лавров В.В. и др. Оценка формы зоны вязкопластичных масс железорудных материалов в доменной печи методом математического моделирования // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 6. С. 24 – 29.
51. Лавров В.В., Спиринов Н.А., Бурыкин А.А. Разработка моделирующей системы расчета теплообменных процессов и оценки параметров зоны вязко-пластичного состояния железорудных материалов в доменной печи // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 4. С. 34 – 38.
52. Кушнарев А.В., Филатов С.В., Киричков А.А. и др. Внедрение технологии выплавки низкремнистых чугунов на НТМК // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2011. № 3. С. 42.
53. Zagainov S.A., Filatov S.V., Sobianina O.N., Gordon Yu.M. Technological solutions' for intensive production of low silicon hot metal in blast furnace processing vanadium containing titania-magnetite // *Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and XIII International Symposium on iron Ore, 14 – 18 October, 2012. Rio de Janeiro, RJ, Brazil*. P. 1406 – 1415.
54. Собянина О.Н., Филатов С.В., Загайнов С.А. Анализ особенностей восстановления титана в доменной печи // *Сталь*. 2012. № 3. С. 9 – 11.
55. Собянина О.Н., Филатов С.В., Загайнов С.А. Анализ условий движения расплава в горне доменной печи при плавке титаномагнетитов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2008. № 4. С. 69 – 71.
56. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical Basis of Investigation of Influence of the Iron Ore Materials and Coke Metallurgical Characteristics on the Blast Furnace Smelting Efficiency // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 602 – 604. P. 365 – 375.
57. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.
58. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 163 с.
59. Дмитриев А.Н. Современное состояние, перспективы развития и освоения базы титаносодержащих руд Урала // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2015. № 12. С. 36 – 40.
60. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Petukhov R.V. etc. The characteristic of ores and concentrates of the open society “EVRAZ KGOK” // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 834 – 836. P. 364 – 369.
61. Dmitriev A.N., Sheshukov O.Yu., Gazaleeva G.I. etc. Development of metallurgical processing technology the titanomagnetite concentrate of the Tebinbulak deposit // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 670 – 671. P. 283 – 289.
62. Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А., Чэнь К. и др. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи // *Сталь*. 2013. № 11. С. 8.
63. Kalugin, Ya. P. High-temperature shaftless hot stoves for blast furnaces // *Proc. of VI International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (VI ICSTI), Associaçao Brasileira de Metalurgia Materiais e Mineracao (ABM): Rio de Janeiro, 2012*. P. 2774 – 2783.
64. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.

65. Prokofiev B.N., Kalugina M.Ya., Murzin Ya.A. etc. Development of hot blast stove design without conventional combustion chamber // Proc. of METEC and the 2nd European Steel Technology and Application Days, METEC & 2nd ESTAD: Dusseldorf, 2015. P. 24; pdf 18.06.2015 12:00.
66. Пат. 101445 РФ. Установка для переработки шлакового расплава / Л.А. Зайнуллин, А.Б. Бычков, Г.И. Чеченин, В.Г. Грезнев. Опубл. 20.01.2011. Бюл. № 2.
67. Зайнуллин Л.А., Сухобаевский Ю.Я., Давыдов А.А. Использование установки припечной грануляции шлаков в цветной металлургии // Сталь. 2000. № 3. С. 18 – 20.
68. Зайнуллин Л.А., Дружинин Г.М. 85 лет научно-исследовательскому институту металлургической теплотехники (ВНИИМТ) // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2015. № 4. С. 3 – 8.
69. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Интегрированный энерго-экологический анализ. Т.1. – М.: Теплотехник, 2010. – 688 с.
70. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 2. Кн. 2. Ч. 1. Анализ режимных параметров и конструкций в энерготехнологиях. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 560 с.
71. Сучков А.В., Лисиенко В.Г., Сучков В.А. Совершенствование управления многомерным технологическим объектом на примере доменной печи. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 126 с.
72. Lisienko V.G., Lapteva A.V. Energy-ecological analysis and assessment of developed metallurgical technologies // IV European Congress “Economics and Management of Energy in Industry” Portugal. Porto, Report 4. 2007. P. 7.
73. Лисиенко В.Г., Соловьева Н.В., Трофимова О.Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности / Под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.
74. Лисиенко В.Г., Шлеймович Е.М., Ладыгичев М.Г. и др. Температура: теория, практика, эксперимент. Справ. изд. в 3-х томах. Т. 1. Кн. 1. Методы контроля температуры / Под. ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2010. – 549 с.
75. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. и др. Комплексная модернизация нагревательных печей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 12. С. 56 – 59.
76. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Казяев Д.М. и др. Модернизация проходной печи для нагрева медных слябов под пластическую деформацию // Цветные металлы. 2011. № 4. С. 85 – 89.
77. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. Камерная печь с разделяющимся рабочим пространством // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 9. С. 30 – 33.
78. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В., Спитченко Д.И. Методика и результаты исследования сложного внешнего теплообмена в вертикальной камерной печи для термообработки длинномерных изделий // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 9. С. 667 – 671.
79. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В. и др. Влияние конструкции футеровки и типа топливосжигающих устройств на тепловую работу камерных вертикальных печей // Тр. VII Международн. науч.-практич. конф. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», посвященной 150-летию великого русского металлурга В.Е. Грум-Гржимайло (15 – 17 октября 2014 г.). – М.: НИТУ МИСиС, 2014. С. 224 – 235.
80. Дружинин Г.М., Баргаш М.Р., Леонтьев В.А., Мартынов А.П. Основы методологии модернизации конструкций и режимов работы нагревательных и термических печей // Сб. докл. НТК «Металлургическая теплотехника как основа энерго- и ресурсосбережения в металлургии». – Екатеринбург: ОАО «ВНИИ-МТ», 2010. С. 44 – 49.
81. Баргаш М.Р., Дружинин Г.М., Лошкарев Н.Б., Попов А.Б. Новая скоростная рекуперативная газовая горелка для прямого нагрева металла в промышленных печах // Сталь. 2010. № 3. С. 125 – 127.
82. Дистергефт И.М., Дружинин Г.М., Щербинин В.И. и др. Регенеративные системы отопления для нагревательных печей прокатного и кузнечного производства (история развития, теория и практика) // Металлургическая теплотехника: Сб. научн. тр. Национальной металлургической академии Украины. Т. 5. – Днепропетровск: НМетАУ, 2002. С. 44 – 57.
83. Ярошенко Ю.Г., Липунов Ю.И., Захарченко М.В. и др. Разработка нового способа термического упрочнения для решения экологических задач металлургического производства // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 4. С. 221 – 225.
84. Липунов Ю.И., Эйсмодт К.Ю., Некрасова Е.В. и др. Струйное водяное охлаждение при термоупрочнении проката несимметричного профиля // Сталь. 2015. № 3. С. 83 – 86.
85. Липунов Ю.И., Эйсмодт К.Ю., Ярошенко Ю.Г. и др. Термоупрочнение рельсовой накладки струйным водяным охлаждением // Сталь. 2014. № 8. С. 3 – 8.
86. Жилияков А.Ю., Липунов Ю.И., Эйсмодт К.Ю., Ярошенко Ю.Г. Влияние технологии термоупрочнения на структуру рельсовой накладки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 9. С. 682 – 687.
87. Зайнуллин Л.А., Карелин В.Г., Артов Д.А. и др. Сушка угля твердым теплоносителем // Металлург. № 9. 2016. С. 23 – 25.
88. Зайнуллин Л.А., Епишина А.Ю., Артов Д.А. и др. Высокотемпературное углетермическое восстановление сидеритовых руд в электрической дуге // Металлург. 2016. № 11. С. 31 – 34.
89. Рязанов В.Т., Хохлов В.А., Шульгин С.С., Оганесян Ю.М. Опыт модернизации стенов сушики футеровки чугуновозных ковшей // Сталь. 2015. № 3. С. 39 – 41.
90. Мехряков Д.В., Грезнев В.Г., Малей И.В. и др. Опыт проведения модернизации установок металлизации по технологии «Мидрекс» на Оскольском электрометаллургическом комбинате // Сталь. 2015. № 3. С. 25 – 27.
91. Подковыркин Е.Г., Коршунова Н.Г., Баков А.В. и др. Роторно-вихревые установки для тепловой обработки шихтовых материалов металлургического передела // Сталь. 2015. № 3. С. 98 – 99.

Поступила 12 апреля 2017 г.

## THERMOPHYSICS – RESEARCH BASE OF ENERGY- AND RESOURCE-SAVING METALLURGICAL TECHNOLOGIES

*Yu. G. Yaroshenko*

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The article presents the achievements of the Ural scientific school of scientists and metallurgists-heating engineers in improving a wide spectrum of metallurgical technologies determined on a scientific basis

of the creative union of two sciences – physics and computer science. In recent years, mathematical modeling in combination with physical significantly reduce the time and scope of the search for optimal solutions and thereby provide more reliable design and commissioning of thermal regimes of established technologies and equipment. Modernization of sintering machines was carried out by introduction of automatic control systems of thermal and gas-dynamic processes and by equipping them by the ignition furnaces of new type. These

activities with the intensification of heat-mass transfer processes have improved the feasibility and environmental performance of the sinter plants in Russia and abroad. Technological and thermo-physical solutions during the pellets firing are associated with organization of the transfer system of gas flows and reconstruction of gas duct system. As a result of reconstruction, the productivity of machines increased by 10–17 %, the specific fuel consumption decreased by 8–15 % and the discharge of gases after their treatment decreased by 50–58 %. Such reconstruction was made for firing machines in Russia, Brazil, Iran. In recent years, the software has been developed for the solution of complex problems in blast furnace production. It was introduced into commercial operation at the largest metallurgical enterprise in Russia – JSC “MMK”. New Cowper blast heaters for blast furnaces are able to provide heating up to 1300 °C or more by the heating of blast furnace gas and air used for heating of Cowper blast heaters at failure from supplements of natural gas. The problem of processing of metallurgical liquid slag is solved by the creation at factories of ferrous metallurgy of Russia, Ukraine, India and China of units, which are capable to provide high productivity rate of slag discharge from 3 to 15 t/min and by annual volumes of granular slag production – from 0.66 to 2.0 million tons. The installation of the company “Norilsk Nickel” also works successfully. The improvement of thermal modes and equipment of heating furnaces and installations for various purposes is based on mathematical modeling of thermophysical processes, the basis of which is the created dynamic zonal-node method of modeling radiative and complex heat transfer. This method is successfully developing. In recent years, new designs of furnaces are developed, hundreds of furnaces were upgraded. The organization of thermal modes of their operation has led to a significant reduction in specific fuel consumption, improving the quality of metal heating and during heat treatment – the quality of the finished product.

**Keywords:** mathematical modeling, agglomerate, pellets, blast furnaces, air heaters, liquid slag, heating furnaces and installations, equipping.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-587-602

## REFERENCES

1. Grum-Grzhimailo V.E. *Plamennye pechi: v 3 t.* [Combustion furnace: in 3 vols.]. Moscow: Izdanie teplotekhnicheskogo instituta imeni professorov V.I. Grinevetskogo i K.V. Kirsha, 1925, 104 p. (In Russ.).
2. Shvydkii V.S., Ladygichev M.G., Shavrin V.S. *Matematicheskie metody teplofiziki. Uchebnoe posobie* [Mathematical methods of thermophysics: Manual]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 231 p. (In Russ.).
3. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Lobanov V.I., Lavrov V.V. *Vvedenie v sistemy analiz teplofizicheskikh protsessov metallurgii* [Introduction to systematic analysis of thermophysical processes in metallurgy]. Ekaterinburg: UGTU, 1999, 205 p. (In Russ.).
4. Shvydkii V.S., Spirin N.A., Ladygichev M.G., Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M. *Elementy teorii sistem i chislennyye metody modelirovaniya protsessov teplomassoperenosa* [Elements of systems theory and numerical modeling methods of processes of heat and mass transfer]. Moscow: Intermet-Inzhiniring, 1999, 520 p. (In Russ.).
5. Shvydkii V.S., Dzyuzer V.Ya. *Metody chislennogo resheniya inzhenernykh zadach* [Methods of numerical solution of engineering problems]. Ekaterinburg, 2010, 396 p. (In Russ.).
6. Spirin N.A., Ipatov Yu.V., Lobanov V.I., Krasnobaev V.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shvydkii V.S., Zagainov S.A., Onorin O.P. *Informatsionnye sistemy v metallurgii* [Information systems in metallurgy]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2001, 617 p. (In Russ.).
7. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in APCS]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: OOO UIPTs, 2014, 558 p. (In Russ.).
8. Frolov Y.A., Polotsky L.I. Mathematical three-dimensional and dynamic model of sintering process and its use in theoretical and practical purposes. *The 6th International Congress on the Science ICSTI. October 14th to 18th. 2012. Rio de Janeiro*, pp. 1447–1459.
9. Yaroshenko Yu.G., Shvydkii V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V. Steady heat transfer in melt-irrigated blast-furnace zone. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 2, pp. 88–92.
10. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. The mathematical design of mine stoves with materials melting. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 6, pp. 424–430. (In Russ.).
11. Shvydkii V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V. Mathematical model of layered metallurgical furnaces and units. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012013.
12. Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Lavrov V.V. Gazification of coal dust particles in the blast furnace tuyere apparatus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012021.
13. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 634–638. (In Russ.).
14. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 1, pp. 19–23. (In Russ.).
15. Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Spirin N.A., Lavrov V.V. Problems of development of modern information-modeling systems of technological processes in metallurgy. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 10, pp. 61–65. (In Russ.).
16. Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Spirin N.A., Lavrov V.V. Principles of the development and introduction of an automated process control system for blast-furnace smelting at the Magnitogorsk Metallurgical Combine. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 7–8, pp. 653–658.
17. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Lavrov V.V. Modern principles of construction and realization of information-modeling systems in metallurgy (on the example of blast furnace production): achievements and problems. In: *Energoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. 100 let otechestvennogo proektirovaniya metallurgicheskikh pechei. Sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Energy-efficient and resource-saving technologies in the industry. 100 years of domestic design of metallurgical furnaces: Coll. of papers of Int. Sci.-Pract. Conf.]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2016, pp. 166–168. (In Russ.).
18. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P., Kosachenko I.E. *Model'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenii v ASU TP domЕННОй plavki* [Model system of decision support in APCS of blast furnace]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).
19. Gerasimov L.K., Druzhinin G.M., Chistoplov V.A. etc. *Ustroystvo dlya podachi teplonositel'ya v sloi spekaemoy shikhty na aglomeratsionnoy mashine* [Device for heat carrier supply into the layer of sintered charge at sintering machine]. Patent RF no. 2432538. *Byulleten' izobretenii*. 2011, no. 30. (In Russ.).
20. Gerasimov L.K., Druzhinin G.M., Chistoplov V.A. etc. *Sposob zachiganiya aglomeratsionnoy shikhty, peremeshchayushcheysya na spekatel'nykh telezhkakh* [Method of ignition of the sinter charge, moving on pallet cars]. Patent RF no. 2275435. *Byulleten' izobretenii*. 2006, no. 12. (In Russ.).
21. Vintovkin A.A., Chistoplov V.A., Chistoplov A.V., Den'gub V.V. Development and introduction of new ignition furnace for sintering machines. *Stal'*. 2015, no. 3, pp. 6–8. (In Russ.).
22. Gerasimov L.K., Druzhinin G.M., Khammatov I.M., Spirin N.A., Chistoplov V.A. Ignition hearths in sintering machines. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 247–251.

23. Klein V.I., Maizel' G.M., Yaroshenko Yu.G., Avdeenko A.A. *Teplotekhnicheskie metody analiza aglomeratsionnogo protsessa* [Thermal methods of analysis of the agglomeration process]. Yaroshenko Yu.G. ed. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2004, 224 p. (In Russ.).
24. Akiyama Y., Oyama N., Ivami Y., etc. Development of gas fuel injection technology in iron ore sintering process (reduction of CO<sub>2</sub> emissions with gas fuel injection technology in the sintering machines). *The 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil*, pp. 1043–1055.
25. Frolov Yu.A., Polotskii L.I. Three-dimensional mathematical (dynamic) model of the sintering process. Part I. *Metallurgist*. 2015, vol. 58, no. 11-12, pp. 1071–1079.
26. Frolov Yu.A., Polotskii L.I. Three-dimensional mathematical (dynamic) model of the sintering process. Part II. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 1, pp. 9–15.
27. Frolov Yu.A. *Agglomeratsiya. Tekhnologiya. Teplotekhnika. Upravlenie. Ekologiya* [Agglomeration. Technology. Engineering. Management. Ecology]. Moscow: Metallurgizdat, 2016, 672 p. (In Russ.).
28. Matyukhin V.I., Yaroshenko Yu.G., Matyukhin O.V. Reducing Dust Emission During the Sintering of Iron Ores by Using the Energy of an Acoustic Field. *Metallurgist*. 2016, 19 July, pp. 1–6 (Article in press).
29. Lobanov V.I. Gol'tsev V.A. Thermotechnical and technological aspects of the use of layered method of natural gas combustion in metallurgical aggregates. In: *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "S tvorcheskim naslediem B.I. Kitaeva v XXI vek"* [Proceedings of Int. Sci.-Tech. Conf. "Creative heritage, B.I. Kitaev in the 21st century"]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 1998, pp. 122–125. (In Russ.).
30. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Klein V.I., Leont'ev L.I., Yur'ev B.P. *Fiziko-khimicheskie i teplotekhnicheskie osnovy proizvodstva zhelezorudnykh okatyshei* [Physico-chemical and technological bases of iron ore pellets production]. Leont'ev L.I. ed. Ekaterinburg: UrO RAN, 2012, 340 p. (In Russ.).
31. Bokovikov B.A., Bragin V.V., Evstyugin S.N., Malkin V.M., Naidich M.I., Solodukhin A.A. *Teplofizicheskie zakonomernosti termoobrabotki zhelezorudnykh okatyshei na konveiernoi mashine (matematicheskoe modelirovanie)* [Thermo-physical regularities of heat treatment of iron ore pellets on a conveyor machine (mathematical modeling)]. Bokovikov B.A. ed. Ekaterinburg: OOO UIPTs, 2013, 200 p. (In Russ.).
32. Morales B., Contini A., Trindade L., etc. *The 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil*, pp. 61–68.
33. Lobanov V.I. Gol'tsev V.A. Possibilities of using combined method of natural gas combustion during firing of iron ore pellets in OK-228 firing machine. In: *Vestnik UGTU UPI no.13. Metallurgiya i obrazovanie na Urale. Trudy I nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Vestnik GOU VPO UGTU UPI no. 13. Metallurgy and education in the Urals. Papers of the 1st Sci.–Pract. Conf.]. Ekaterinburg: UGTU-UPI. 2005, pp. 139–152. (In Russ.).
34. Bokovikov B.A., Bragin V.V., Solodukhin A.A., Yaroshenko Yu.G. Increasing energy efficiency of the roasting conveyor machines by minimizing discharges to chimney. *Stal'*. 2016, no. 8, pp. 81–84. (In Russ.).
35. Abzalov V.M., Bragin V.V., Vyatkin A.A., Evstyugin S.N., Lelko S.N. Development of a new-generation conveyer roasting machine. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 12, pp. 999–1000.
36. Abzalov V.M., Evstyugin S.N., Klein V.I. etc. *Sposob trekhstadiinnoi sushki okatyshei na obzhigovoi konveiernoi mashine* [Method of three-stage drying of pellets on firing conveyor machine]. Patent RF no. 2350664. *Byulleten' izobretenii*. 2009, no. 9. (In Russ.).
37. Abzalov V.M., Bragin V.V., Bruev V.P., Nevolin V.N. Modernizing the OK-520 roasting machines at mikhailovskii gok joint stock company. *Steel in Translation*. 2005, vol. 35, no. 2, pp. 1–2.
38. Abzalov V.M., Borisenko B.I., Bragin V.V., Evstyugin S.N., Kopot' N.N., Kretov S.I., Nevolin V.N. Modernizing the OAO Mikhailovskii GOK pelletization plant. *Steel in Translation*. 2006, vol. 36, no. 6, pp. 34–35.
39. Butkarev A.A. Improving the control of pellet heat treatment in conveyer roasting machines. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 5, pp. 395–399.
40. Butkarev A.A., Ashcheulov V.N., Zhomiruk P.A., Lazebnaya Yu.P., Butkarev A.P. Boosting the hot-blast temperature in blast furnaces by means of an optimal control system. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 199–206.
41. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L., Gileva L.Yu., Rybolovlev V.Yu., Kosachenko I.E., Lavrov V.V., Terent'ev A.V. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo protsessa* [Computer methods of blast furnace process modeling]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
42. Spirin N.A., Lavrov V.V., Parshakov S.I. *Optimizatsiya i identifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v metallurgii* [Optimization and identification of technological metallurgical processes]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2006, 307 p. (In Russ.).
43. Lavrov V.V., Spirin N.A. Automated information system for analysis and prediction of production situations in blast furnace plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012010.
44. Spirin N.A., Gileva L.Y., Lavrov V.V. Information modeling system for blast furnace control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012011.
45. Spirin N.A., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Lavrov V.V. Mathematical model and software for control of commissioning blast furnace. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012012.
46. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Y., Krasnobaev A.V., Pavlov A.V. Use of contemporary information technology for analyzing the blast furnace process. *Metallurgist*. 2016, vol. 1, pp. 1–7.
47. Spirin N.A., Lavrov V.V., Istomin A.S., Burykin A.A., Shchipanov K.A., Kosachenko I.E., Onorin O.P. Software for the raw-materials management system in blast-furnace smelting. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 1-2, pp. 104–112.
48. Shchipanov K.A., Spirin N.A., Burykin A.A., Kosachenko I.E., Onorin O.P. Technological features and software calculations of blowing-in blast furnace charge. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 2, pp. 134–139. (In Russ.).
49. Shchipanov K.A., Spirin N.A. *Raschet zaduvочноi shikhty domennoi pechi* [Calculation of blast furnace charge for blowing]. Certificate of state registration of computer program no. 2012612255 dated 20.02.2012. (In Russ.).
50. Onorin O.P., Spirin N.A., Lavrov V.V., Kosachenko I.E., Rybolovlev V.Yu. Assessment of forms of the zone of viscous-plastic masses of iron-ore materials in blast furnace by the method of mathematical modeling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 6, pp. 24–29. (In Russ.).
51. Lavrov V.V., Spirin N.A., Burykin A.A., Onorin O.P., Kosachenko I.E., Krasnobaev A.V., Rybolovlev V.Yu. The development of the modeling system of the calculation of heat exchange processes and estimation of parameters of the zone of viscoplastic state of iron metal materials in blast furnace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 4, pp. 34–38. (In Russ.).
52. Kushnarev A.V., Filatov S.V., Kirichkov A.A., Filippov V.V., Gil'manov M.R., Mikhalev V.A., Zagainov S.A., Tleugabulov B.S., Sobyantina O.N. Introduction of the smelting technology of low-silicon iron at NTMK. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2011, no. 3, p. 42. (In Russ.).
53. Zagainov S.A., Filatov S.V., Sobyantina O.N., Gordon Yu.M. Technological solutions' for intensive production of low silicon hot metal in blast furnace processing vanadium containing titania-magnetite. *Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on iron Ore, October 14th to 18th, 2012. Rio de Janeiro, RJ, Brazil*, pp. 1406–1415.

54. Sobyana O.N., Filatov S.V., Zagainov S.A. Analysis of titanium reduction in a blast furnace. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 3, pp. 246–248.
55. Sobyana O.N., Filatov S.V., Zagainov S.A. Analysis of the conditions of melt motion in hearth of blast furnace at smelting of titanomagnetites. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 4, pp. 69–71. (In Russ.).
56. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical basis of investigation of influence of the iron ore materials and coke metallurgical characteristics on the blast furnace smelting efficiency. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 602-604, pp. 365–375.
57. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balansovaya logiko-statisticheskaya model' domennogo protsessa* [Balance logic-statistical model of blast furnace process]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2003, 164 p. (In Russ.).
58. Dmitriev A.N. *Matematicheskoe modelirovanie domennogo protsessa* [Mathematical modeling of blast furnace process]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2011, 163 p. (In Russ.).
59. Dmitriev A.N. Current state, prospects and development of titanium ores base of the Urals. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2015, no. 12, pp. 36–40. (In Russ.).
60. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Petukhov R.V., Kornilkov S.V., Pelevin A.E., Fishman A.Y., Sapozhnikova T.V., Shunyaev K.Y. The characteristic of ores and concentrates of the open society "EVRAZ KGOK". *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 834-836, pp. 364–369.
61. Dmitriev A.N., Sheshukov O.Yu., Gazaleeva G.I., Chesnokov Y.A., Bratygin E.V., Nekrasov I.V., Vitkina G.Yu. Development of metallurgical processing technology the titanomagnetite concentrate of the Tebinbulak deposit. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 670-671, pp. 283–289.
62. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Chen' K., Ivanov O.Yu., Zolotykh M.O. Monitoring the wear of the refractory lining in the blast-furnace hearth. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 11, pp. 732–739.
63. Kalugin, Ya. P. High-temperature shaftless hot stoves for blast furnaces. *Proc. of the 6th International Congress on the Science and technology of Ironmaking (6th ICSTI), Associacao Brasileira de Metalurgia Materias e Mineracao (ABM): Rio de Janeiro, 2012*, pp. 2774–2783.
64. Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M., Khodorovskaya I.Yu. *Energo-effektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii chernoi metallurgii* [Energy-efficient and resource-saving technologies of ferrous metallurgy]. Yaroshenko Yu.G. ed. Ekaterinburg: OOO UIPT, 2012, 670 p. (In Russ.).
65. Prokofiev B.N., Kalugina M.Ya., Murzin Ya.A., Ivlev S.A., Subbotin A.A. Development of hot blast stove design without conventional combustion chamber. *Proc. of METEC and the 2nd European Steel Technology and Application Days, METEC & 2nd ESTAD: Dusseldorf, 2015*, p. 24 pdf 18.06.2015 12:00.
66. Zainullin L.A., A.B. Bychkov A.B., Chechenin G.I., Greznev V.G. *Ustanovka dlya pererabotki shlakovogo rasplava* [Installation for processing of molten slag]. Patent RF no. 101445. *Byulleten' izobretenii*. 2011, no. 2. (In Russ.).
67. Zainullin L.A., Druzhinin G.M. 85 years of Scientific-Research Institute of Metallurgical Heat Engineering (VNIIMT). *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2015, no. 4, pp. 3–8. (In Russ.).
68. Zainullin L.A., Sukhobaevskii Yu.Ya., Davydov A.A. The use of installation for granulation of slag in nonferrous metallurgy. *Stal'*. 2000, no. 3, pp. 18–20. (In Russ.).
69. Lisienko V.G. *Sovershenstvovanie i povyshenie effektivnosti energeticheskikh i proizvodstv. (integrirrovanniy energo-ekologicheskii analiz). T. 1* [Improving and increasing the efficiency of energy technologies and industries: (integrated energy and environmental analysis). Vol. 1]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 688 p. (In Russ.).
70. Lisienko V.G. *Sovershenstvovanie i povyshenie effektivnosti energeticheskikh i proizvodstv. (integrirrovanniy energo-ekologicheskii analiz). T. 2. Kn. 2. Ch. 1: Analiz rezhimnykh parametrov i konstruktiv v energeticheskikh* [Improving and increasing the efficiency of energy technologies and industries: (integrated energy and environmental analysis). Vol. 2, Book 2, Part.1: Analysis of performance parameters and structures in energy technologies]. Ekaterinburg: UrFU, 2014, 560 p. (In Russ.).
71. Suchkov A.V., Lisienko V.G., Suchkov V.A. *Sovershenstvovanie upravleniya mnogomernym tekhnologicheskim ob'ektom na primere domennoi pechi* [Improved management of multidimensional technological object on the example of blast furnace]. Ekaterinburg: UrFU, 2012, 126 p. (In Russ.).
72. Lisienko V.G., Lapteva A.V. Energy-ecological analysis and assessment of developed metallurgical technologies. *4th European Congress "Economics and Management of Energy in Industry" Portugal. Porto, Report 4, 2007*, p. 7.
73. Lisienko V.G., Solov'eva N.V., Trofimova O.G. *Al'ternativnaya metallurgiya: problema legirovaniya, model'nye otsenki effektivnosti* [Alternative metals: problem of alloying, model evaluation of the effectiveness]. Lisienko V.G. ed. Moscow: Teplotekhnika, 2007, 440 p. (In Russ.).
74. Lisienko V.G., Shleimovich E.M., Ladygichev M.G. etc. *Temperatura: teoriya, praktika, eksperiment. Sprav. izd. v 3-kh tomakh. T.1, Kn. 1. Metody kontrolya temperatury* [Temperature: theory, practice, experiment: Ref. ed. in 3 vols. Vol. 1, Book.1. Temperature control methods]. Lisienko V.G. ed. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 549 p. (In Russ.).
75. Vokhmyakov A.M., Kazyaev M.D., Kazyaev D.M. Arseev B.N., Ryaposov A.I. Complex modernization of the heating furnaces. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 12, pp. 56-59. (In Russ.).
76. Kazyaev M.D., Vokhmyakov A.M., Kazyaev D.M., Ryaposov A.I., Spitchenko D.I. Modernization of tunnel furnace for heating of copper slabs under plastic deformation. *Tsvetnye metally*. 2011, no. 4, pp. 85–89. (In Russ.).
77. Vokhmyakov A.M., Kazyaev M.D., Kazyaev D.M. Chamber furnace with divided working space. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 9, pp. 30–33. (In Russ.).
78. Kazyaev M.D., Vokhmyakov A.M., Kiselev E.V., Spitchenko D.I. Complicated external heat exchange in the vertical chamber furnace designed for heat treatment of long products. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 9, pp. 667–671. (In Russ.).
79. Kazyaev M.D., Vokhmyakov A.M., Kiselev E.V., Spitchenko D.I., Kazyaev D.M. Effect of the structure of lining and type of fuel-burn devices on thermal performance of vertical chamber furnace. In: *Trudy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Energoberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Ekologiya", posvyashchennoi 150-letiyu velikogo russkogo metallurga V.E. Grum-Grzhimailo (15-17 oktyabrya 2014 g.)* [Proceedings of the VII International scientific-practical conference "energy Saving technologies in the industry. Furnace unit. Ecology", dedicated to the 150th anniversary of the great Russian Metallurgist V. E. Grum-Grzhimailo (15-17 October 2014)]. Moscow: MISiS, 2014, pp. 224–235. (In Russ.).
80. Druzhinin G.M., Bartash M.R., Leont'ev V.A., Martynov A.P. Methodological principles of modernization of constructions and modes of heating and thermal furnaces. In: *Sb. dokladov NTK "Metallurgicheskaya teplotekhnika kak osnova energo- i resursosberezheniya v metallurgii"* [Collection of reports NTK "Metallurgical heat engineering as the basis of energy- and resource-saving in metallurgy"]. Ekaterinburg: OAO "VNIIMT", 2010, pp. 44–49. (In Russ.).
81. Bartash M.R., Druzhinin G.M., Loshkarev N.B., Popov A.B. New high-speed regenerative gas burner for direct heating of metal in industrial furnaces. *Stal'*. 2010, no. 3, pp. 125–127. (In Russ.).
82. Distergelt I.M., Druzhinin G.M., Shcherbinin V.I., Savel'ev V.A., Zvonarev S.V., Petukhov V.B. Regenerative heating system for reheating furnaces of rolling and forging production (history of development, theory and practice). In: *Metallurgicheskaya teplotekhnika. Sbornik nauchnykh trudov Natsional'noi metallurgicheskoi akademii Ukrainy. Tom 5* [Collection of scientific papers of Na-

- tional metallurgical Academy of Ukraine. Vol. 5]. Dnepropetrovsk: NMetAU, 2002, pp. 44-57. (In Russ.).
83. Yaroshenko Yu.G., Lipunov Yu.I., Zakharchenko M.V., Eismondt K.Yu., Nekrasova E.V. Development of advanced thermo-strengthening technique for environmental problem solution in metallurgical industry. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 4, pp. 221–225. (In Russ.).
  84. Lipunov Yu.I., Eismondt K.Yu., Nekrasova E.V. Zakharchenko M.V., Yaroshenko Yu.G., Abramov E.V. Water-jet cooling in the thermal strengthening of asymmetric profiles. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 226–230.
  85. Lipunov Yu.I., Eismondt K.Yu., Yaroshenko Yu.G. Zakharchenko M.V., Nekrasova E.V. Thermal hardening of rail lining by jet water cooling. *Stal'*. 2014, no. 8, pp. 3–8. (In Russ.).
  86. Zhilyakov A.Yu., Lipunov Yu.I., Eismondt K.Yu., Yaroshenko Yu.G. Influence of the quenching technologies on the joint bar' microstructure. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 9, pp. 682–687. (In Russ.).
  87. Zainullin L.A., Karelin V.G., Artov D.A., Epishin A.Yu., Spirin N.A. Drying of coal by a solid heat-transfer medium. *Metallurgist*. 2017, vol. 60, no. 9-10, pp. 912–915.
  88. Zainullin L.A., Epishin A.Yu., Artov D.A., Karelin V.G., Spirin N.A. High-temperature carbothermal reduction of siderite ore in an electric arc. *Metallurgist*. 2017, vol. 60, no. 11-12, pp. 1135–1138.
  89. Ryazanov V.T., Khokhlov V.A., Shul'gin S.S., Oganessian Yu.M. Experience of modernization of stands for drying of the lining of ladles for pig iron transporting. *Stal'*. 2015, no. 3, pp. 39–41. (In Russ.).
  90. Mekhryakov D.V., Greznev V.G., Malei I.V., Petrov S.V., Fakhrutdinov M.Ya. Experience of modernization of metallization installations with MIDREX technology at Oskolsky Electrometallurgical Plant. *Stal'*. 2015, no. 3, pp. 25–27. (In Russ.).
  91. Podkovyrkin E.G., Korshunova N.G., Bakov A.V., Sovetkin V.L., Matyukhin V.I. Rotary-jet installations for heat treatment of charge materials of metallurgical processing. *Stal'*. 2015, no. 3, pp. 98–99. (In Russ.).

**Information about the authors:**

*Yu.G. Yaroshenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (yury-y@planet-a.ru)*

Received April 12, 2017

УДК 669.162.263

## ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

**Гордон Я.М.**<sup>1,3</sup>, д.т.н., профессор, технический директор отдела черной металлургии (igordon@hatch.ca)

**Садри А.**<sup>1</sup>, Ph.D., директор группы неразрушающего контроля (asadri@hatch.ca)

**Миронов К.В.**<sup>2</sup>, начальник доменного цеха (Konstantin.Mironov@evraz.com)

**Спириин Н.А.**<sup>3</sup>, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» (n.a.spirin@urfu.ru)

<sup>1</sup> Инженерно-консалтинговая компания «Hatch»

(2800 Speakman Dr., Mississauga, ONL5K 2R7, Canada)

<sup>2</sup> ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» (ОАО «ЕВРАЗ НТМК»)

(622005, Россия, Свердловская обл., Нижний Тагил, ул. Металлургов, д. 1)

<sup>3</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** В компании Хэтч (Канада) разработана система неразрушающего контроля остаточной толщины огнеупорной кладки доменной печи и электропечей цветной металлургии и ферросплавной промышленности, в основу которой положен метод отраженного акустико-ультразвукового сигнала (AU-E). Данная система дополняет традиционное моделирование теплового состояния футеровки печи с использованием закладных термопар или по тепловой нагрузке на холодильники доменной печи и позволяет дополнительно определять положение трещин и аномалий, а также границу между гарнисажем и огнеупором. Рассмотрены ограничения и источники погрешностей в методе AU-E, представлено развитие и усовершенствование этого метода. Совершенствование метода позволило учесть влияние высоких температур, профиля печи и ее размеров, различие акустического сопротивления различных слоев многослойной огнеупорной футеровки на закономерности распространения волны. Метод AU-E является надежным и неразрушающим методом контроля состояния огнеупорной кладки плавильных печей. Аппаратное и программное обеспечение системы AU-E подверглось существенному усовершенствованию, позволившему получать результаты измерений с достаточной точностью. Оценка точности метода подтверждена физическими замерами на остановленных доменных печах. Приведены примеры использования системы диагностики состояния футеровки различными отечественными и зарубежными заводами, а также некоторые технологические мероприятия, позволяющие продлить кампанию доменной печи. Показано, что использование нескольких последовательных измерений позволяет определить скорость износа огнеупорной кладки и время вывода печи на капитальный ремонт. Метод AU-E успешно использовался (и используется) на более чем 70 доменных печах во всем мире, включая доменные печи Новолипецкого, Череповецкого, Нижнетагильского, Западно-Сибирского и Магнитогорского металлургических комбинатов, а также электропечах для выплавки ферросплавов, меди, платины и т. д.

**Ключевые слова:** доменная печь, футеровка, диагностика, акустико-ультразвуковой сигнал, кампания доменной печи, аномалия, козловая летка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-603-608

Одним из факторов повышения эффективности доменной плавки является снижение себестоимости производства чугуна за счет продления кампании агрегата. Срок службы доменной печи во многом определяется техническим состоянием огнеупорной кладки горна, чрезмерный износ которой может привести к преждевременному выводу агрегата из эксплуатации. Для мониторинга состояния огнеупорной футеровки горна и принятия правильных технических решений необходимо развитие методов диагностики состояния футеровки доменных печей.

Существуют разные способы определения остаточной толщины огнеупорной футеровки доменных печей, основанные на математической обработке показаний температурных датчиков, размещенных в огнеупорной футеровке горна [1], использовании изотопов [2], применении инфракрасной термографии [3, 4], использовании ультразвуковых волн [5], анализе теплосъема с

холодильников и физических измерений. Каждый метод имеет свои достоинства и ограничения. В данной работе использован метод отраженного акустико-ультразвукового сигнала (AU-E) для определения остаточной толщины огнеупорной футеровки.

Метод отраженного акустико-ультразвукового сигнала (AU-E) был разработан в конце 90-х годов прошлого века на основе тех же принципов, на которых работает метод эхо ударного воздействия [6]. Совершенствование метода позволило учесть влияние высоких температур, профиля печи и ее размеров, различие акустического сопротивления различных слоев многослойной огнеупорной футеровки на закономерности распространения волны. Метод AU-E является запатентованной технологией, которая используется в промышленных масштабах для оценки толщины и качества огнеупоров в печах на протяжении более шестнадцати лет.

Во время измерения (рис. 1) механический удар по броне печи вызывает импульс сигнала, который распространяется в слоях огнеупоров. Волна частично отражается от границ материалов с различными свойствами, но она также проходит через слои сплошного огнеупора вплоть до границы раздела кирпич (гарни-саж)/жидкий металл. Отраженные волны сжатия (или продольные волны) воспринимаются детектором, и сигналы анализируются для оценки состояния и толщины огнеупорной футеровки.

В методе АУ-Е при расчете толщины используется «кажущаяся скорость волны» вместо стандартной скорости продольной волны. Кажущаяся скорость волны является средней скоростью волны в трехмерном геометрическом пространстве и учитывает влияние различных факторов, включая плотность кирпича, тепловые градиенты, форму и упругие свойства кирпича. Данные факторы учитываются с помощью двух поправочных коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ .

Тепловой поправочный коэффициент  $\alpha$  для каждого слоя рассчитывается на основе динамического модуля упругости Юнга при рабочих условиях  $E_d(T)$  в сравнении с динамическим модулем упругости Юнга при комнатной температуре  $E_0$ . Тепловой поправочный коэффициент  $\alpha$  определяется по следующему выражению:

$$\alpha = 1 + \left( \frac{\int_{t_1}^{t_2} E_d(T) dT}{E_0} \right). \quad (1)$$

В расчетах предполагается, что модуль упругости огнеупора является линейной функцией температуры между горячей  $t_2$  и холодной  $t_1$  поверхностями. Изменение динамического модуля упругости Юнга как функ-

ции температуры также зависит от типа рассматриваемого огнеупорного материала. Например, средние магнезиальные и глиноземистые огнеупоры больше подвержены температурным изменениям, чем средние углеродисто-графитовые огнеупоры.

Коэффициент формы  $\beta$  отражает снижение скорости волны, обусловленную геометрией материала, через которые проходят волны. Снижение кажущейся скорости волны происходит в связи с возбуждением собственных частот структуры под действием силы удара. Например, коэффициент  $\beta$  поперечного сечения колонны составляет 0,87 [6]. Для большинства печей, у которых поперечные размеры более чем в шесть раз превышают толщину футеровки, коэффициент  $\beta$  равен 0,96.

Уравнение для расчета толщины или глубины отражающей поверхности  $T$  с учетом введенных коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  для метода АУ-Е имеет следующий вид:

$$T = \frac{\alpha\beta V_p}{2f_p}, \quad (2)$$

где  $V_p$  – скорость распространения продольной волны в материале;  $f_p$  – частота продольной волны.

Для многослойного участка футеровки толщина  $n$ -го слоя огнеупора ( $T_n$ ) рассчитывается по следующему уравнению:

$$T_n = \frac{(V_p)_n \alpha_n \beta_n}{2} \left[ \frac{1}{f} - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2T_i}{(V_p)_i \alpha_i \beta_i} \right], \quad (3),$$

где  $f$  – резонансная частота для толщины  $n$ -го слоя.

Уравнение (3) можно использовать для определения толщины слоя футеровки на горячей поверхности (граница с жидким металлом), если известны  $V_{pi}$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$

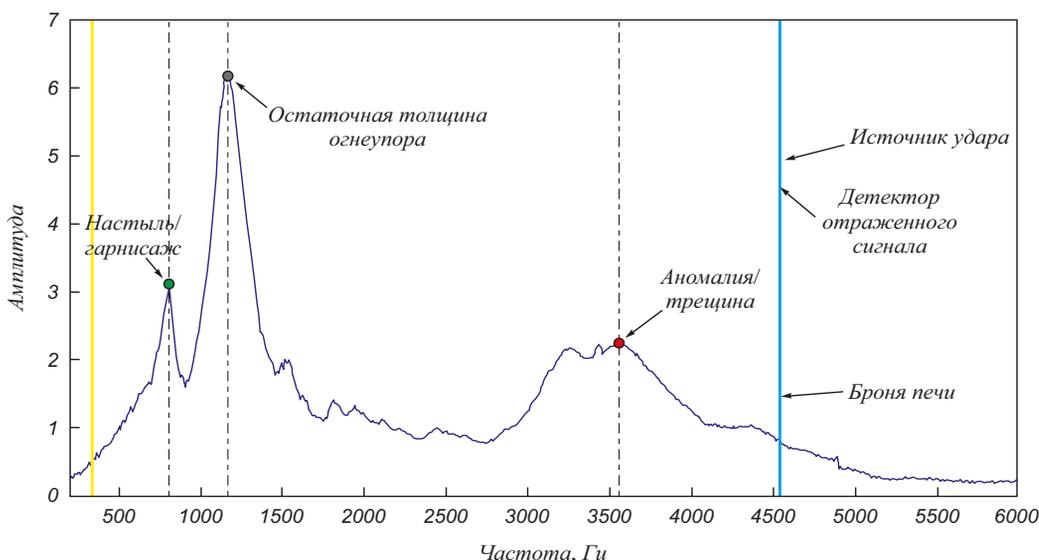


Рис. 1. Принцип метода АУ-Е (отраженный сигнал в частотной области)

Fig. 1. Principle of AU-E method (echo wave in frequency domain)

и толщина  $T_i$  слоев перед слоем у горячей поверхности. При этом предполагается, что волны генерируются источником контролируемых ударов и содержат достаточно энергии для того, чтобы проникнуть на значительную глубину вплоть до границы с жидким расплавом или твердой шихтой и так резонировать туда-обратно между горячей и холодной поверхностями для создания определенной частоты продольной волны.

Для аппаратурной реализации данного метода разработан широкополосный детектор вертикальных перемещений с достаточным диапазоном частот с возможностью функционировать при высоких температурах и во влажной среде. Генерация волн осуществляется ударным источником со специфическим сферическим наконечником, способным генерировать конкретный диапазон частот. Система сбора и обработки данных разработана на базе компьютерной техники, выполненной в пылевлагонепроницаемом исполнении, выдерживающей температуры в диапазоне от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Перед началом измерений на доменной печи определяется кажущаяся скорость продольной волны путем калибровки представительных проб кирпичей при комнатной температуре. Калибровочное измерение скорости волны проводится на всех материалах, через которые проходит волна. Коэффициент  $\alpha$  определяется или опытным путем, нагревая образцы огнеупоров и измеряя скорости волны при требуемой температуре, или рассчитывается по упругим и тепловым свойствам конкретного огнеупора, известным по паспортным данным. Коэффициент  $\beta$  рассчитывается по размерам проверяемой зоны.

На действующих доменных печах измеренные данные во времени (временная область) являются чрезвычайно сложными, содержащими многочисленные частоты и многократные отражения, дифракции, преломления от объемных и поверхностных волн. В частотной области (см. рис. 1) результаты определяются корректнее, но все равно имеется много различных элементов, которые могут привести к неверному толкованию результатов измерений.

Рис. 1 иллюстрирует типичный сигнал АУ-Е в частотной области. Согласно уравнению (3), наиболее низкая частота отраженных волн соответствует большему расстоянию до поверхности отражения сигнала. В соответствии с этим, наименьшая частота и средняя амплитуда принадлежат границе гарнисаж–металл, вторая по величине частота и максимальная амплитуда принадлежат границе гарнисажа с огнеупором и наибольшая частота и наименьшая амплитуда характеризуют трещины или аномалию.

Износ огнеупорной футеровки обычно рассматривается как уменьшение толщины футеровки во времени, обусловленное действием комплекса тепловых, физико-химических, механических воздействий.

При использовании метода АУ-Е имеются несколько других состояний огнеупоров (аномалии), которые

могут ошибочно приниматься как остаточная толщина огнеупорной футеровки, а именно: пропитанный металлическим расплавом огнеупор, наличие гарнисажа (см. рис. 1). Когда огнеупор пропитан металлическим расплавом, у пропитанной части заметно снижаются свойства упругости по сравнению с качественным огнеупором. В результате сигналы АУ-Е будут отражаться от границы пропитки, которые можно ошибочно принять за остаточную толщину огнеупорной футеровки.

**Выявление аномалий.** В методе АУ-Е аномалия определяется как четкое отражение сигнала из огнеупорной футеровки, но источник отражения неизвестен. Аномалиями могут быть трещины, пустоты, проникновение металла, окисление углерода или сочетание всех этих особенностей. При наличии нарушений сплошности, трещин или границ между материалами сигналы имеют тенденцию показывать множественные отражения при более высоких частотах по сравнению с отражением от полной толщины огнеупорной кладки при низких частотах. Знание расположения любых потенциальных трещин имеет важное значение для разработки мер по борьбе с ними, поскольку трещины, которые укрупняются и распространяются, могут привести к проникновению металла в трещину или отслоению огнеупора и фактическому уменьшению толщины огнеупорной кладки.

При наличии значительных разрывов/трещин в огнеупорной футеровке сигналы от удара могут не пройти через всю толщину кирпича. Разрывы будут вызывать затухание этих сигналов и, таким образом, будет казаться, что сигналы отражаются от более тонкой зоны вблизи от нерабочей (холодной) поверхности. Таким образом, фактическая остаточная толщина огнеупорной футеровки может оказаться толще, чем обнаруженная сигналами.

Скорость продольной волны намного ниже в гидратированных, науглероженных или окисленных огнеупорах по сравнению с неповрежденными огнеупорами. Если площадь химического изменения меньше относительно длины и геометрии кладки, сигналы АУ-Е могут не подвергнуться влиянию и, следовательно, изменение качества огнеупора может быть не обнаружено. С другой стороны, если химическое воздействие обширно с точки зрения геометрии и свойств материала относительно футеровки, сигналы АУ-Е без труда обнаружат измененные участки. АУ-Е не может выявить проникновение металла в футеровку горна, если проникновение «меньше половины длины волны сигнала», которая составляет около 50 мм. В этом случае дополнительная толщина проникшего металла определяется как часть футеровки.

**Пример измерения остаточной толщины футеровки.** Для обследования методом АУ-Е доменная печь разбивается на ряд вертикальных сечений по окружности, которые обычно проходят через центр холодильников одного из рядов охлаждения вертикальных стенок горна

печи. Для фурменной зоны разбивка на вертикальные сечения привязана к нумерации фурм. В каждом вертикальном сечении через промежуток примерно 30 см производятся замеры по высоте печи. Пример таких замеров для доменной печи № 6 Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК) [7, 8] приведен на рис. 2, а особенности технологии титано-магнетитовой плавки показаны в работах [9 – 12]. Сплошная линия на этом рисунке характеризует толщину футеровки по результатам замеров ноября 2015 г., в то время как пунктирная линия характеризует замеры февраля 2015 г. Точки представляют собой положение трещин/аномалий, а треугольники – толщину гарнисажа.

Результаты трех последовательных обследований ДП № 6 НТМК, проведенных в апреле 2014 г., феврале и ноябре 2015 г., позволили построить кривую степени износа: степень износа огнеупорной футеровки как для усредненных величин [7, 8], так и для ее критической точки (наименьшей) толщины футеровки (рис. 3).

Тенденция износа послужила основой для определения скорости износа футеровки доменной печи:

- средняя скорость по результатам всех измерений в горне была оценена в 6,9 мм/месяц;
- для наиболее изношенного вертикального сечения L30 средняя скорость износа футеровки составила 8,9 мм/месяц (см. рис. 3);
- существует большая вероятность, что аномалии/трещины образовали так называемый вертикальный цилиндрический стакан с наименьшим расстоянием от поверхности огнеупора 170 мм (линия L30) и наименьшим расстоянием до холодной поверхности огнеупора – 140 мм. Если чугун попадет в данную вертикальную цилиндрическую трещину, печь должна будет

немедленно остановлена на ремонт, так как остаточная толщина футеровки составит 140 мм;

– с учетом скорости износа футеровки в диапазоне 6,9 – 8,9 мм/месяц НТМК и компания Хатч пришли к выводу, что остаточная кампания ДП № 6 составляет 22 – 23 месяца, после чего печь должна быть остановлена и выведена на капитальный ремонт;

– основываясь на вышеизложенных результатах АУ-Е, а также экономическом обосновании капитального ремонта первого разряда, НТМК приняло решение о строительстве новой ДП № 7 и выводе в резерв ДП № 6 в конце 2017 г.

**Выпуск «козлового чугуна».** Метод АУ-Е также способен определить место для сверления «козловой летки». «Козел» выпускается из точки основания металлоприемника, которая является самым низким уровнем лещади печи. Для выпуска козлового чугуна требуется высокая степень точности. Традиционно местонахождение козловой летки определяется по показаниям термопар и бурением в нескольких местах. Однако эти методы, как правило, не точны и приводят к потере производства. Компания Хатч разработала следующую методологию определения положения козловой летки методом АУ-Е.

На основании показаний термопар и рекомендаций персонала доменной печи определяется предполагаемое расположение наиболее низкой точки лещади. Через эту точку проводится вертикаль, вдоль которой вверх и вниз от предполагаемого положения козловой летки проводятся замеры через короткие промежутки, приблизительно около 5 см. Таким образом, определяется самая нижняя точка разгара лещади и положения козловой летки. Справа и слева добавляются две вертикали примерно на расстоянии 20 см от центральной вертикали, вдоль которых также производятся измере-

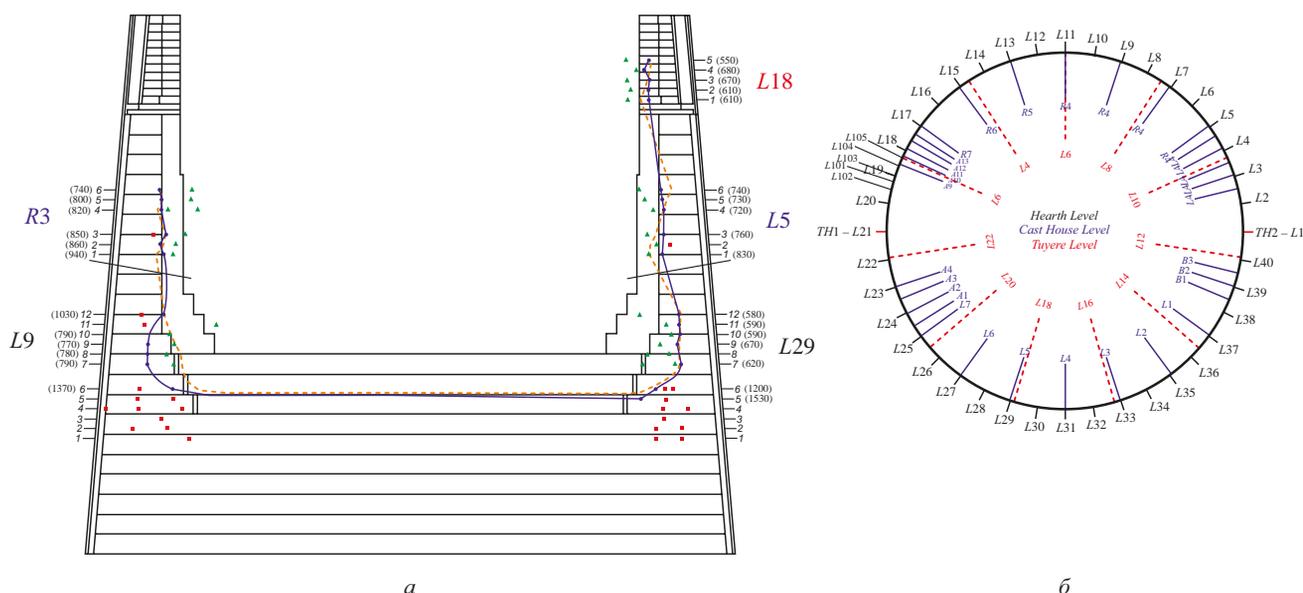


Рис. 2. Результаты оценки остаточной толщины футеровки на примере ДП № 6 НТМК

Fig. 2. Remaining refractory thickness estimate – BF 6 NTK example

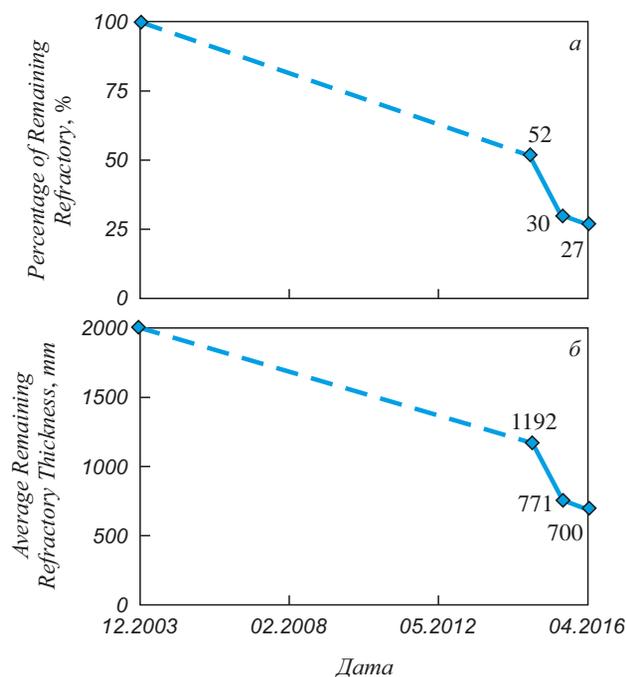


Рис. 3. Тенденция износа футеровки для вертикального сечения L30 с наиболее изношенной точкой (усредненный результат всех измерений вдоль линии L30)

Fig. 3. Tendency of refractory wear for vertical cross-section line L30 with the most worn-out point (average for all measurements along line L30)

ния для подтверждения точности определения положения козловой летки. Использование данной методологии на ряде зарубежных доменных печей показало, что метод АУ-Е точно определяет положение козловой летки в работающих доменных печах.

Определение положения козловой летки в России было выполнено для ДП № 1 Западно-Сибирского металлургического комбината. Отличные результаты выпуска козлового чугуна еще раз подтвердили надежность метода АУ-Е.

**Точность измерений метода АУ-Е.** В работе [13] проанализированы причины погрешностей метода АУ-Е. На основании многочисленных проверок оказалось, что точность измерений метода АУ-Е составляет 4 – 7 % фактической толщины огнеупорной кладки или положения аномалий. Точность измерения толщины настывли находится в пределах 15 % физических измерений из-за большей неопределенности в скорости волны в настывли. Точность измерений методом АУ-Е подтверждена результатами керновых бурений на работающих доменных печах и непосредственными замерами на остановленных и охлажденных доменных печах как в России [14, 15], так и за рубежом [16].

**Выводы.** Метод АУ-Е является надежным и неразрушающим методом контроля состояния огнеупорной кладки плавильных печей. Аппаратное и программное обеспечение системы АУ-Е подверглось существенному усовершенствованию, позволившему получать результаты измерений с достаточной точностью.

АУ-Е метод применен и продолжает использоваться на более чем 70 доменных печах по всему миру. В России метод системно используется на 16 доменных печах Новолипецкого [14, 15], Череповецкого [17], Нижнетагильского [7, 8], Западно-Сибирского и Магнитогорского металлургических комбинатов.

По мере старения печи и приближения ее к концу кампании, как правило, требуются более частые обследования футеровки горна. Это могут быть полугодовые или даже ежеквартальные обследования, которые позволяют осуществлять диагностику состояния футеровки и применять эффективные меры по ее защите для продления кампании доменных печей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Preuer A. etc. Computation of the erosion in the hearth of a blast furnace // *Steel Research*. 1992. Vol. 63. P. 147 – 151.
2. Salgado J., Oliveira C., Moutinho A., Silvério C. Control of refractory lining wear by using radioisotopes // *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*. 1988. Vol. 39. Issue 12. P. 1265 – 1267.
3. Bolf N. Application of infrared thermography in chemical engineering // *Journal of Chemists and Chemical Engineers*. 2004. Vol. 53(12). P. 549 – 555.
4. Maldague X. Introduction to NDT by active infrared thermography // *Materials Evaluation*. 2002. Vol. 6(9). P. 1060 – 1073.
5. Parker R.L. etc. Application of pulse-echo ultrasonics to locate the solid/liquid interface during solidification and melting of steel and other metals // *Journal of Applied Physics*. 1985. Vol. 58 (11). P. 4150 – 4164.
6. Sansalone M.J., Streett W.B. *Impact-Echo: Non-destructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Ithaca, NY: Bullbrier Press, 1997. – 339 p.
7. Kushnarev V., Mironov K., Gordon Y. etc. Careful control of refractory lining conditions at NTMK-Evraz ensures intensive operation and long campaign of titania blast furnace // *AISTech 2017 Proceedings, Nashville, May 8 – May11, USA (in printing)*.
8. Kushnarev V., Mironov K., Gordon Y. etc. AU-E control of blast furnace refractory lining at NTMK-Evraz ensures intensive operation and prediction of the end of campaign of titania blast furnace // *ESTAD 2017 Proceedings, Vienna, June 26 – 29 (in printing)*.
9. Конверторный передел ванадиевого чугуна / Л.А. Смирнов, Ю.А. Дерябин, С.К. Носов и др. – Екатеринбург: Среднеуральское книжное изд-во, 2000. – 528 с.
10. Смирнов Л.А., Дерябин Ю.А., Шаврин С.В. Металлургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 256 с.
11. Filatov S.V., Kirichkov A.A., Mikhalev V.A., Zagainov S.A. Smelting low silica hot metal at OAO NTMK // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. No. 5. P. 443 – 445.
12. Носов С.К., Леонтьев Л.И., Ильин В.И. и др. Марганец важный элемент технологии при переработке титаномагнетитов по металлургической схеме // *Сталь*. 2003. № 3. С. 14 – 18.
13. Sadri A. An introduction to stress wave non-destructive testing and evaluation (NDT&E) of metallurgical furnaces and refractory condition monitoring // *CINDE Journal*. 2008. Vol. 29(2). P. 7 – 11.
14. Filatov S., Kurunov I., Gordon Y., Sadri A., Ying W. Careful control of refractory lining conditions ensures intensive operation and long campaign of blast furnace // *AISTech Proceedings, Pittsburgh, USA*. 2016. P. 695 – 704.
15. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Гордон Я.М. и др. Продление кампании доменной печи при ее интенсивной работе // *Металлург*. 2016. № 9. С. 17 – 22.
16. Sadri A., Gebiski P., Rampersad A. etc. Comparing the accuracy of acousto ultrasonic-echo (NDT), finite element analysis (FEA), and

drilling when obtaining a blast furnace refractory lining wear profile // *Journal of Iron & Steel Technology*. 2010. No. 3. P. 1 – 12.

17. Vinogradov E.N., Karimov M.M., Dmitriev A.A. etc. Careful control of refractory lining conditions ensures prolonged campaign

of blast furnace // *ECIC 2016 Proceedings, Linz, September 12-14. 2016. P. 255 – 264.*

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 8, pp. 603–608.

## EXPERIENCE AND DEVELOPMENT OF METHODS TO ESTIMATE BLAST FURNACE REFRACTORY LINING CONDITIONS

Ya.M. Gordon<sup>1,3</sup>, A. Sadri<sup>1</sup>, K.V. Mironov<sup>2</sup>, N.A. Spirin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hatch Ltd., Mississauga, Canada

<sup>2</sup>JSC “Nizhny Tagil Iron and Steel Works”, Nizhny Tagil, Sverdlovsk Region, Russia

<sup>3</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** Acousto – Ultrasonic – Echo (AU-E) method of non-destructive testing of refractory lining conditions is developed by Hatch (Canada) to estimate refractory wear of blast furnaces and electrical smelters in non-ferrous and ferro-alloys industries. This system complements the traditional modeling of heat transfer of blast furnace lining based on imbedded thermocouples data and additionally allows to determine location of cracks/anomalies and boundary between refractory lining and accretion. The limitations and accuracy of AU-E method are discussed and confirmed by comparison with physical measurements on cold furnaces. Improvement of the method allowed to take into account the influence of high temperatures, profile of the furnace and its dimensions and difference in the acoustic resistance of various layers of multilayer refractory lining on the regularity of wave propagation. The AU-E method is a reliable and non-destructive method for controlling the state of refractory masonry of smelting furnaces. The hardware and software of the AU-E system underwent a significant improvement, which made it possible to obtain measurement results with sufficient accuracy. Examples of AU-E method application to numerous furnaces in Russian Federation and around the Globe as well as some technological measures to prolong blast furnace campaign are presented and discussed. It was shown that results of several consecutive measurements allow estimation of the rate of refractory wear and prediction of the end point of blast furnace campaign. AU-E method is successfully applied for more than 70 blast furnaces around the World including blast furnaces of NLMK, Chermk, NTMK, ZapSib and MMK in Russian Federation and also for numerous copper, platinum, nickel and ferro-alloy smelters etc.

**Keywords:** blast furnace, refractory lining, acoustic, ultrasound, non-destructive, diagnostics, campaign.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-603-608

### REFERENCES

1. Preuer A. etc. Computation of the erosion in the hearth of a blast furnace. *Steel Research*. 1992, vol. 63, pp. 147–151.
2. Salgado J., Oliveira C., Moutinho A., Silvério C. Control of refractory lining wear by using radioisotopes. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*. 1988, vol. 39, Issue 12, pp. 1265–1267.
3. Bolf N. Application of infrared thermography in chemical engineering. *Journal of Chemists and Chemical Engineers*. 2004, vol. 53(12), pp. 549–555.
4. Maldague X. Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials Evaluation*. 2002, vol. 6(9), pp. 1060–1073.
5. Parker R.L. et al. Application of pulse-echo ultrasonics to locate the solid/liquid interface during solidification and melting of steel and other metals. *Journal of Applied Physics*. 1985, vol. 58 (11), pp. 4150–4164.

6. Sansalone M.J., Street W.B. *Impact-Echo: Non-destructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Ithaca, NY: Bullbrier Press, 1997, 339 p.
7. Kushnarev V., Mironov K., Gordon Y., Sadri A., Ying W., Zagainov S.A. Careful Control of Refractory Lining Conditions at NTMK-EVRAZ Ensures Intensive Operation and Long Campaign of Titania Blast Furnace. *AISTech 2017 Proceedings, Nashville, May 8 – May, USA* (in printing).
8. Kushnarev V., Mironov K., Gordon Y., Sadri A., Ying W., Zagainov S.A. AU-E control of blast furnace refractory lining at NTMK-Evraz ensures intensive operation and prediction of the end of campaign of titania blast furnace. *ESTAD 2017 Proceedings, Vienna, June 26-29* (in printing).
9. Nosov S.K., Kuzovkov A.Ya., Il'in V.I. *Konvertorny peredel vana-dievogo chuguna* [BOF processing of vanadium hot metal]. Ekaterinburg: Sredn.-Ural. Kn. Izd-vo, 2000, 528 p. (In Russ.).
10. Smirnov L.A., Deryabin Yu.A., Shavrin C.B. *Metallurgicheskaya pererabotka vanadiisoderzhashchikh titanomagnetitov* [Metallurgical treatment of vanadium containing titanium-magnetite]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 256 p. (In Russ.).
11. Filatov S.V., Kirichkov A.A., Mikhalev V.A., Zagainov S.A. Smelting low silica hot metal at OAO NTMK. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 5, pp. 443–445.
12. Nosov S.K., Leont'ev L.I., Il'in V.I., Filippov V.V., Shavrin S.V. Manganese in technology for processing the titanomagnetite. *Stal'*. 2003, no. 3, pp. 14–18. (In Russ.).
13. Sadri A. An introduction to stress wave non-destructive testing and evaluation (NDT&E) of metallurgical furnaces and refractory condition monitoring. *CINDE Journal*. 2008, vol. 29(2), pp. 7–11.
14. Filatov S., Kurunov I., Gordon Y., Sadri A., Ying W. Careful control of refractory lining conditions ensures intensive operation and long campaign of blast furnace. *AISTech Proceedings, Pittsburgh, USA, 2016*, pp. 695–704.
15. Filatov S.V., Kurunov I.F., Gordon Ya.M., Tikhonov D.N., Grachev S.N. Extending the campaign life of an intensively operating blast furnace. *Metallurgist*. 2017, no. 1, pp. 1–7.
16. Sadri A., Gebski P., Rampersad A. etc. Comparing the Accuracy of Acousto Ultrasonic-Echo (NDT), Finite Element Analysis (FEA), and Drilling When Obtaining a Blast Furnace Refractory Lining Wear Profile. *Journal of Iron & Steel Technology*. 2010, no. 3, pp. 1–12.
17. Vinogradov E.N., Karimov M.M., Dmitriev A.A., Sokolov A.N., Kosonkov Y.V., Gordon Y., Sadri A., Ying W. Careful control of refractory lining conditions ensures prolonged campaign of blast furnace. *ECIC 2016 Proceedings, Linz, September 12-14. 2016*, pp. 255–264.

### Information about the authors:

Ya.M. Gordon, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Technical Director of Iron-making technology (igordon@hatch.ca)

A. Sadri, Ph.D., Director of Non-destructive Testing Group (asadri@hatch.ca)

K.V. Mironov, Chief of Blast-Furnace Shop (Konstantin.Mironov@evraz.com)

N.A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (n.a.spirin@urfu.ru)

Received April 12, 2017

УДК 669.162.263

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО СЫРЬЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ\*

*Дмитриев А.Н., д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии  
черных металлов (andrey.dmitriev@mail.ru)*

**Институт металлургии УрО РАН**  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

**Аннотация.** Приведено краткое описание математических моделей доменного процесса и методики оценки количественного влияния металлургических характеристик железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменной плавки, разработанных в Институте металлургии УрО РАН. Основными особенностями для данных математических моделей являются: для комплекса математических моделей – двумерность доменного процесса, заложенная при постановке задачи; для балансовой логико-статистической модели – возможность учета металлургических характеристик железорудного сырья (агломерат и окатыши) при анализе доменной плавки. Описана оригинальная методика оценки влияния показателей качества железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменной плавки. Суть этой методики заключается в следующем: исследование в лабораторных условиях металлургических характеристик железорудного сырья (восстановимость, прочность, температуры размягчения и плавления), определение с помощью математических моделей технико-экономических показателей доменной плавки, проведение опытно-промышленных и промышленных испытаний. Приведены результаты исследования влияния основности промышленного агломерата из титаномагнетитового концентрата на технико-экономические показатели доменной плавки. Представлены результаты литературных и собственных исследований по выявлению стабилизированной фазы двухкальциевого силиката SFCA. Понимание механизмов формирования таких фаз может привести к повышению эффективности промышленных процессов спекания. Для изучения минералогического состава агломератов был проведен микрорентгеноструктурный анализ с помощью растрового электронного микроскопа (Scanning Electron Microscope, SEM) JSM-5900LM. Выявлено наличие определенной взаимосвязи фазового состава агломерата и его горячей прочности. Согласно расчетам с использованием математической модели, повышение горячей прочности агломерата может дать экономию кокса до 3,9 кг/т чугуна и увеличение производительности до 6,3 %. Выполнена оценка влияния химического состава доменной шихты с учетом степени восстановления железа на положение и форму зоны когезии в доменной печи. Для расчета использованы прогнозные физико-химические модели, позволяющие учесть влияние химического состава железорудных материалов и их соотношений на температуры размягчения и плавления окискованного железорудного материала из титаномагнетитового концентрата.

**Ключевые слова:** доменный процесс, математическая модель, титаномагнетиты, железорудное сырье, металлургические характеристики, расход кокса, практические задачи.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-609-615

Использование математических моделей для решения практических задач доменной плавки при переработке различного железорудного сырья, в том числе комплексного, в настоящее время стало необходимым и неизбежным по двум основным причинам. Во-первых, в связи с тем, что проведение промышленных экспериментов на действующих доменных печах является дорогостоящим и технологически опасным, во-вторых, математическое моделирование позволяет исследовать поведение железорудного сырья новых месторождений.

Одной из первых математических моделей доменного процесса, учитывающих двумерный характер яв-

лений, протекающих в печи, была методика расчета температурного поля доменной печи с учетом неравномерности движения потоков шихты и газа [1], в состав которой входили математические модели газодинамики и теплообмена. Впоследствии данная математическая модель была дополнена моделями восстановления, зоны когезии и балансовой (равновесной) математической моделью [2].

В ряду комплексных математических моделей доменной плавки, состоящих из моделей отдельных процессов, отметим работу [3]. В настоящее время продолжается разработка математических моделей доменного процесса, как учитывающих двумерный характер явлений при постановке задачи, так и не учитывающих [4 – 6]. Большое внимание уделяется визуализации результатов расчетов с использованием математических моделей [7]. Также широко используется CFD-моделирование – вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics) [8].

\* Работа выполнена в рамках Государственного задания ИМЕТ УрО РАН по теме №0396-2015-0081.

В работе принимали участие сотрудники Института металлургии УрО РАН Петухов Р.В. (м.н.с.), Овчинникова Л.А. (ст.н.с., к.х.н.), Витькина Г.Ю. (н.с., к.т.н.) и Института высокотемпературной электротехники УрО РАН Панкратов А.А. (вед.инженер).

Математические модели доменного процесса могут интегрироваться в информационные системы в составе АСУ ТП, которые позволяют решать более широкий круг задач не только контроля, но и управления доменным процессом [9].

Одним из основных резервов повышения технико-экономических показателей доменной плавки, в частности снижения удельного расхода кокса, является совершенствование подготовки железорудного сырья, улучшение его металлургических свойств – восстановимости, прочности, температуры размягчения и плавления. Эффективность такого влияния определяется условиями термодинамического равновесия реакции восстановления оксидов железа в конкретной доменной печи, зависящими от дутьевых и шихтовых условий [10].

Одна из лучших математических моделей, учитывающих металлургические характеристики железорудного сырья, разработана под руководством известного ученого-доменщика профессора С.В. Шаврина [11–12].

В Институте металлургии УрО РАН на основе комплекса двумерных математических моделей и балансовой логико-статистической модели доменного процесса [1, 2, 11, 12] разработана методика оценки влияния показателей качества железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменной плавки [13]. Суть этой методики заключается в следующем.

- Получение в лабораторных условиях агломерата или окатышей, определение их металлургических свойств (прочность, восстановимость, температура размягчения и плавления). Восстановимость сырья  $RI$  определяется в соответствии с ГОСТ 17212–84, прочность  $RDI$  – ГОСТ 15137–84 (ISO 13930), температура начала размягчения и плавления железорудного материала – ГОСТ 26517–85.

- Расчетное прогнозирование свойств кокса (прочность, реакционная способность) на основе свойств составляющих шихты для коксования. Реакционная способность кокса  $CRI$  и горячая прочность  $CSR$  определяются согласно ГОСТ Р 50921–2005.

- Определение с помощью математических моделей технико-экономических показателей доменной плавки.

- Проведение опытно-промышленных испытаний.

Эта методика широко используется в Институте металлургии УрО РАН при решении практических задач расширения железорудной базы России, а также совершенствовании технологии переработки существующей железорудной базы. В частности, решается задача повышения качества железорудного сырья АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат (КГОК)» и оценка его влияния на эффективность работы доменных печей ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат (НТМК)».

Роль металлургических характеристик железорудного сырья в доменном процессе хорошо известна. Высо-

кая восстановимость обеспечивает снижение удельного расхода кокса, высокая «горячая» прочность (фракция +6,3 мм) – улучшение газодинамики процесса, и, как следствие, повышение производительности печи. Высокие температуры начала размягчения и плавления при их низком интервале и высокой восстановимости железорудного сырья обеспечивают оптимальное положение и форму зоны когезии в доменной печи, что имеет большое значение для обеспечения высокой производительности печи. Более важным моментом здесь является возможность формирования металлургических характеристик железорудного сырья на этапе его производства и прогнозирования технико-экономических показателей доменной плавки.

Остановимся на некоторых вопросах технологии производства железорудного агломерата из титаномагнетитового концентрата. В связи с тем, что лучшие прочностные показатели имеют неофлюсованные окатыши, возможна схема использования комбинированной шихты: неофлюсованные окатыши – высокоосновной агломерат. Хорошо известна сложная зависимость «горячей» прочности агломерата от его основности.

В работе [14] отмечено влияние основности агломерата на его прочность (фракция +6,3 мм). Установлено, что при основности агломерата ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» 1,4 его прочность составляет 61 %, при основности 1,6 – 56 %, при основности 3,0 – 69 %. Для агломерата ПАО «Северсталь» при основности 1,4 прочность составляет 62 %, при 1,6 – 2,2 – 60 %, при 3,0 – 71 %.

В работе [15] на экспериментальной установке исследовано влияние основности агломерата из титаномагнетитового концентрата Panzhihua Iron & Steel (Group) Co (Pangang Group) на его прочностные показатели. Содержание Fe в концентрате 53,51 %,  $TiO_2$  – 12,22 %. Результаты показали, что повышение основности может увеличить выход годной продукции, производительность и индекс восстановимости ( $RI$ ) конечного агломерата. Однако индекс прочности при восстановлении ( $RDI_{+3,15}$ ) значительно уменьшается при изменении основности от 1,0 до 2,0. Также показано, что титаномагнетит и титаногематит являются главными минералами в агломерате, в то время как кирштейнит и силикат кальция являются основными фазами связки. Количество перовскита сначала увеличивается, а затем снижается с увеличением основности, тогда как содержание силикоферрита кальция и алюминия (SFCA) начинает увеличиваться при основности от 1,5 до 3,0. Сделан вывод, что корректировка основности агломерата способна снизить отрицательное воздействие  $TiO_2$  при спекании титаномагнетитового концентрата.

Минералогический анализ выявил наличие в железорудном агломерате фаз двухкальциевого силиката: нестабилизированной  $2CaO \cdot SiO_2$  и стабилизированной  $Ca_{2,3}Mg_{0,8}Al_{1,5}Fe_{8,3}Si_{1,1}O_{20}$  (SFCA). Результаты ана-

лиза показали, что холодная прочность и прочность при восстановлении RDI агломерата из титаномагнетитового концентрата ухудшаются с увеличением перовскита в агломератах. Однако отрицательные воздействия нивелируются увеличением SFCA при основности более 2,0. Кроме того, спекание при основности ниже 0,5 и ультра высокоосновное спекание (основность выше 2,5), как полагают авторы статьи [15], являются лучшим выбором для спекания титаномагнетитового концентрата относительно прочности при восстановлении RDI.

В работе [16] представлены результаты исследований по выявлению стабилизированной фазы двухкальциевого силиката SFCA. В работах [17, 18] также отмечается влияние режимов нагрева и охлаждения агломерата [17], а также основности [18] на формирование фазы SFCA.

Фаза SFCA в железорудном агломерате была классифицирована на основе состава, морфологии и кристаллической структуры как два основных типа. Первым является высокожелезистый, низкокремнистый тип под названием SFCA-I, который имеет характерную (описанную как игольчатую) морфологию. Фаза SFCA-I в промышленном агломерате содержала, %: 84  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 13 CaO, 1  $\text{SiO}_2$  и 2  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [18]. Также был синтезирован материал SFCA-I, который имел состав, %: 83,2  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 12,6 CaO и 4,2  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Второй тип SFCA – низкожелезистая форма под названием SFCA, который описан как имеющий колонноподобную морфологию. Фаза SFCA, найденная в промышленных агломератах, как правило, содержит, %: 60 – 76  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 13 – 16 CaO, 3 – 10  $\text{SiO}_2$ , 4 – 10  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 0,7 – 1,5 MgO, основность в диапазоне от 1,6 до 4,4 [18].

Авторы работы [17] полагают, что SFCA и SFCA-I – ключевые фазы связки в железорудном агломерате и по-

нимание механизмов их формирования может привести к повышению эффективности промышленных процессов спекания.

В Институте металлургии УрО РАН была предпринята попытка исследования промышленного агломерата АО «ЕВРАЗ КГОК» из титаномагнетитового концентрата на предмет наличия в нем фазы SFCA. Были исследованы агломераты основностью 2,1 и 2,4.

Для изучения минералогического состава агломерата был проведен микрорентгеноструктурный анализ с помощью растрового электронного микроскопа (Scanning Electron Microscope, SEM) JSM-5900LM.

Основной фазой в агломерате основностью 2,1 является  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (магнетит). В пробе присутствует  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (гематит) в небольших количествах, а также хорошо проявляется Ca-содержащий силикат сложного состава  $\text{Ca}_{2,3}\text{Mg}_{0,8}\text{Al}_{1,5}\text{Fe}_{8,3}\text{Si}_{1,1}\text{O}_{20}$ . На рис. 1 приведен фазовый состав пробы агломерата (обозначения в табл. 1).

В исходном агломерате можно выделить фазы магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , титаната кальция (перовскит)  $\text{CaO}\cdot\text{TiO}_2$ , извести CaO и двухкальциевых силикатов, один из которых стабилизирован алюминием –  $\text{Ca}_{2,3}\text{Mg}_{0,8}\text{Al}_{1,5}\text{Fe}_{8,3}\text{Si}_{1,1}\text{O}_{20}$ . Двухкальциевый силикат  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (фазы 4, 5 в табл. 1) не стабилизирован и в результате приводит к образованию мелочи из агломерата.

На рис. 2 приведен фазовый состав пробы агломерата основностью 2,4 (обозначения в табл. 2).

Основными фазами являются  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (магнетит) и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (гематит). Фаза магнетита представляет компактную, но довольно угловатую форму (см. рис. 2, фазы 1, 2) и по химическому составу имеет некоторый избыток кислорода, что может характеризовать некоторую недовосстановленность железа. Фаза гематита представлена в виде утолщенных игл (см. рис. 2,

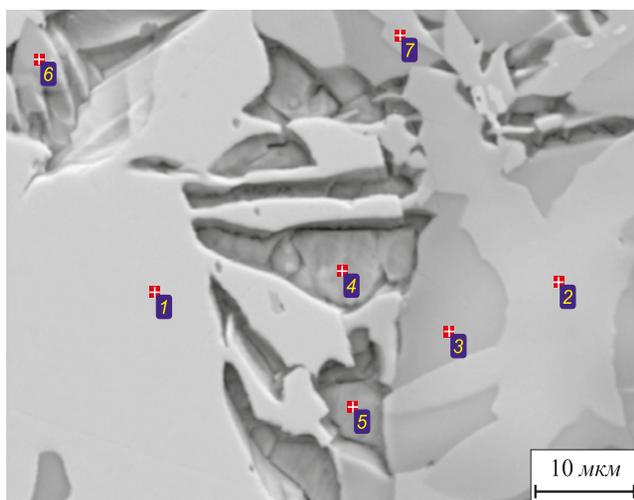


Рис. 1. Фазовый состав агломерата основностью 2,1 в режиме BES ( $\times 2000$ )

Fig. 1. Phase composition of agglomerate with the basicity of 2.1 in the BES mode ( $\times 2000$ )

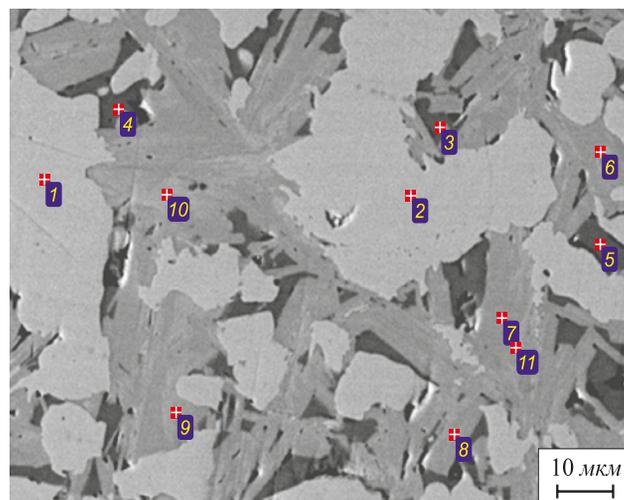


Рис. 2. Фазовый состав агломерата основностью 2,4 в режиме BES ( $\times 1000$ )

Fig. 2. Phase composition of agglomerate with the basicity of 2.4 in the BES mode ( $\times 1000$ )

Таблица 1

Результаты количественного анализа в точках I – 7 (рис. 1)

Table 1. Results of the quantitative analysis in points I – 7 (fig. 1)

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Fe
Фаза	Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>								
1	53,64		2,11	1,25		1,21			41,78
Фаза	Титанат кальция (перовскит) CaO·TiO <sub>2</sub>								
2	64,12			0,56	4,20	18,29	6,05		6,77
Фаза	Двухкальциевый силикат (SFCA) 2Ca (Mg, Fe, Mn)O·SiO <sub>2</sub> (стабилизирована Al)								
3	61,35			3,45	13,66	15,98	0,71	0,83	4,01
Фаза	2CaO·SiO <sub>2</sub> (не стабилизирована)								
4	59,68	0,27			13,92	24,83		0,43	0,87
5	56,10				13,05	29,62		0,48	0,75
Фаза	Известь CaO								
6	57,69			0,64	4,28	21,11	7,28		9,00
7	56,98			1,31	4,11	19,54	7,52		10,53

Таблица 2

Результаты количественного анализа в точках I – II (рис. 2)

Table 2. Results of the quantitative analysis in points I – II (fig. 2)

Спектр	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
Фаза	Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (доля 46 %)										
1	29,03	2,70	0,74	0	0	1,55	0	0	0	0	65,98
2	28,39	2,58	0,81	0	0	1,24	0	0	0	0	66,97
Фаза	Перовскит (CaTiO <sub>2</sub> ) + двухкальциевый силикат 2CaO·SiO <sub>2</sub> (доля 6 %)										
3	33,68	0	0,59	8,92	0	22,62	6,77	2,67	0	0	24,74
4	35,78	0	0,46	7,72	0	21,30	7,96	1,95	0	0	24,83
5	34,65	0	0,56	7,66	0	22,42	8,61	1,81	0	0	24,29
Фаза	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (доля 37 %)										
6	31,87	0,59	1,74	2,69	0	10,20	1,45	0	0	0	51,46
7	32,41	0,63	1,91	2,43	0	10,25	1,13	0	0	0	51,25
8	32,11	0,60	1,75	2,55	0	10,39	1,52	0	0	0	51,08
9	30,24	1,27	1,92	1,68	0	6,91	0,64	0	0	0	57,34
10	31,06	1,55	2,08	1,12	0	6,18	0,47	0	0	0	57,55
11	30,79	1,15	1,99	1,61	0	7,84	0,60	0	0	0	56,02

фазы 6 – 11). Также обнаружено небольшое количество CaO·TiO<sub>2</sub> (перовскит) и β-2CaO·SiO<sub>2</sub> (двухкальциевый силикат) (см. рис. 2, фазы 3 – 5).

Определение прочности агломератов по ГОСТ 15137–84 показало, что для агломерата основностью 2,4 она выше, чем для агломерата 2,1, на 24 % (отн.). Согласно расчетам с использованием математической модели [10, 11], такое повышение горячей прочности агломерата может дать экономию кокса до 3,9 кг/т чугуна и увеличение производительности до 6,3 %.

Также авторами была выполнена оценка влияния химического состава доменной шихты с учетом степени восстановления на положение и форму зоны когезии в доменной печи. Для расчета использовались прогнозные физико-химические модели [19 – 21], позволяющие учесть влияние химического состава железорудных материалов и их соотношений. Были внесены дополнения, учитывающие наличие в железорудном сырье оксидов титана и ванадия. В качестве исходных данных для расчета зоны когезии взято соотношение в домен-

ной шихте окускованного сырья АО «ЕВРАЗ КГОК» – агломерат 40 %, окатыши 60 %. В итоге получены следующие уравнения и для расчета температуры начала размягчения шихты (1) и температуры плавления (2):

$$T_{\text{нрШ}}^R = 1143(1 - 4,9 \cdot 10^{-3}R + 3,75 \cdot 10^{-5}R^2); \quad (1)$$

$$T_p^R = 1469(1 - 9,97 \cdot 10^{-3}R + 3,357 \cdot 10^{-5}R^2 - 3,652 \cdot 10^{-6}R^3 + 1,3 \cdot 10^{-8}R^4), \quad (2)$$

где  $R$  – степень восстановления, доли ед.

На рис. 3 приведены расчетные с помощью математической модели [2] температурные поля и зона когезии для доменной печи № 5 объемом 1719 м<sup>3</sup> Нижнетагильского металлургического комбината (до ее последней реконструкции).

Таким образом, показана возможность анализа и прогнозирования влияния качества железорудного сырья на показатели доменной плавки на примере титаномагнетитов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дмитриев А.Н., Щербатский В.Б., Суханов Е.Л. и др. Методика расчета температурного поля доменной печи с учетом неравномерности движения потоков шихты и газа // Изв. вуз. Черная металлургия. 1979. № 8. С. 28 – 32.
2. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование двумерных процессов в доменной печи // Вычислительные методы и программирование. 2004. Т. 5. Раздел 1. С. 252 – 267.
3. Blast Furnace Phenomena and Modeling. – London – New York: Elsevier Applied. 1987, – 631 p.
4. Shigeru Ueda, Shungo Natsuo, Hiroshi Nogami etc. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace // ISIJ International. 2010. Vol. 50. No. 7. P. 914 – 923.
5. Zongliang Zhang, Jiale Meng, Lei Guo, Zhancheng Guo. Numerical study of the gas distribution in an oxygen blast furnace. Part 1. Model building and basic characteristics // JOM. 2015. Vol. 67. No. 9. P. 1936 – 1944.
6. Zongliang Zhang, Jiale Meng, Lei Guo, Zhancheng Guo. Numerical study of the gas distribution in an oxygen blast furnace. Part 2. Effects of the design and operating parameters // JOM. 2015. Vol. 67. No. 9. P. 1945 – 1955.
7. Chenn Zhou, Guangwu Tang, Jichao Wang etc. Comprehensive numerical modeling of the blast furnace ironmaking process // JOM. 2016. Vol. 68. Issue 5. P. 1353 – 1362.
8. Jun-ichiro Yagi, Hiroshi Nogami, Aibing Yu. Multi-dimensional mathematical model of blast furnace based on multi-fluid theory and its application to develop super-high efficiency operations // Proceedings of Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 13 – 15 December, 2006. P. 1 – 6.
9. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирина, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.
10. Dmitriev A.N. The role of reducibility in achievement of the minimal coke consumption in the blast furnace smelting // Defect and Diffusion Forum. 2006. Vols. 258 – 260. P. 91 – 100.
11. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 1991. – 90 с.

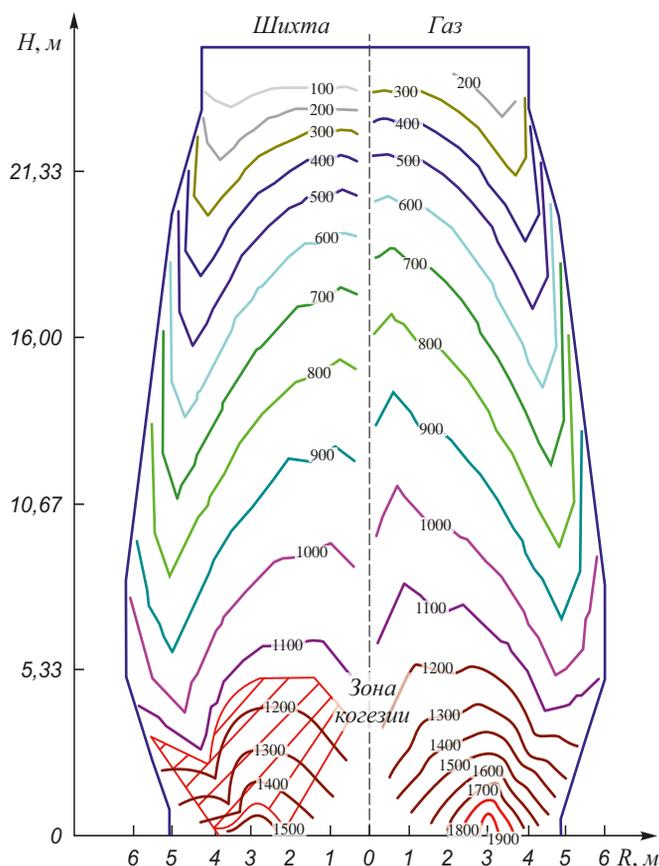


Рис. 3. Температурные поля и зона когезии

Fig. 3. Temperature fields and cohesion zone

12. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. – 2-е изд. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.
13. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical basis of investigation of influence of the iron ore materials and coke metallurgical characteristics on the blast furnace smelting efficiency // Advanced Materials Research. 2013. Vols. 602 – 604. P. 365 – 375.
14. Малышева Т.Я., Павлов Р.М., Мансурова Н.Р., Деткова Т.В. Влияние природного рудообразования на минеральный состав и холодную прочность офлюсованных железорудных агломератов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 3. С. 180 – 185.
15. Zhengwei Yu, Guanghui Lu, Tao Jiang etc. Effect of basicity on titanomagnetite concentrate sintering // ISIJ International. 2015. Vol. 55. No. 4. P. 907 – 909.
16. Hamilton J.D.G., Hoskins B.F., Mumme W.G. etc. The crystal structure and crystal chemistry of  $\text{Ca}_{2,3}\text{Mg}_{0,8}\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{1,1}\text{Fe}_{8,3}\text{O}_{20}$  (SFCA): solid solution limits and selected phase relationships of SFCA in the  $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO}(-\text{Al}_2\text{O}_3)$  system // Neues Jahrb. Miner. Abh., 1989. Vol. 161. P. 1 – 26.
17. Nathan A.S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen, Justin A. Kimpton. Silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) iron ore sinter bonding phases: new insights into their formation during heating and cooling // Metallurgical and Materials Transactions B. 2012. Vol. 43B. December. P. 1344 – 1357.
18. Nathan A.S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen etc. Fundamentals of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) and SFCA-I iron ore sinter bonding phase formation: effects of  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  ratio // Metallurgical and Materials Transactions B. 2014. Vol. 45B. December. P. 2097 – 2115.

19. Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Гладков Н.А., Ходотова Н.Е. Разработка моделей для прогнозирования агрегатных превращений железорудных материалов в доменной печи // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2009. № 19. С. 49 – 67.
20. Гаврилко С.А., Киселев А.А., Громак Г.А. и др. Исследование размягчаемости восстановленного агломерата различных фракций // *Металлургия: Сборник научных трудов ЗГИА. – Запорожье*. 2009. Вып. 20. С. 26 – 31.
21. Приходько Э.В., Хамхотько А.Ф., Тогобицкая Д.Н. и др. Роль химического состава железорудных материалов в формировании их металлургических свойств. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 1987. Вып. 5. С. 1 – 25.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 8, pp. 609–615.

## ANALYTICAL STUDY OF QUALITY INFLUENCE OF TITANOMAGNETITE RAW MATERIALS ON BLAST FURNACE INDICATORS

A.N. Dmitriev

Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** A short description of the mathematical models of blast-furnace process and the estimation technique of metallurgical characteristics quantitative influence of iron ore raw materials and coke on technical and economic indicators of blast furnace smelting developed at Institute of metallurgy of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences are provided. Features of these mathematical models are the main: for a complex of mathematical models – two-regularity of blast-furnace process put at a problem definition for balance logic-statistical model – possibility of the accounting of metallurgical characteristics of iron ore raw materials (agglomerate and pellets) in analysis of the blast furnace smelting phenomena. The original estimation procedure of influence of quality characteristics of iron ore raw materials and coke on technical and economic indices of blast furnace smelting is described. The essence of this procedure consists in the following: examination in vitro the metallurgical characteristics of iron ore raw materials (reducibility, strength, softening and melting temperatures), definition by means of mathematical models of technical and economic indices of blast furnace smelting, carrying out trial and industrial trials. Effects of examination of influence of basicity of industrial agglomerate from titanomagnetite concentrate on technical and economic indices of blast furnace smelting are given. The results of literary and one's examinations on detection of the stabilized phase of two-calcic silicate SFCA are provided. The understanding of shaping mechanisms of such phases can lead of efficiency increase of industrial sintering processes. The micro X-ray diffraction analysis by raster-type electron microscope (Scanning Electron Microscope, SEM) JSM-5900LM has been carried out to study of mineralogical composition of the agglomerates. Existence of particular correlation of agglomerate phase composition and its hot strength was revealed. According to the calculations with the use of mathematical model such rise of agglomerate hot strength can give economy of coke about 3.9 kg/t of cast iron and efficiency rise about 6.3 %. The influence estimation of chemical composition of blast furnace charge was fulfilled taking into account the degree of iron reduction on location and the shape of cohesion zone in the blast furnace. For the calculation, predictive physico-chemical models have been used that allow to take into account the influence of the chemical composition of iron-ore materials and their ratios on the softening and melting temperatures of the agglomerated iron-ore material from the titanomagnetite concentrate.

**Keywords:** blast-furnace process, mathematical model, titaniferous magnetite, iron ore raw materials, metallurgical characteristics, coke consumption, practical tasks.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-609-615

### REFERENCES

1. Dmitriev A.N., Shcherbatskii V.B., Sukhanov E.L., Kitaev B.I., Shvydkii V.S. Method for calculating the temperature field of a

blast furnace, taking into account the unevenness of charge and gas flows. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1979, no. 8, pp. 28–32. (In Russ.).

2. Dmitriev A.N. Mathematical modeling of two-dimensional processes in a blast furnace. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. 2004, vol. 5, pp. 252–267. (In Russ.).
3. *Blast Furnace Phenomena and Modeling*. London – New York: Elsevier Applied, 1987, 631 p.
4. Shigeru Ueda, Shungo Natsuo, Hiroshi Nogami, Jun-ichiro Yagi, Tatsuro Ariyama. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 7, pp. 914–923.
5. Zongliang Zhang, Jiale Meng, Lei Guo, Zhancheng Guo. Numerical study of the gas distribution in an oxygen blast furnace. Part 1: Model building and basic characteristics. *JOM*. 2015, vol. 67, no. 9, pp. 1936–1944.
6. Zongliang Zhang, Jiale Meng, Lei Guo, Zhancheng Guo. Numerical study of the gas distribution in an oxygen blast furnace. Part 2: Effects of the design and operating parameters. *JOM*. 2015, vol. 67, no. 9, pp. 1945–1955.
7. Chenn Zhou, Guangwu Tang, Jichao Wang, Dong Fu, Tyamo Okosun, Armin Silaen, Bin Wu. Comprehensive numerical modeling of the blast furnace ironmaking process. *JOM*. 2016, vol. 68, Issue 5, pp. 1353–1362.
8. Jun-ichiro Yagi, Hiroshi Nogami, Aibing Yu. Multi-dimensional mathematical model of blast furnace based on multi-fluid theory and its application to develop super-high efficiency operations. In: *Proceedings of Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 13-15 December, 2006*, pp. 1–6.
9. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Gileva L.Yu., Krasnobayev A.V., Shvydkii V.S., Onorin O.P., Shchibanov K.A., Burykin A.A. *Matematicheskoe modelirovaniye metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in automatic control systems of technological processes]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: OOO “UIPTs”, 2014, 558 p. (In Russ.).
10. Dmitriev A.N. The role of reducibility in achievement of the minimal coke consumption in the blast furnace smelting. *Defect and Diffusion Forum*. 2006, vols. 258–260, pp. 91–100.
11. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balansovaya logiko-statisticheskaya model' domennogo protsessa* [Logic-statistic balance model of blast furnace smelting]. 2nd ed. Ekaterinburg: UrO RAN, 1991, 90 p. (In Russ.).
12. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balansovaya logiko-statisticheskaya model' domennogo protsessa* [Logic-statistic balance model of blast furnace smelting]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2003, 164 p. (In Russ.).
13. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical basis of investigation of influence of the iron ore materials and coke metallurgical characteristics on the blast furnace smelting efficiency. *Advanced Materials Research*. 2013, vols. 602–604, pp. 365–375.
14. Malysheva T.Ya., Pavlov R.M., Mansurova N.R., Detkova T.V. Influence of ore formation on the mineral composition and strength

- of fluxed iron-ore sinter. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 190–194.
15. Zhengwei Yu, Guanghui Lu, Tao Jiang, Yuanbo Zhang, Feng Zhou, Zhiwei Peng. Effect of basicity on titanomagnetite concentrate sintering. *ISIJ International*. 2015, vol. 55, no. 4, pp. 907–909.
  16. Hamilton J.D.G., Hoskins B.F., Mumme W.G., Borbidge W.E., Montague M.A. The crystal structure and crystal chemistry of  $\text{Ca}_{2.3}\text{Mg}_{0.8}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{1.1}\text{Fe}_{8.3}\text{O}_{20}$  (SFCA): solid solution limits and selected phase relationships of SFCA in the  $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO}(-\text{Al}_2\text{O}_3)$  system. *Neues Jahrb. Miner. Abh.*, 1989, vol. 161, pp. 1–26.
  17. Nathan A.S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen, Justin A. Kimpton. Silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) iron ore sinter bonding phases: new insights into their formation during heating and cooling. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2012, vol. 43B, December, pp. 1344–1357.
  18. Nathan A.S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen, Andrew J. Studer, James R. Manuel, Justin A. Kimpton. Fundamentals of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) and SFCA-I iron ore sinter bonding phase formation: effects of CaO:SiO<sub>2</sub> ratio. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014, vol. 45B, December, pp. 2097–2115.
  19. Togobitskaya D.N., Khamkhot'ko A.F., Gladkov N.A., Khodotova N.E. Developing of models for forecasting of modular transformations of iron ore materials in a blast furnace. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii*. 2009 no. 19, pp. 49–67. (In Russ.).
  20. Gavrilko S.A., Kiselev A.A., Gromak G.A., Lichkonenko N.V., Moiseiko Yu.V., Pechennikova V.M., Gavrilko Yu.S. Study of softening of the reduced agglomerate of different fractions. In: *Metallurgiya: sbornik nauchnykh trudov ZGIA, vyp. 20* [Metallurgy: Proceeding of scientific works of ZGIA, Issue 20]. Zaporizhia: ZGIA, 2009, pp. 26–31. (In Russ.).
  21. Prikhod'ko E.V., Khamkhot'ko A.F., Togobitskaya D.N., Grebenkin N.A., Shepetovskii E.A., Zevin S.L. Role of the chemical composition of iron ore materials in forming of their metallurgical properties. Preparation of raw materials for metallurgical processing and production of cast iron. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 1987, Issue 5, pp. 1–25. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by the State task of Institute of Metallurgy of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, the Project no. 0396-2015-0081.
- The work was performed with participation of the employees of the Institute of Metallurgy of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences (Petukhov R.V., Ovchinnikova L.A., Vitkina G.Yu.) and of the Institute of High-Temperature Electrochemistry, UrB RAS (Pankratov A.A.).
- Information about the authors:**
- A.N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory "Pyrometallurgy of Ferrous Metals" (andrey.dmitriev@mail.ru)*

Received April 12, 2017

УДК 621.77.07

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР В РАБОЧИХ ВАЛКАХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПРИ СКОРОСТНОМ НАГРЕВЕ В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ

*Казяев М.Д.<sup>1</sup>, к.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»*

*Самойлович Ю.А.<sup>2</sup>, д.т.н., старший научный сотрудник (platan09@yandex.ru)*

*Казяев Д.М.<sup>2</sup>, коммерческий директор*

*Вохмяков А.М.<sup>2</sup>, к.т.н., начальник ПТО (botia@mail.ru)*

*Спитченко Д.И.<sup>1</sup>, аспирант, ассистент кафедры «Теплофизика и информатика*

*в металлургии» (Danila.Spitchenko@gmail.com)*

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> ООО «НПК «Уралтермокомплекс»

(620026, Россия, Екатеринбург, ул. Народной Воли, 65)

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований скоростного (градиентного) нагрева рабочего слоя бочки валка холодной прокатки в агрегате, состоящем из камерной печи особой конструкции и спрейерной установки, размещенной под печью в специальном приямке и выдвигающейся вверх для обеспечения быстрого охлаждения рабочего слоя валка. При нагреве валка его бочка и часть шеек находятся в рабочем пространстве печи, а остальные (внешние) части шеек размещены за пределами камеры нагрева и опираются на приводные ролики, обеспечивающие вращение бочки валка в процессе нагрева и последующего его охлаждения. При этом необходимо обеспечить закалку только рабочего слоя валка, а части шеек, находящиеся в печи, не должны подвергаться этой процедуре, для чего они покрыты специальными теплоизоляционными вставками. В целях разработки режимов термообработки прокатных валков различных размеров, экспериментальные валки были оснащены термопарами, измеряющими температуру в различных точках поверхности и в глубине бочки и шеек валка. Технологией термообработки были поставлены жесткие условия по равномерности нагрева поверхности бочки валка с очень узкими пределами зон недогрева крайних участков у торцов поверхности. При этом требовалось также обеспечить низкую температуру шеек, находящихся в рабочем пространстве печи. Экспериментальные исследования температурных полей при различных режимах скоростного нагрева валков показали, что достигнуты высокие скорости нагрева и охлаждения, обеспечивающие требуемую структуру рабочего слоя бочки валка. Одновременно экспериментальные исследования и расчеты температурных полей по специально разработанной программе показали, что в существующей конструктивной обстановке ввода и отвода греющих газов и размещения валка с частичным выводом шеек за пределы камеры нагрева, происходит усиленный сток тепла через внешние открытые части шеек. При этом выявлена значительная (отличающаяся от допустимой) неравномерность температурного поля поверхности бочки в торцевых зонах нагреваемого валка. Установлено, что изменения условий внешнего теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью валка не обеспечивают устранения неравномерности температурного поля торцевых участков поверхности. Предложен способ существенного снижения неравномерности нагрева крайних участков поверхности бочки валка и проведен расчетный анализ температурных полей, подтверждающий реальность его применения.

**Ключевые слова:** валки холодной прокатки, рабочий слой, скоростной нагрев, камерная печь, спрейерная установка, температурные поля, экспериментальные и расчетные исследования, неравномерность нагрева и способ ее устранения.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-616-622

Научно-производственной компанией «УралТермоКомплекс» (УТК) разработан и запатентован агрегат дифференцированной термообработки прокатных валков, предназначенный для скоростного (градиентного) нагрева рабочего слоя бочки валка и последующего регулируемого его охлаждения с целью закалки [1].

Агрегат состоит из камерной печи скоростного нагрева, совмещенной со спрейерным устройством, что обеспечивает предельное сокращение времени между операциями нагрева и закалки валков. Камерная печь отапливается природным газом, сжигаемым в восьми скоростных горелках, работающих в импульсном режиме.

Конструкция печи и расположение валка для нагрева под закалку показаны на рис. 1.

Отличительной особенностью данной печи является высокая интенсивность теплообмена между греющей средой и поверхностью нагреваемого валка. При традиционном нагреве изделий в камерных печах [1 – 5] скорость продуктов сгорания топлива вблизи поверхности нагреваемых валков сравнительно невелика, так что доля конвективной составляющей не превышает 10 – 15 % суммарной плотности теплового потока. Нагревательная печь конструкции УТК [1] отличается интенсивной циркуляцией продуктов сгорания природного газа [6] в сравнительно тесном пространстве между

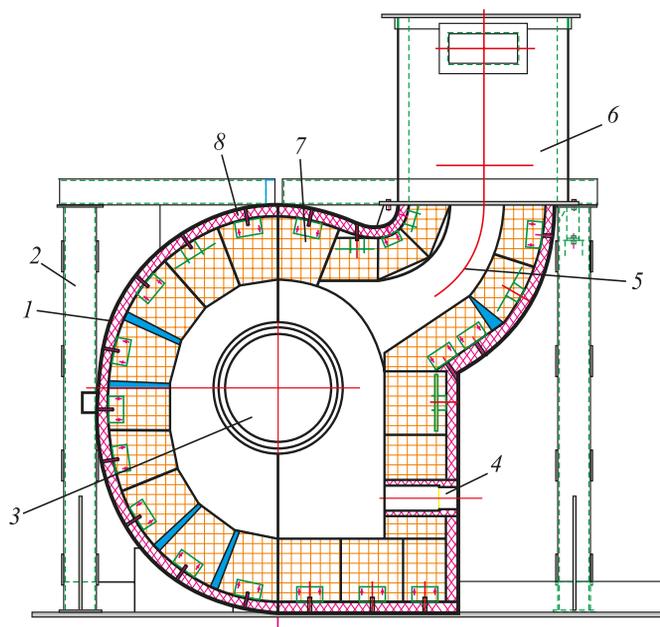


Рис. 1. Камерная печь скоростного нагрева рабочего слоя прокатного вала:

1 – кожух; 2 – каркас; 3 – нагреваемый валок; 4 – горелка; 5 – дымоотводящий канал; 6 – рекуператор; 7 – керамоволокнистые блоки; 8 – теплоизоляционные маты

Fig. 1. Chamber furnace for high speed heating of working roll layer: 1 – upper shell, 2 – frame, 3 – heated roll, 4 – burner, 5 – fume taking-off channel, 6 – heat exchanger, 7 – ceramic- and fibrous lining blocks, 8 – heat-insulating mats

футеровкой печи и поверхностью нагреваемого вала, что приводит к повышенной скорости нагрева поверхности бочки вала и существенному увеличению градиента температуры в его поперечном сечении.

В результате возникает реальная опасность нарушения сплошности (разрушения) вала под воздействием термических напряжений, образующихся при чрезмерном интенсивном его нагреве [7, 8].

Поэтому при разработке специфических режимов нагрева валков перед введением их в производство, как правило, осуществляют экспериментальную проверку и доводку этих режимов непосредственно в промышленных печах [9 – 12].

Устранение указанной опасности достигается использованием ступенчатого (во времени) режима нагрева валков при сниженной скорости повышения температуры греющей среды в начальной стадии нагрева [13].

Другая существенная особенность теплового режима нагрева валков обусловлена особенностями конструкции камерной печи УТК.

При размещении горелочных устройств в нижней части печи и отводе продуктов сгорания топлива через дымоход, расположенный в верхней части печи (см. рис. 1), следует ожидать неравномерности поля температур на поверхности нагреваемого вала. Устранение указанной неравномерности может достигаться

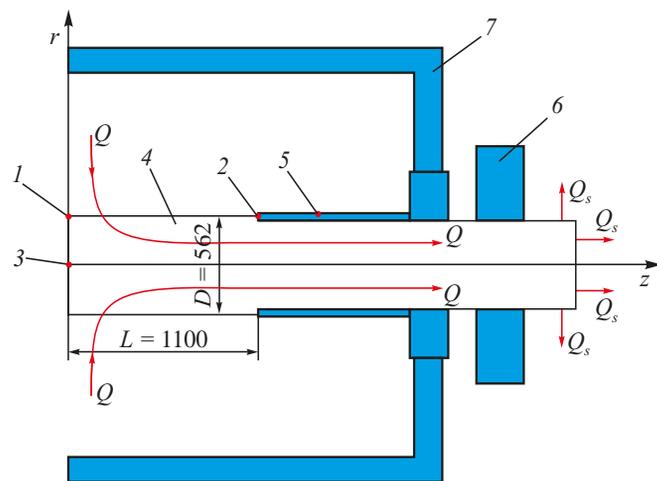


Рис. 2. Схема расположения вала в печи:

1, 2, 3 – точки измерения и расчета температур в бочке; 4 – валок; 5 – теплоизолирующая вставка; 6 – вращающиеся ролики; 7 – футеровка печи;  $Q$  – приток теплоты;  $Q_s$  – сток теплоты

Fig. 2. Roll arrangement diagram in the furnace:

1, 2, 3 – points of temperature measurement and calculation in roll barrel; 4 – roll; 5 – heat-insulating insert; 6 – rotating rollers; 7 – furnace lining;  $Q$  – heat inlet,  $Q_s$  – heat outlet

организацией вращения вала вдоль его продольной оси.

С этой целью внешняя часть шеек вала выносится за пределы камеры нагрева и размещается на опорных вращающихся роликах по обе стороны нагревательной печи.

Расположение отдельных участков шейки вала за пределами камеры нагрева неизбежно приводит к рассеиванию в цеховую атмосферу определенной (сравнительно небольшой) части теплового потока, подводимого от греющей среды печи к поверхности бочки вала в процессе его нагрева. Указанная особенность распространения тепла иллюстрируется схемой на рис. 2, где стрелками указаны направления растекания тепла вдоль вала.

Дополнительным фактором создания неравномерности поля температур в нагреваемом валке является использование теплоизолирующих вставок, закрывающих части шеек вала, находящихся в печи, от избыточного нагрева, приводящего к отпуску, и последующего переохлаждения в процессе закалки. Как показали экспериментальные и расчетные исследования, наличие теплоизолирующих вставок на шейках вала способствует стоку тепла от бочки к охлаждаемым наружным частям шеек, что приводит к подстуживанию краевых участков бочки. Это, в свою очередь, предопределяет увеличение зоны пониженной твердости этих участков и соответствующее снижение прочностных эксплуатационных показателей прокатного вала.

Размеры краевых «проблемных» участков поверхности бочки вала регламентируются ОСТом [14] в зависимости от длины и диаметра бочки.

Расчетные исследования выполнены с использованием математического (компьютерного) моделирования тепловых явлений в нагреваемом валке, результаты которого сопоставлены с данными непосредственных измерений температуры в нескольких представительных точках нагреваемого валка.

Математическая модель, используемая при расчетах температурного поля нагреваемого валка [15], основана на численном решении уравнения нестационарной теплопроводности [16], в котором учитывается симметрия поля температуры относительно продольной оси валка:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(r, z, t), \quad (1)$$

где  $T$  – температура;  $t$  – время,  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  – массовая плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность стали соответственно;  $Q$  – источник тепла от фазовых превращений;  $r$ ,  $z$  – координаты радиуса и продольной оси валка.

Решение уравнения теплопроводности (1) осуществляли для валка цилиндрической формы диаметром бочки  $D = 2R = 562$  мм, общей длиной  $2L = 4800$  мм.

На поверхности бочки валка используется граничное условие

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{\text{пов}} = \alpha_k (T_G - T_{\text{пов}}) + C_{\text{Г.К.М.}} (T_G^4 - T_{\text{пов}}^4) \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

где  $T_G$  – температура греющей среды;  $\alpha_k$  – коэффициент теплообмена конвекцией;  $C_{\text{Г.К.М.}}$  – приведенный коэффициент теплообмена излучением;  $T_{\text{пов}}$  – температура поверхности валка.

Система уравнений (1, 2) дополняется начальным условием:

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Коэффициент теплообмена излучением в рабочем пространстве печи определяли по формуле Д.В. Будрина [17, 18].

Расчеты по формуле Д.В. Будрина с учетом конкретных значений степеней черноты продуктов сгорания природного газа и поверхности металла приводят к значениям коэффициента теплообмена излучением, изменяющимся в пределах  $(2,30 \div 2,38) \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Решение системы уравнений (1) – (3) осуществлялось методом конечных элементов с учетом зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры в соответствии с известными экспериментальными данными для валковых сталей [19, 20].

Расчеты проведены для участка, состоящего из половины бочки и теплоизолированной шейки валка.

На рис. 2 показано расположение представительных контрольных точек расчета температуры, из которых

точки 1 и 2 служат для фиксирования температуры в середине поверхности и на краю бочки соответственно. При этом разность температур  $\Delta T = T_1 - T_2$  характеризует степень недогрева краевых участков бочки валка, а разность температур  $T_1$  и  $T_3$  определяет перепад температуры в среднем сечении бочки валка.

Расчеты по изложенной методике выполнены при соблюдении следующих условий:

- в начальном состоянии камера нагрева вместе с валком находятся при цеховой температуре (30 °С);
- по окончании нагрева температура поверхности бочки валка должна быть равной заданной температуре аустенитной структуры перед началом закалки (940 °С для стали 9Х2МФ) [21, 22];
- тепловой режим нагрева валка определяется графиком изменения во времени температуры греющей среды  $T_G$  (рис. 3).

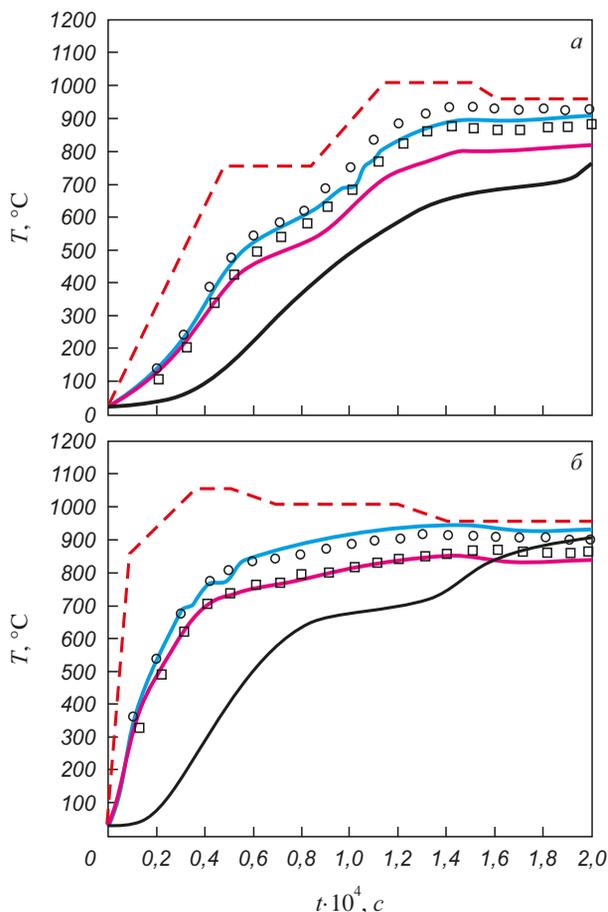


Рис. 3. Изменение во времени температур в контрольных точках бочки валка диаметром 562 мм при ступенчатом (а) и ускоренном (б) режимах нагрева: — — расчетные данные в точках 1, 2, 3 (см. рис. 2); ○ — экспериментальные данные в точке 1; □ — экспериментальные данные в точке 2; --- — заданная температура печной среды  $T_G$

Fig. 3 Temperatures vs. time chart in control points of 562 mm diameter roll barrel under stepped (a) and high-speed (b) heating conditions: — — design data in points 1, 2, 3 (see fig. 2); ○ — experimental data in point 1; □ — experimental data in point 2; --- — predetermined furnace temperature

На основании производственного опыта начальная скорость нагрева валков лимитируется с целью предупреждения возможного нарушения сплошности металла (разрушения) под влиянием возникающих термических напряжений [23, 24].

В частности, для валковой стали 9Х2МФ рекомендуется в начальной стадии нагрева не превышать скорость нагрева, равную 6 – 9 град/мин.

С учетом указанных условий по изложенной выше методике проведена серия расчетов для нагрева валка диаметром бочки 562 мм.

Результаты расчетов, представленные на рис. 3, сопоставлены с результатами непосредственных измерений температуры на поверхности бочки валка, выполненных на агрегате дифференцированной термообработки валков [1].

При проведении экспериментов использовали макет валка, выполненный из стали Ст3, оснащенный системой термопар, спаи которых закреплены на поверхности бочки валка.

Главное отличие экспериментального нагрева валка от реального состояло в том, что измерение температур в контрольных точках производили на неподвижном валке, поскольку его вращение невозможно было осуществить по причине смонтированных на нем термопар, выведенных за пределы печи. Это, безусловно, должно было привести к определенным отличиям температурного поля и поля, полученного при нагреве вращаемого валка.

В настоящей работе основное внимание уделяется изучению эффекта недогрева металла в краевых зонах поверхности бочки валка. В связи с этим, из большого объема полученных экспериментальных материалов в данном случае использованы лишь те из них, которые относятся к нагреву валка диаметром 562 мм при ступенчатом и ускоренном режимах изменения температуры греющей среды.

На рис. 3 приведены графики изменения температуры в контрольных точках (1 ÷ 3) (см. рис.2).

Ступенчатый режим нагрева (рис. 3, а) характеризуется наличием трех этапов выдержки при температурах греющей среды 750 °С (для начальной стадии нагрева), 1000 °С (температура аустенизации) и 940 °С (перед началом закалки).

При этом скорость повышения температуры поверхности валка на старте нагрева не превышала 8 – 9 град/мин.

Из сопоставления экспериментальных данных с расчетными значениями температур в точках 1 и 2 можно сделать следующее заключение:

- полученные в результате термометрирования значения температур в указанных точках на заключительной стадии нагрева заметно (на 40 – 45 град) превышают расчетные значения;

- различие температур в середине поверхности бочки и на ее краю в заключительной стадии нагрева доста-

точно велико (70 – 80 град), что приводит к чрезмерно завышенной протяженности зоны недогрева краевых участков бочки валка по сравнению с рекомендованной ОСТом [14].

Сопоставление результатов эксперимента и расчета температурных полей показывает их удовлетворительную сходимость и адекватность математической модели.

Для объяснения эффекта подстуживания краевых участков бочки валка в процессе нагрева необходимо детально исследовать влияние теплоизолирующей вставки на температурное поле валка. Прежде всего отметим, что возникновение недогрева краевых зон поверхности бочки валка отличается стабильностью, независимо от режима нагрева.

Расчеты показали, что перепад температур на поверхности бочки валка  $\Delta T = T_1 - T_2$  сохраняется неизменным и равным 70 – 80 °С при увеличении длительности выдержки греющей среды и металла на заключительной стадии нагрева (рис. 3, б), т. е. сток тепла через наружные части шеек является стабильным.

Значения измеренных температур различных участков наружных поверхностей шеек при разных режимах нагрева находились в пределах 50 – 70 °С при температуре окружающего воздуха 20 – 30 °С.

Аналогично, на величину конечного перепада температур  $\Delta T$  не влияет существенное изменение параметров начальной стадии нагрева. Действительно, как следует из рассмотрения графиков на рис. 3, б, полученных для условий ускоренного повышения температуры греющей среды и поверхности валка до уровня температур аустенизации, значительное ускорение нагрева в начальной стадии, а также некоторое повышение температуры первой выдержки (до 1050 °С) практически не влияет на величину конечного недогрева краевой зоны валка.

С другой стороны, температурное поле нагреваемого валка существенно зависит от особенностей принятой конструкции камеры нагрева. Размещение торцевых участков шеек валка за пределами камеры вызывает сток тепла от нагреваемой поверхности бочки к охлаждаемому на воздухе за пределами камеры торцевым участкам шеек валка.

Возникает предположение о том, что теплоизолирующая вставка, теплопроводность материала которой в 200 раз меньше теплопроводности валковой стали, оказывает негативное влияние на характер стока тепла, вызывая оттеснение теплового потока от поверхности бочки валка к его осевой зоне. Это существенно проявляется на краевом участке бочки и приводит к подстуживанию участка поверхности на границе раздела бочки и шеек валка (см. рис. 3, расчетные кривые точек 2 и 3).

В подтверждение этого предположения приведем результаты расчетного определения температур на по-

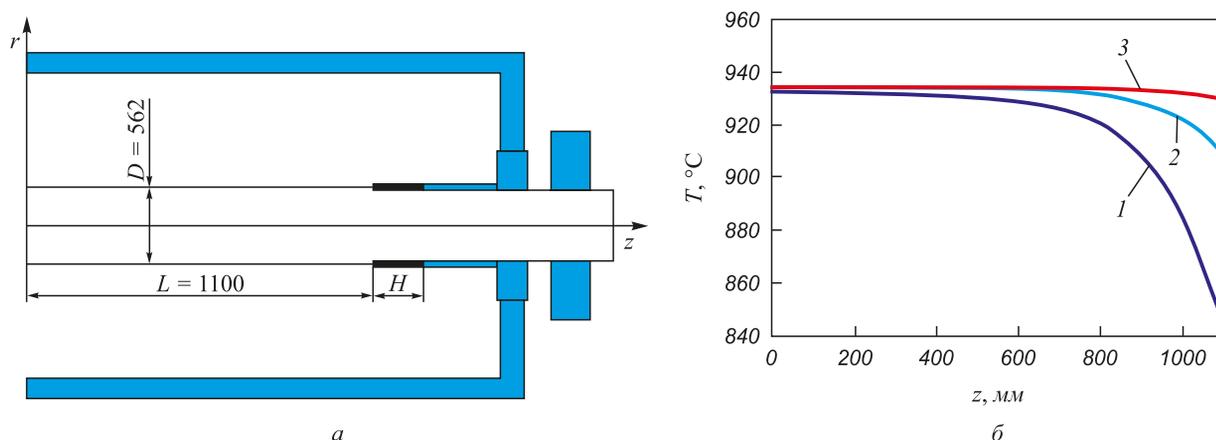


Рис. 4. Результаты расчета влияния накладного стального кольца на степень подогрева краевой поверхности зоны бочки вала к концу нагрева за  $2 \cdot 10^4$  с:

*a* – расположение кольца на шейке вала; *б* – распределение температуры вдоль поверхности бочки диаметром 562 мм; 1 – без кольца (только теплоизоляционная вставка); 2 – кольцо  $H = 200$  мм; 3 – кольцо  $H = 400$  мм

Fig. 4. Results of calculation of steel ring influence on roll barrel edge surface heating for  $2 \cdot 10^4$  sec to the end of heating:

*a* – steel ring arrangement on the roll neck; *б* – temperature distribution along 562 mm diameter barrel; 1 – without the ring (heat-insulating insert only); 2 – ring with  $H = 200$  mm; 3 – ring with  $H = 400$  mm

верхности бочки нагреваемого вала при частичной замене теплоизолирующей вставки стальным кольцом, наружным диаметром равным диаметру бочки вала и плотно прилегающим к торцу бочки. Внутренний диаметр кольца равен наружному диаметру шейки вала.

На рис. 4, *a* представлена схема размещения накладного металлического кольца на поверхности шейки вала, а на рис. 4, *б* приведены результаты расчетного определения поля температур на краевом участке бочки вала при соблюдении исходных данных расчета, соответствующих ускоренному режиму нагрева вала (рис. 3, *б*).

Как следует из рассмотрения графиков на рис. 4, *б*, при использовании только теплоизолирующей вставки ( $H = 0$ , кривая 1) степень подстуживания краевой зоны бочки вала составляет  $76$  °C.

При частичной замене теплоизолирующей вставки стальным кольцом длиной 200 и 400 мм степень подстуживания  $\Delta T$  краевой зоны уменьшается до 23 и 4 °C соответственно (кривые 2 и 3).

Таким образом, применение стального накладного кольца достаточной протяженности взамен части теплоизолирующей вставки позволяет устранить нежелательное подстуживание краевых участков бочки прокатного вала.

**Выводы.** Для определения поля температур при нагреве стального вала холодной прокатки предложена математическая модель, позволяющая учесть особенности конструкции камеры нагрева и предложенного температурного режима греющей среды.

Приведены результаты экспериментального и расчетного исследования поля температур в стальном валке холодной прокатки диаметром 562 мм и выявлена возможность существенного снижения перепада температуры на поверхности бочки вала.

Предложен способ уменьшения зоны недогрева краевых участков бочки вала, состоящий в частичной замене теплоизолирующей вставки кольцевым стальным экраном, уменьшающим сток тепла от края бочки в шейку вала и защищающим шейку от переохлаждения при дальнейшей закалке рабочего слоя бочки вала.

Предложенный способ уменьшения перепада температуры по поверхности бочки вала требует экспериментальной проверки при некотором изменении конструкции камеры нагрева.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 160819 РФ. Устройство для термической обработки рабочих валков холодной прокатки / ООО «Научно-производственная компания «УралТермоКомплекс»; зарег. 10.03.2016; опубл. 10.04.2016. Бюл. №10.
2. Maqnee A., Lecomte-Martens C., Gaspard C. Metallurgy of induction heat treatment of work rolls // Industrial Meeting, Belgium. 1984. P. 13 – 16.
3. Jenkins B.G., Models F.D. Modeling of heat transfer from a large enclosed flame in rotary kiln // Transactions of the Institution of Chemical Engineers. 1981. Vol. 59. No. 1. P. 17 – 25.
4. Mukherjee S.G., Gosh B.B. Some aspects of heat transfer studies in rotary kiln // Journal of the Institute of Engineering (India) Mech. Eng. Div. 1977. Vol. 57. No. 5. P. 273 – 277.
5. Brimacombe J.K., Watkinson A.P. Heat transfer in direct-field rotary kiln: 1. Pilot plant and experimentation // Metallurgical Transactions. 1978. Vol. 9B. No. 2. P. 201 – 208.
6. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Арсеев Б.Н. и др. Методика исследования конвективного теплообмена в методической печи для термообработки вагонных осей, оснащенной скоростными горелками // Тр. Всероссийской науч.-практ. конф. «Теория и практика нагревательных печей в XXI веке». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. С. 65 – 73.
7. Бапизанский В.И. Разрушение слитков от температурных напряжений // Журнал технической физики. 1951. № 5. С. 105 – 113.

8. Брусиловский Б.А., Шашко А.Я. Механизм возникновения отслоений на поверхности валков холодной прокатки // Проблемы прочности. 2001. № 2. С. 116 – 122.
9. Scherello A., Konold U., Kremer H., Lorra M. Mathematical modeling of industrial furnaces // Fifth European Conference on Industrial Furnace and Boiler. 2000. Vol. II. P. 582 – 587.
10. Gosman A.D., Lockwood F.C. Incorporation of flux model for radiation into a finite-difference procedure for furnace calculations // Proceedings of the XIV International Symposium of Combustion, USA. 1972. P. 661 – 671.
11. Khalil E.E. Mathematical modeling of radiative heat transfer in axisymmetric furnaces // AIAA Paper. 1979. No. 99. P. 9.
12. Johnson T.R., Lowes T.M., Berr J.M. Comparison of calculated temperatures and heat flux with measurements in furnace // Journal of the Institute on Fuel. 1974. Vol. 47. No. 3. P. 39 – 51.
13. Гедон М.В., Соболев Г.П., Паисов И.В. Термическая обработка валков холодной прокатки. – М.: Metallurgiya. 1973. – 344 с.
14. Отраслевой стандарт. Валки стальные кованные для холодной прокатки металлов. Технические условия. ОСТ 24.013.20 – 90.
15. Самойлович Ю.А. Теоретические основы расчета температур, термовязкоупругих напряжений и деформаций в деталях цилиндрической формы // Изв. вуз. Энергетика. 2002. № 3. С. 48 – 56.
16. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 456 с.
17. Будрин Д.В. Расчет лучистого теплообмена. – В сб.: Теплообмен и вопросы экономии топлива в металлургических печах. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1951. С. 13 – 37.
18. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Изд. 2 / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев и др. – М.: Metallurgiya, 1982. – 360 с.
19. Немзер Г.Г., Аронов М.А. Исследование теплофизических свойств сталей // Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 3. С. 26 – 30.
20. Неймарк Б.Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 240 с.
21. Филипов М.А., Бараз В.Р., Гервасьев М.А., Розенбаум М.М. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении. Т. I. Стали и чугуны. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2013. – 228 с.
22. Минков А.Н. Закалка крупногабаритных изделий с регламентированной интенсивностью охлаждения // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. № 3. С. 88 – 91.
23. Пышминцев И.Ю., Эйсмодт Ю.Г., Юдин Ю.В. Закалка крупных поковок в водо-воздушной смеси // Металловедение и термическая обработка металлов. 2000. № 3. С. 24 – 28.
24. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1964. – 506 с.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 8, PP. 616–622.

## DETERMINATION OF THE TEMPERATURES FIELD IN WORKING ROLLERS OF COLD ROLLING WITH HIGH SPEED HEATING IN THE CHAMBER FURNACE

*M.D. Kazyaev<sup>1</sup>, Yu.A. Samoilovich<sup>2</sup>, D.M. Kazyaev<sup>2</sup>,  
A.M. Vokhmyakov<sup>2</sup>, D.I. Spitchenko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia

B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> SPC “UralTermoKompleks” Ltd., Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The present article demonstrates the results of experimental and calculated researches of the rapid (gradient) heating of the working layer of the cold working roll barrel in the unit, consisting of a chamber furnace with special design and a spraying unit, located under the furnace in special pit and able to move up for rapid cooling of the working roll layer. In the process of the roll heating its barrel and some parts of the necks are located within the working chamber area while the other (external) parts of the necks are situated outside the heating chamber and rest upon the drive rollers, which are designed to ensure rotation of the roll barrel in the course of its heating and subsequent cooling. Therefore, it is necessary to ensure hardening only of the working roll layer that is why the neck parts located inside the furnace are equipped with special heat-insulated inserts to prevent their hardening. The experimental rolls are equipped with the thermocouples to measure temperature both in different points of their surface and in the depth of their barrel and necks with the aim to develop the various roll heat treatment conditions. A process of heat treatment included rigid requirements concerning smoothness of the roll barrel surface heating at very close limits for under-heating zones in the extreme sections near surface end faces. Besides, it was necessary to ensure low temperature of the necks located within the working furnace area. The experimental researches of the temperature fields under different conditions of the rapid roll heating allowed us to reach a high speed of the roll heating and cooling and, respectively, the required structure of the working roll barrel layer. At the same time, in the process of the experimental researches and calculations of the temperature fields according to the specially developed program, the authors have revealed intensive heat leak via external open neck parts under the existing conditions of heating gas input and output and roll location with the necks being, par-

tially, beyond the heating chamber. The above-mentioned researches allowed revealing also a sufficient (as compared with the admissible one) non-uniformity of the temperature field of the barrel surface in the end zones of the roll being heated. It was also determined in the course of the experimental researches that change of the external heat exchange conditions between the working furnace area and roll surface does not eliminate non-uniformity of the temperature field in the end surface sections. A method of sufficient non-uniformity decrease of heating of the end roll barrel sections has been offered and executed calculations and analysis of the temperature fields have confirmed the reality of its application.

**Keywords:** cold rolling mill, working layer, high-speed heating, chamber furnace, spraying unit, temperature pattern, experimental and numerical study, nonuniform heating and its elimination.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-616-622

### REFERENCES

1. *Ustroistvo dlya termicheskoi obrabotki rabochikh valkov kholodnoi prokatki* [Device for heat treatment of cold working rolls]. Patent no. 160819 RU. *Byul.* 2016, no. 10. (In Russ.).
2. Maqnee A., Lecomte-Martens C., Gaspard C. Metallurgy of Induction Heat Treatment of Work Rolls. *Industrial Meeting. Belgium*, 1984, pp. 13–16.
3. Jenkins B.G., Models F.D. Modeling of heat transfer from a large enclosed flame in rotary kiln. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1981, vol. 59, no. 1, pp. 17–25.
4. Mukherjee S.G., Gosh B.B. Some aspects of heat transfer studies in rotary kiln. *Journal of the Institute of Engineering (India) Mech. Eng. Div.* 1977, vol. 57, no. 5, pp. 273–277.
5. Brimacombe J.K., Watkinson A.P. Heat transfer in direct-field rotary kiln: 1. Pilot plant and experimentation. *Metallurgical Transactions*. 1978, vol. 9B, no. 2, pp. 201–208.
6. Vokhmyakov A.M., Kazyaev M.D., Arseev B.N., Kazyaev D.M., Kiselev E.V. The research of convective heat exchange in conti-

- nuous furnace for heat treatment of carriage axles equipped with high speed burners. In: *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Teoriya i praktika nagrevatel'nykh pechei v XXI veke"* [All-Russia science-and-practical conference "Theory and practice of heating furnaces in XXI century"]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2010, pp. 65–73. (In Russ.).
7. Baptizanskii V.I. Ingots destruction from thermal stresses. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1951, no. 5, pp. 105–113. (In Russ.).
  8. Brusilovskii B.A., Shashko A.Ya. Scheme of generation of exfoliation on cold rolls surface. *Problemy prochnosti*. 2001, no. 2, pp. 116–122. (In Russ.).
  9. Scherello A., Konold U., Kremer H., Lorra M. Mathematical modeling of industrial furnaces. *5th European Conference on Industrial Furnace and Boiler, 2000*. Vol. II, pp. 582–587.
  10. Gosman A.D., Lockwood F.C. Incorporation of flux model for radiation into a finite-difference procedure for furnace calculations. *Proceedings of the 14th International Symposium of Combustion, USA, 1972*. pp. 661–671.
  11. Khalil E.E. Mathematical modeling of radiative heat transfer in axisymmetric furnaces. *AIAA Paper*. 1979, no. 99, p. 9.
  12. Johnson T.R., Lowes T.M., Becr J.M. Comparison of calculated temperatures and heat flux with measurements in furnace. *Journal of the Institute on Fuel*. 1974, vol. 47, no. 3, pp. 39–51.
  13. Gedeon M.V., Sobol' G.P., Paisov I.V. *Termicheskaya obrabotka valkov kholodnoi prokatki* [Heat treatment of cold rolls]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 344 p. (In Russ.).
  14. *Otraslevoi standart. Valki stal'nye kovanye dlya kholodnoi prokatki metallov. Tekhnicheskie usloviya. OST 24.013.20 – 90* [Industry standard. Forged steel rolls for cold rolling of metals. Technical specifications. OST 24.013/20-90]. (In Russ.).
  15. Samoilovich Yu.A. Theoretical basics of calculating of temperatures, thermoviscoelastic strains and deformations in cylinder-shaped parts. *Izvestiya vuzov. Energetika*. 2002, no. 3, pp. 48–56 (In Russ.).
  16. Telegin A.S., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassoperenos* [Heat and mass transfer]. 2nd ed. Moscow: Akademkniga, 2002, 456 p. (In Russ.).
  17. Budrin D.V. Calculation of radiant heat transfer. In: *Sb. Teploobmen i voprosy ekonomii topliva v metallurgicheskikh pechakh* [Coll. Heat transfer and questions of fuel economy in metallurgical furnaces]. Sverdlovsk, Izd-vo UPI. 1951, pp. 13–37. (In Russ.).
  18. Zobnin B.F., Kazyaev M.D., Kitaev B.I. etc. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei* [Thermal calculations of metallurgical furnaces]. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p. (In Russ.).
  19. Nemzer G.G., Aronov M.A. Investigation of thermo-physical properties of steel. *Kuznechno-shtampovnochnoe proizvodstvo*. 1980, no. 3, pp. 26–30. (In Russ.).
  20. Neimark B.E. *Fizicheskie svoystva stalei i splavov, primenyaemykh v energetike. Spravochnik* [Physical properties of steel and alloys applied in energetics. Reference book]. Moscow - Leningrad: Energiya, 1967, 240 p. (In Russ.).
  21. Filipov M.A., Baraz V.R., Gervas'ev M.A., Rozenbaum M.M. *Metodologiya vybora metallicheskih splavov i uprochnyayushchikh tekhnologii v mashinostroenii. Tom I. Stali i chuguny* [Methodology of selection of metallic alloys and hardening technology in engineering. Vol. 1. Steel and cast iron]. Ekaterinburg: Izd. Ural'skogo universiteta, 2013, 228 p. (In Russ.).
  22. Minkov A.N. Hardening of large products with regulated intensity of cooling. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2013, no. 3, pp. 88–91. (In Russ.).
  23. Pyshmintsev I.Yu., Eismondt Yu.G., Yudin Yu.V., Shaburov D.V., Zakharov V.B. Hardening of large forgings in water-air mixture. *Metal Science and Heat Treatment*. 2003, vol. 45, no. 3-4, pp. 103–108.
  24. Boley Bruno A., Weiner Jerome H. *Theory of Thermal Stresses*. New York: John Wiley & Sons, 1960. (Russ.ed.: Boley B., Weiner J. *Teoriya temperaturnykh napryazhenii*. Moscow: Mir, 1964, 517 p.).

#### Information about the authors:

**M.D. Kazyaev**, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"

**Yu.A. Samoilovich** Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher  
(platan09@yandex.ru)

**D.M. Kazyaev**, Commercial Director

**A.M. Vokhmyakov**, Cand. Sci. (Eng.), of industrial engineering department (botia@mail.ru)

**D.I. Spitchenko**, Postgraduate, Assistant of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (Danila.Spitchenko@gmail.com)

Received April 12, 2017

УДК 669.162

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИАДЫ ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ, КИСЛОРОДНЫЙ КОНВЕРТЕР, ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА

*Лисиенко В.Г., д.т.н., профессор кафедры информационных технологий  
и автоматики (V.G.Lisienko@urfu.ru)*

*Чесноков Ю.Н., к.т.н., доцент кафедры информационных технологий  
и автоматики (j.n.chesnokov@urfu.ru)*

*Лантева А.В., ст. преподаватель кафедры автоматики (A.V.Lapteva@urfu.ru)*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620078, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 32)

**Аннотация.** Углеродный след – масса углерода, образованная в полном цикле производства того или иного продукта. Этот углерод входит в состав парниковых газов. При производстве чугуна и стали образуются оксид углерода, парниковые газы: метан, диоксид углерода. Метан и оксид углерода сгорают до диоксида углерода при реализации вторичных энергетических ресурсов. Таким образом, углеродный след при производстве чугуна и стали определяется массой диоксида углерода, образованного в этом производстве. В результате анализа процессов производства чугуна и стали выявлено, что тандем доменной печи с электродуговой печью характеризуется меньшим значением интегральной сквозной эмиссии  $\text{CO}_2$ , чем тандем доменной печи с кислородным конвертером. Предложено перерабатывать чугун, производимый одной доменной печью, одновременно в кислородном конвертере и одной или нескольких электродуговых печах. При этом в электродуговую печь загружается 30 % чугуна от произведенного его объема доменной печью, а остальные 70 % дополняются металлически ломом. В кислородный конвертер загружается часть чугуна (75 – 85 %), который остался после загрузки электродуговой печи. Для полной загрузки конвертера применяется металлический лом. Проведены расчеты сквозной эмиссии диоксида углерода для различных триад таких агрегатов. Из этих расчетов следует, что одновременное применение кислородных конвертеров с электродуговыми печами для выплавки чугуна, полученного от одной доменной печи, позволяет уверенно снизить эмиссию диоксида углерода до 20 %. Это свидетельствует о том, что такая триада применяемых агрегатов соответствует зеленым технологиям. Примером использования отмеченной триады является Магнитогорский металлургический комбинат, на котором, наряду с кислородным конвертером, применяются электродуговые печи для выплавки стали с использованием производимой на предприятии электроэнергии сжиганием топливных вторичных энергетических ресурсов, получаемых от агрегатов, в которых сгорает топливо. Такая практика может быть рекомендована для целого ряда других металлургических предприятий.

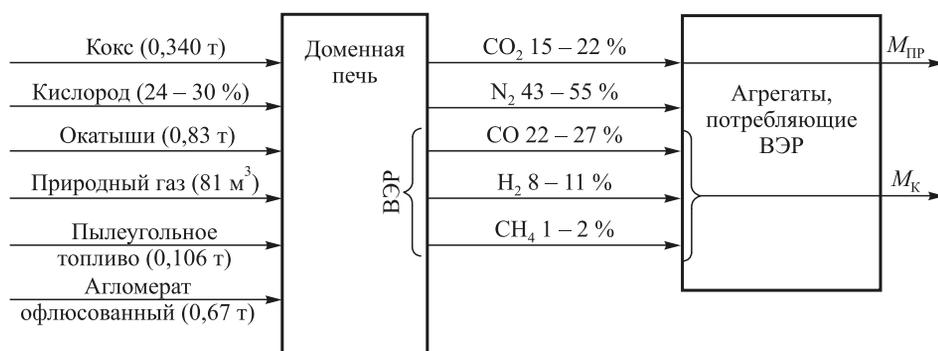
**Ключевые слова:** эмиссия диоксида углерода, углеродный след, чугун, сталь, доменная печь, кислородный конвертер, электродуговая печь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-623-628

Широко известно понятие углеродного следа – массы парниковых газов, выделяющихся при производстве той или иной продукции [1 – 6]. В отраслевых и федеральных документах поставлена задача уменьшения выбросов парниковых газов в черной металлургии. В агрегатах черной металлургии образуется два вида парниковых газов: диоксид углерода и метан. Кроме того, в отходящих газах этих агрегатов содержится значительное количество оксида углерода (рис. 1). Метан и оксид углерода являются топливными вторичными энергетическими ресурсами (ВЭР), которые сгорают в других агрегатах или в свече, образуя диоксид углерода. На этом основании будем считать, что единственный парниковый газ, образующийся в агрегатах черной металлургии – диоксид углерода. Нештатными выбросами можно пренебречь, например, оксидом углерода при выпуске чугуна из доменной печи, который уходит в атмосферу в неизменном виде.

Известные методики определения эмиссии диоксида углерода в металлургии ориентированы на определение этой эмиссии для каждого агрегата. Требуется оценка, сколько и в каких соотношениях сгорают в этих агрегатах различные виды углеродосодержащего топлива [7 – 11]. Данное обстоятельство затрудняет определение углеродного следа. В представленной работе предложена иная методика определения эмиссий диоксида углерода агрегатами черной металлургии [12 – 13].

Каждый агрегат, образующий вторичные энергетические ресурсы, характеризуется прямой и косвенной эмиссией диоксида углерода. Прямая эмиссия  $M_{\text{пр}}$  определяется массой диоксида углерода, выделяющегося в этом агрегате. Эта эмиссия зависит от режима работы агрегата и может колебаться в широких пределах. Косвенная эмиссия диоксида углерода  $M_{\text{к}}$  соответствует сжиганию оксида углерода и метана, выработанными этим агрегатом.



Образование прямой и косвенной эмиссии CO<sub>2</sub> при работе доменной печи

Formation of direct and indirect CO<sub>2</sub> emissions at work of BF

Введено понятие интегральной эмиссии агрегата или процесса, как суммы прямой и косвенной эмиссии:

$$M_{\Pi} = M_{\text{пр}} + M_{\text{к}}. \quad (1)$$

Таким образом, всю эмиссию CO<sub>2</sub> относим к агрегату, генерирующему ВЭР. При этом образование эмиссии CO<sub>2</sub> агрегатами, потребляющими ВЭР (нагревательные печи, коксовые батареи, доменные воздухонагреватели и другие агрегаты), исключается из рассмотрения с целью предотвращения двойного счета. Таким образом, из представлений о прямой и косвенной эмиссии формируется математическая модель образования эмиссий CO<sub>2</sub> агрегатами, связанными с топливными ВЭР.

Такой подход повышает точность оценки эмиссии CO<sub>2</sub> процесса и упрощает методику сравнения различных процессов по эмиссии диоксида углерода, в том числе тех, для которых нет данных по объемам и составу углеродосодержащих выбросов, но есть данные по расходам топлива.

Таким образом, массу CO<sub>2</sub>, образующегося в доменном, коксохимическом, электродуговом процессах будем определять с учетом дожигания СО по суммарной массе углерода, содержащегося в исходном топливе. В кислородно-конвертерном процессе с дожиганием масса CO<sub>2</sub> будет пропорциональна массе окислившегося углерода из шихты. При таком подходе эмиссия CO<sub>2</sub> процесса определяется с достаточной точностью массой сгоревшего углерода в этом агрегате.

Эмиссия CO<sub>2</sub> агломерационного процесса может быть определена при следующих исходных данных: в качестве топлива шихты используется 64 кг коксика ( $C_p = 83\%$ ), для горна – природный газ ( $C_p = 73,4\%$ ) с расходом 3,0 м<sup>3</sup>/т офлюсованного агломерата. Образование CO<sub>2</sub> при сжигании в горне других видов топлива – коксового или доменного газа, учитывается при анализе коксохимического или доменного производства. Для получения офлюсованного агломерата в шихту добавляется 268 кг известняка, что приводит к выделению 118 кг CO<sub>2</sub>.

Понятие углеродного следа в черной металлургии сведем к понятию интегральной сквозной эмиссии диоксида углерода  $M_C$ , которая является суммой эмиссий CO<sub>2</sub>, последовательно возникающих во всех процессах технологической цепи, начиная с добычи сырья и кончая тем продуктом, для которого эта эмиссия определяется. Кроме интегральной эмиссии CO<sub>2</sub> процесса  $M_{\Pi}$ , будем рассматривать транзитную эмиссию  $M_T$ , обусловленную долей от суммарной массы эмиссии CO<sub>2</sub>, образованного в предыдущих процессах, которая перешла на анализируемый процесс. Сквозная интегральная эмиссия CO<sub>2</sub>  $M_C$  удовлетворяет соотношению

$$M_C = M_{\Pi} + M_T. \quad (2)$$

Слово «интегральная» будем опускать, однако все эмиссии CO<sub>2</sub>, рассматриваемые далее, являются интегральными. Кроме того, словом «эмиссия» будет обозначаться эмиссия CO<sub>2</sub>.

Для определения сквозной эмиссии CO<sub>2</sub> для продукта удобно использовать модели в виде сигнальных графов – графы эмиссий CO<sub>2</sub>. Пример графа эмиссий CO<sub>2</sub> производства конвертерной стали был представлен в работе [14].

В вершинах графа указаны в скобках эмиссии процесса и через черту – сквозные эмиссии. Эти эмиссии – аналоги сигналов. На дугах графа проставлены величины, равные удельным массовым расходам соответствующего ресурса. Сквозная эмиссия процесса определяется сложением эмиссии процесса и транзитной эмиссии, равной сумме произведений сквозных эмиссий предыдущих процессов на расходы, указанные на дугах графа.

В работе [15] были представлены значения эмиссий диоксида углерода в различных сочетаниях металлургических переделов производства стали. В табл. 1 приведены уточненные значения сквозных эмиссий CO<sub>2</sub> конкретно для сочетаний процессов доменная печь (ДП) с кислородным конвертером (КК) и доменная печь с электродуговой печью (ЭДП) при различных значениях процента чугуна в металлической шихте.

Таблица 1

**Значения сквозных эмиссий для тандемов процессов ДП с КК и ДП с ЭДП**

*Table 1. Values of through emissions for tandems of processes of BF with OC and BF with EAF*

Передел	Сквозная эмиссия CO <sub>2</sub> , кг/т продукции
ДП + ЭДП с 30 % чугуна в шихте	1 401
ДП + КК с 75 % чугуна в шихте	2 048
ДП + КК с 80 % чугуна в шихте	2 166
ДП + КК с 85 % чугуна в шихте	2 286

Тандем доменной печи с электродуговой печью характеризуется сквозной эмиссией (углеродным следом) CO<sub>2</sub>, равной 1401 кг/т стали, а доменной печи с кислородным конвертером – 2166 кг/т стали. Заменить кислородные конвертеры электродуговыми печами невозможно. Проблема заключается в том, что для переработки всего чугуна, выпущенного доменной печью за сутки, одной электродуговой печи будет недостаточно.

Для решения этой задачи рассмотрены производительности различных сочетаний доменной печи, кислородного конвертера и электродуговых печей в сравнении с производительностями доменных печей различного объема. Выбраны следующие значения суточной производительности доменных печей P<sub>ДП</sub>:

- 4800 т/сут (Магнитогорский металлургический комбинат, ДП № 10);
- 7400 т/сут (Нижнетагильский металлургический комбинат, ДП № 5);
- 8100 т/сут (Новолипецкий металлургический комбинат, ДП № 6);
- 10 800 т/сут (Череповецкий металлургический комбинат, ДП № 5) [16].

Рассматриваемые электродуговые печи и их параметры приведены в табл. 2 [17 – 22], в которой суточная производительность электродуговых печей P<sub>ЭДП</sub> определяется ориентировочно как

Таблица 2

**Параметры выбранных для анализа электродуговых печей**

*Table 2. Parameters of the electric arc furnaces chosen for the analysis*

V <sub>ЭДП</sub> , т	T <sub>ЭДП</sub> , мин	P <sub>ЭДП</sub> , т/сут	Сквозная эмиссия CO <sub>2</sub> , т/сут
100	50	2 880	4 032
150	50	4 320	6 048

$$P_{\text{ЭДП}} = \frac{V_{\text{ЭДП}} \cdot 24 \cdot 60}{T_{\text{ЭДП}}}, \text{ т/сут}, \quad (3)$$

где V<sub>ЭДП</sub> – емкость электродуговой печи, т; 24·60 – число минут в сутках, T<sub>ЭДП</sub> – период плавки в электродуговой печи (принято 50 мин).

Все расчеты носят оценочный характер, т. е. не учитываются простои, угар железа и другие факторы.

В табл. 3 приведены данные о времени плавки T<sub>КК</sub> и производительности P<sub>КК</sub> кислородных конвертеров различной емкости и соответствующие сквозные эмиссии CO<sub>2</sub> кислородных конвертеров, выбранных для анализа.

Суточная производительность кислородного конвертера P<sub>КК</sub> определялась ориентировочно по соотношению

$$P_{\text{КК}} = \frac{V_{\text{КК}} \cdot 24 \cdot 60}{T_{\text{КК}}}, \quad (4)$$

где V<sub>КК</sub> – емкость кислородного конвертера, т; 24·60 – число минут в сутках, T<sub>КК</sub> – период плавки в кислородном конвертере, мин.

Дальнейшие расчеты (табл. 4) основаны на следующих условиях работы кислородного конвертера.

В электродуговую печь загружается 30 % (от массы металлической части шихты) чугуна, т. е.

$$m_{\text{чЭДП}} = 0,3 \cdot P_{\text{ЭДП}}. \quad (5)$$

Остальные 70 % дополняются металлически ломом.

В кислородный конвертер загружается часть чугуна (75 – 85 %), который остался после загрузки электродуговой печи, т. е.

$$m_{\text{чКК}} = P_{\text{ДП}} - N_{\text{ЭДП}} \cdot m_{\text{чЭДП}}, \quad (6)$$

где N<sub>ЭДП</sub> – число электродуговых печей. До полной емкости кислородного конвертера загружается металлический лом.

Удельное значение углеродного следа CO<sub>2</sub> тандема ДП + ЭДП равно 1,4 т CO<sub>2</sub>/т стали. Следовательно

Таблица 3

**Данные о времени плавки, суточной производительности и сквозной эмиссии CO<sub>2</sub> кислородных конвертеров**

*Table 3. Data on time of smelting, daily productivity and through emission of CO<sub>2</sub> of oxygen converters*

V <sub>КК</sub> , т	T <sub>КК</sub> , мин	P <sub>КК</sub> , т/сут	Сквозная эмиссия CO <sub>2</sub> , т/сут
160	45	5 120	11 090
200	45	7 400	13 862
300	45	9 600	20 794
400	45	12 800	27 725

Результаты расчетов сочетания ДП, ЭДП и КК

Table 4. Calculation results of combination of BF, EAF and OC

Емкость КК, т	ДП, т/сут	Сталь, т/сут	Чугун ЭДП, т/сут	Чугун КК, т/сут	Сквозная эмиссия CO <sub>2</sub> ЭДП, т/сут	Сквозная эмиссия CO <sub>2</sub> КК, т/сут	Сквозная эмиссия CO <sub>2</sub> , т/сут	Сквозная эмиссия/Ст	Снижение сквозной эмиссии, %
Одна ЭДП 100									
200	7 400	12 160	1 728	5 672	8 064	15 177	23 241	1,91	11,77
300	8 100	12 480	864	7 236	4 032	19 739	23 771	1,90	12,07
400	10 800	15 680	864	9 936	4 032	27 004	31 036	1,98	8,63
Две ЭДП 100									
200	7 400	12 160	1 728	5 672	8 064	15 177	23 241	1,91	11,77
400	10 800	18 560	1 728	9 072	8 064	24 948	33 012	1,78	17,89
Три ЭДП 100									
200	7 400	15 040	2 592	4 808	12 096	13 121	25 217	1,68	22,60
200	8 100	15 040	2 592	5 508	12 096	14 787	26 883	1,79	17,48
300	10 800	18 240	2 592	8 208	12 096	22 052	34 148	1,87	13,57
Четыре ЭДП 100									
160	7 400	16 640	3 456	3 944	16 128	10 729	26 857	1,61	25,49
200	8 100	17 920	3 456	4 644	16 128	12 731	28 859	1,61	25,66
300	10 800	21 120	3 456	7 344	16 128	19 996	36 124	1,71	21,04
Одна ЭДП 150									
300	8 100	13 920	1 296	6 804	6 048	18 711	24 759	1,78	17,89
400	10 800	17 120	1 296	9 504	6 048	25 976	32 024	1,87	13,65
Две ЭДП 150									
200	7 400	15 040	2 592	4 808	12 096	13 121	25 217	1,68	22,60
200	8 100	15 040	2 592	5 508	12 096	14 787	26 883	1,79	17,48
300	10 800	18 240	2 592	8 208	12 096	22 052	34 148	1,87	13,57
Три ЭДП 150									
160	8 100	18 080	3 888	4 212	18 144	11 367	29 511	1,63	24,65
300	10 800	22 560	3 888	6 912	18 144	18 968	37 112	1,65	24,06
Четыре ЭДП 150									
200	10 800	23 680	5 184	5 616	24 192	15 044	39 236	1,66	23,51

$$CЭ_{ЭДП} = 1,4 m_{стЭДП} \quad (7)$$

Удельное значение сквозной эмиссии CO<sub>2</sub> тандема ДП + КК при 80 % чугуна равно 2,166 т CO<sub>2</sub>/т стали. Удельное значение сквозной эмиссии CO<sub>2</sub> тандема ДП + КК при 75 % чугуна равно 2,048 т CO<sub>2</sub>/т стали. Удельное значение сквозной эмиссии CO<sub>2</sub> тандема ДП + КК при 85 % чугуна равно 2,286 т CO<sub>2</sub>/т стали. На 1 % чугуна в шихте кислородного конвертера добавляется

$$\frac{2,286 - 2,048}{10} \approx 0,0238 \text{ т CO}_2/\text{т стали.}$$

При любом содержании чугуна в шихте в пределах 75 – 85 % удельное значение сквозной эмиссии CO<sub>2</sub>

$$m_{CO_2} = 2,166 - \left( 80 - \frac{m_{чКК}}{V_{КК}} \right) \cdot 0,0238. \quad (8)$$

Следовательно при условии, что за базовый уровень приняты 80 % чугуна в шихте, сквозная эмиссия CO<sub>2</sub> кислородного конвертера составит

$$CЭ_{КК} = \left[ 2,166 - \left( 80 - \frac{m_{чКК}}{V_{КК}} \right) \cdot 0,0238 \right] m_{стКК},$$

т CO<sub>2</sub>/т стали.

Суммарная сквозная эмиссия СЭ на 1 т стали

$$CЭ = CЭ_{ЭДП} + CЭ_{КК}. \quad (9)$$

Отношения значений сквозных эмиссий комплекса ДП + КК + ЭДП к суммарному значению полученной стали  $C_T = P_{ЭДП} + P_{КК}$

$$\beta = \frac{CЭ}{C_T} \quad (10)$$

является значением удельной сквозной эмиссии  $\text{CO}_2$  комплекса ДП + КК + ЭДП.

Это отношение сравнивается со значением 2,166 – сквозной эмиссией  $\text{CO}_2$  кислородного конвертера при 80 % чугуна в кислородном конвертере с целью определения снижения сквозной эмиссии по отношению к тандему ДП + КК.

Использование электродуговой печи емкостью 150 т приводит к улучшению этих параметров. Таким образом, применение комплексов ДП + КК + ЭДП целесообразно для уменьшения сквозной эмиссии  $\text{CO}_2$ . В случае подогрева загружаемого металлического лома, в кислородном конвертере долю чугуна в шихте можно уменьшить до 70 %, что позволит снизить сквозную эмиссию  $\text{CO}_2$  на 20 % при двух электродуговых печах.

**Выводы.** Одновременное применение кислородных конвертеров с электродуговыми печами позволяет снизить эмиссию диоксида углерода до 20 %. Это свидетельствует о том, что такая триада применяемых агрегатов соответствует зеленым технологиям.

Примером использования отмеченной триады является Магнитогорский металлургический комбинат, на котором, наряду с кислородным конвертером, применяются электродуговые печи с использованием производимой на предприятии электроэнергии. Такая практика может быть рекомендована для целого ряда других металлургических предприятий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киотский протокол. «Новая газета». № 72 от 8 июля 2009 г.
2. Выступления В. Путина на полях Всемирной конференции ООН по климату, прошедшей в Париже 30 ноября 2015 г. <http://www.vsesovetnik.ru/archives/8732>.
3. ГОСТ Р ИСО 14064-1-2007. Газы парниковые. Ч. 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и удалении парниковых газов на уровне организации. – М.: Стандартинформ, 2010. – 23 с.
4. Миллер Т. Жизнь в окружающей среде: Учебник для вузов. Т. 2: Пер. с англ. / Под ред. Г. А. Ягодина. – М.: Издательская группа «Прогресс-Пангея», 1980. – 256 с.
5. Миллер Т. Жизнь в окружающей среде: Учебник для вузов. Т. 3: Пер. с англ. / под ред. Г. А. Ягодина. – М.: Издательская группа «Прогресс-Пангея», 1993. – 400 с.
6. Удальцов А. Поезд надежды: экологические меридианы и параллели: Учеб. пособие для вузов. – М.: Политиздат, 1984. – 254 с.
7. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов: Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов (МГЭИК, 2006 г.) / Под ред. Х.С. Иглестон, Л. Буэндия, К. Мива и др. – Япония: ИГЕС, 2007.
8. Потапочкин А.Н., Симонян Л.М., Черноусов П.И., Косырев К.Л. Потребление углерода и выбросы  $\text{CO}_2$  в черной металлургии: варианты оценки // Сталь. 2004. № 9. С. 69 – 72.
9. Шевелев Л.Н. Методические основы инвентаризации парниковых газов в черной металлургии России // Сталь. 2007. № 4. С. 97 – 102.
10. Шевелев Л.Н. Оценка выбросов парниковых газов в черной металлургии России // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2008. Вып. 8 (1304). С. 3 – 8.
11. Каленский И.В. Рекомендации по учету выбросов  $\text{CO}_2$  на предприятиях черной металлургии // Сталь. 2007. № 5. С. 121 – 129.
12. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Математические модели косвенных оценок эмиссии  $\text{CO}_2$  в некоторых металлургических процессах // Сталь. 2011. № 8. С. 74 – 77.
13. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Оценка углеродного следа при выплавке стали в электродуговой печи // Металлург. 2013. № 9. С. 34 – 37.
14. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Разработка графов эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями // Металлург. 2012. № 12. С. 23 – 26.
15. Лисиенко В.Г., Лаптева А.В., Чесноков Ю.Н., Луговкин В.В. Сравнительная эмиссия парникового газа  $\text{CO}_2$  в пределах черной металлургии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 9. С. 625 – 629.
16. Гилева Л.Ю., Загайнов С.А. Балансовые методы расчета процессов получения чугуна: Учеб. пособие для вузов. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 77 с.
17. Проектирование и оборудование сталеплавильных цехов / В.М. Обухов, В.М. Шариков, Ю.А. Дерябин и др. – Екатеринбург, 2010. – 410 с.
18. Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. Печи черной металлургии: Учеб. пособие для вузов. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 154 с.
19. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа: Учебник для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
20. Процесс Ромелт: Учебник для вузов / В.А. Роменец, В.С. Валавин, А.Б. Усачев и др. / Под ред. В.А. Роменца. – М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и металлы», 2005. – 400 с.
21. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушева А.М. Общая металлургия: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1998. – 768 с.
22. Загайнов С.А., Тлеугабулов С.М., Михалев В.А., Кушнарев А.В. Пылеугольное топливо может успешно применяться в доменной плавке титаномagnetитов // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 3. С. 42 – 46.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 8, pp. 623–628.

## THE USE OF TRIAD OF BLAST FURNACE, OXYGEN CONVERTER AND ELECTRIC ARC FURNACE FOR CARBON FOOTPRINT REDUCTION

*V.G. Lisienko, Yu.N. Chesnokov, A.V. Lapteva*

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** Carbon footprint is the mass of carbon formed in the full cycle of production of one or another kind of product. This carbon is included in greenhouse gases. Carbon monoxide and greenhouse gases (methane and carbon dioxide) are generated at the production of iron

and steel. Methane and carbon monoxide burn up to carbon dioxide by the realization of secondary energy resources. Therefore, the carbon footprint at the production of iron and steel is determined by weight of formed carbon dioxide. As the results of analysis of the production processes of iron and steel it was revealed that the tandem of blast furnace with electric arc furnace is characterized by a lower value of integrated through emissions of  $\text{CO}_2$  than the tandem of blast furnace with an oxygen converter. It is proposed to process the cast iron, made by one blast furnace, at the same time in the oxygen converter and in

one or more electric arc furnaces. Moreover in the electric arc furnace is loaded 30 % of iron which are produced in blast furnace, and the remaining 70 % are complemented by metal scrap. In the oxygen converter the part of cast iron (75 – 85 %) is loaded, which are remained after loading in the arc furnace. The converter is applied by the metal scrap for full loading. Calculations of through emission of carbon dioxide for different triads of these units are made. The simultaneous use of oxygen converter with electric arc furnaces for cast iron smelting obtained from one blast furnace helps to reduce confidently the emission of carbon dioxide to 20 % as it follows from the calculations. This suggests that this triad of used units conforms to green technology. Example of the use of marked triad is for a full load of the converter is applied to metal scrap, the calculations through emissions of carbon dioxide for different triads of these units. From these calculations it follows that the simultaneous use of oxygen converters from electric arc furnaces for smelting iron, obtained from one blast furnace, it helps to reduce the emission of carbon dioxide to 20 %. This suggests that this triad used units conforms to green technology. An example of using the noted triad is the Magnitogorsk Iron and Steel Works, which, in addition to the oxygen converter, uses electric arc furnaces for smelting steel using electric power produced by the enterprise by burning fuel secondary energy resources from aggregates in which fuel is burnt. This practice can be recommended for a number of other metallurgical enterprises.

**Keywords:** emission of carbon dioxide, carbon footprint, cast iron, steel, blast furnace, oxygen converter, electric arc furnace.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-623-628

#### REFERENCES

1. *Kiotskii prokol* [Kyoto puncture]. *Novaya gazeta*, no. 72, July 8, 2009. (In Russ.).
2. *Vystupleniya Vladimira Putina na polyakh Vsemirnoi konferentsii OON po klimatu, proshedshei v Parizhe 30 noyabrya 2015 goda* [Vladimir Putin's performances on fields of the World conference of the UN on climate, Paris, November 30, 2015]. Available at URL: <http://www.vsesovetnik.ru/archives/8732>. (In Russ.).
3. *GOST R ISO 14064-1-2007. Gazy parnikovye. Ch. 1. Trebovaniya i rukovodstvo po kolichestvennomu opredeleniyu i otchetnosti o vybrosakh i udaleniі parnikovyykh gazov na urovne organizatsii* [GOST P ISO 14064-1-2007. Greenhouse gases. Part. 1. Requirements and the guide to quantitative definition and the reporting on emissions and removal of greenhouse gases at the level of the organization]. Moscow: Standartinform, 2010, 23 p. (In Russ.).
4. Miller G.Tyler. *Living in the Environment*. Belmont, Calif.: Wadsworth Publishing Company, 1979, 699 p. (Russ.ed.: Miller T. *Zhizn' v okruzhayushchei srede: ucheb. dlya vuzov. Vol. 2*. Yagodin G.A. ed. Moscow: Progress-Pangeya, 1980, 256 p.).
5. Miller G.Tyler. *Living in the Environment*. Belmont, Calif.: Wadsworth Publishing Company, 1979, 699 p. (Russ.ed.: Miller T. *Zhizn' v okruzhayushchei srede: ucheb. dlya vuzov. Vol. 3*. Yagodin G.A. ed. Moscow: Progress-Pangeya, 1993, 400 p.).
6. Udal'tsov A. *Poezd nadezhdy: ekologicheskie meridiany i paralleli: ucheb. posobie dlya vuzov* [Train of hope: ecological meridians and parallels: Manual for universities]. Moscow: Politizdat, 1984, 254 p. (In Russ.).
7. *IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, 2007.
8. Potapochkin A.N., Simonyan L.M., Chernousov P.I., Kosyrev K.L. Consumption of carbon and CO<sub>2</sub> emissions. *Stal'*. 2004, no. 9, pp. 69–72. (In Russ.).
9. Shevelev L.N. Methodical bases of inventory of greenhouse gases in ferrous metallurgy of Russia. *Stal'*. 2007, no. 4, pp. 97–102. (In Russ.).
10. Shevelev L.N. Assessment of emissions of greenhouse gases in ferrous metallurgy of Russia. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2008, no. 8 (1304), pp. 3–8. (In Russ.).
11. Kalenskii I.V. Recommendations about the accounting of CO<sub>2</sub> emissions at the enterprises of ferrous metallurgy. *Stal'*. 2007, no. 5, pp. 121–129. (In Russ.).
12. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Mathematical models of indirect estimates of CO<sub>2</sub> emission in some metallurgical processes. *Stal'*. 2011, no. 8, pp. 74–77. (In Russ.).
13. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Evaluating the carbon footprint from the production of steel in an electric-Arc furnace. *Metallurgist*. 2014, vol. 57, no. 9-10, pp. 774–778.
14. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Graph model for carbon dioxide emissions from metallurgical plants. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11-12, pp. 888–893.
15. Lisienko V.G., Lapteva A.V., Chesnokov Yu.N., Lugovkin V.V. Comparative emission of greenhouse gas CO<sub>2</sub> in the processing of ferrous metallurgy. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 9, pp. 625–629. (In Russ.).
16. Gileva L.Yu., Zagainov S.A. *Balansovye metody rascheta protsessov polucheniya chuguna: ucheb. posobie dlya vuzov* [Balance methods of calculation of processes of receiving cast iron: Manual for universities]. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 77 p. (In Russ.).
17. Obukhov V.M., Sharikov V.M., Deryabin Yu.A., Spirin V.A., Chernavin S.B. *Proektirovanie i oborudovanie staleplavil'nykh tsekhov: monografiya* [Design and equipment of steel-smelting shops: Monograph]. Ekaterinburg, 2010, 410 p. (In Russ.).
18. Svinolobov N.P., Brovkin V.L. *Pechi chernoi metallurgii: ucheb. posobie dlya vuzov* [Furnaces of ferrous metallurgy: Manual for universities]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2004, 154 p. (In Russ.).
19. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza: ucheb. dlya vuzov* [Metallurgy of iron: Textbook for universities]. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2007, 464 p. (In Russ.).
20. Romenets V.A., Valavin V.S., Usachev A.B. etc. *Protsess Romelt: ucheb. dlya vuzov* [Romelt process: Manual for universities]. Romenets V.A. ed. Moscow: MISiS, ID Ruda i metally, 2005, 400 p. (In Russ.).
21. Voskoboinikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya: ucheb. dlya vuzov* [General metallurgy: Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1998, 768 p. (In Russ.).
22. Zagainov S.A., Tleugabulov S.M., Mikhalev V.A., Kushnarev A.V. Coal-dust fuel can successfully be applied in blast-furnace melting of titanomagnetite. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 3, pp. 42–46. (In Russ.).

#### Information about the authors:

**V.G. Lisienko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Information Technologies and Automatics" (V.G.Lisienko@urfu.ru)

**Yu.N. Chesnokov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Information Technologies and Automatics" (J.N.Chesnokov@urfu.ru)

**A.V. Lapteva**, Senior Lecturer of the Chair of Automatics (A.V.Lapteva@urfu.ru)

Received April 12, 2017

УДК 669:536

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ОТОПЛЕНИИ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ ВАГРАНОЧНОГО ТИПА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА

*Матюхин В.И.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (matyhin53@mail.ru)*

*Ярошенко Ю.Г.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (yury-y@planet-a.ru)*

*Матюхина А.В.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Метрология, стандартизация  
и сертификация» (a.v.matiukhina@urfu.ru)*

*Дудко В.А.<sup>1</sup>, магистрант кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (Vya4090@yandex.ru)*

*Пуненков С.Е.<sup>2</sup>, главный технолог (ore-dressing@control.uralasbest.ru)*

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> ОАО «Ураласбест»  
(624261, Россия, Свердловская обл., Асбест, ул. Уральская, 66)

**Аннотация.** С целью сокращения расхода кокса в шахтной печи ваграночного типа с открытым или закрытым колошником дополнительно используется природный газ. Его сжигание с помощью горелочных устройств обычно осуществляется в выносных топках, установленных по периметру кожуха печи. В зависимости от конструкции, горелки обеспечивают частичное или полное предварительное перемешивание газа и воздуха при коэффициенте расхода воздуха 1,2 – 1,5. Далее продукты горения газа подаются непосредственно в слой шихты. При реализации этого способа расход кокса составляет 8 – 9 % к металлозавалке, а расход газообразного топлива 30 – 40 м<sup>3</sup>/т расплава. Для этих условий отмечено незначительное повышение температуры расплава (на 10 – 20 °С), рост производительности на 15 – 20 % при снижении объема газообразных вредных выбросов на 20 – 25 % (в основном СО). В работе вагранки наблюдаются периодические нарушения газодинамического режима с подвисанием слоя шихтовых материалов, похолодание получаемого расплава, увеличение химического недожога и ухудшение условий службы футеровочных материалов. При использовании слоевого способа сжигания газозвушной смеси ее подают в разогретый слой кусковых материалов с коэффициентом расхода воздуха не ниже 2,5 – 3,0 с формированием высокотемпературной зоны при температуре 1350 – 1380 °С, шириной 60 – 70 мм, способной перемещаться по слою со скоростью 15 – 20 мм/мин. Для его реализации в плотном продуваемом слое необходимо обеспечить равномерное перемешивание газа и воздуха, требуемые газодинамические условия и создание заданного соотношения «газ – воздух» при коэффициенте расхода воздуха более 2,5 – 3,0. При подаче холодной газозвушной смеси в слой шахтных печей через фурмы зона горения делит весь слой на две ступени: первоначальную и конечную. Высокий температурный уровень зоны горения обеспечивает значительную скорость охлаждения материалов на стадии зажигания газозвушной смеси, что предотвращает ее воспламенение в свободном надслоевом пространстве. Отсутствие прямого контакта зоны высоких температур с рабочим пространством агрегата повышает надежность и экономичность использования этого процесса (отсутствуют тепловые потери). Применение слоевого способа сжигания природного газа для отопления чугунолитейной вагранки обеспечивает повышение производительности плавильного агрегата с 10 до 13,6 т/ч или на 36 % при сокращении удельного расхода кокса на 80 кг/т или на 33,3 %, уменьшении общего расхода теплоты на процесс на 25 кВт или 18,78 % и потерь тепла с отходящими газами на 25,32 кВт или 16,2 %. При этом общий тепловой КПД агрегата увеличивается с 35,58 до 42,26 % или на 15,81 %.

**Ключевые слова:** шахтная печь, выносные топки, коксогозовое отопление, условия сжигания газозвушной смеси, зоны горения твердого и газообразного видов топлива, расход кокса, производительность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-629-636

Одним из наиболее распространенных агрегатов для получения жидкого расплава (чугуна, минерально-го расплава и др.) является вагранка с открытым или закрытым колошником. Ее работа отличается возможностью широкого и относительно простого регулирования производительности, универсальностью применяемого исходного сырья по химическому составу,

высоким тепловым КПД, простотой конструкции и легкостью управления процессом [1]. В коксовой вагранке, работающей в режиме противотока, выделение теплоты, необходимой для нагрева и плавления исходных материалов, а также протекания основных физико-химических процессов, происходит в верхней части холостой колоши (коксовой колоше) над фурмами [2].

Как показывает практика эксплуатации вагранок [3, 4], управление процессами в них осуществляется преимущественно на основании закономерностей процессов теплообмена и газодинамики. Чем лучше контакт газа и материалов между собой при их движении, тем эффективнее процесс теплопередачи между ними. Рациональные условия для этого могут быть достигнуты только в том случае, если каждая единица твердых компонентов в слое будет активно обрабатываться продуктами горения топлива. В этом и состоит одна из основных задач технологии нагрева шихты в вагранках.

В вагранках, работающих на коксе, цена этого топлива может достигать 70 % себестоимости производимой продукции. В условиях возрастающего дефицита металлургического кокса и его цены все большее значение приобретают технические разработки по частичной замене кокса более дешевыми газообразным и жидким видами топлива, а также создание эффективных способов их сжигания.

Одним из способов реализации теплового режима работы вагранки, ведущего к экономии дефицитного кокса, является способ, связанный с использованием в качестве дополнительного топлива природного газа. Подачу газо-воздушной смеси организуют через выносные топки 2 с горелочными устройствами 3 (рис. 1, а), установленными по периметру кожуха агрегата. В зависимости от конструкции, горелки обеспечивают частичное или полное предварительное смешение

газа и воздуха при коэффициенте расхода воздуха 1,2 – 1,5. Продукты горения газа и кислорода воздуха, не успевшего принять участие в горении газа, поступают непосредственно в слой кокса, обеспечивая его дополнительное сгорание. За счет улучшения горения твердого топлива выделяется дополнительная теплота, что сопровождается повышением температуры компонентов шихты. Повышенные температуры в вагранках с коксогозовым отоплением (рис. 1, б) занимают больший объем рабочего пространства печи в сравнении с чисто коксовым отоплением, что улучшает условия тепловой обработки компонентов шихты в области высоких температур.

В подобной организации работы вагранок есть и негативные особенности. Пониженная концентрация кислорода в составе продуктов горения природного газа [5, 6] и расширение протяженности зоны повышенных температур в слое открывают возможность [7, 8] для интенсификации восстановления диоксида углерода газа углеродом кокса с поглощением теплоты, увеличением удельного выхода газов и понижением их средней температуры. В продуктах горения появляется дополнительное количество CO и H<sub>2</sub>, что сокращает эффективность использования кокса. Чтобы не допустить поступления кислорода газо-воздушной смеси в слой шихты, длина выносных топок должна обеспечивать завершенность процесса факельного сжигания газообразного топлива и составлять не менее 1,0 – 1,5 м [9]. Выносные топки такой длины существенно усложняют

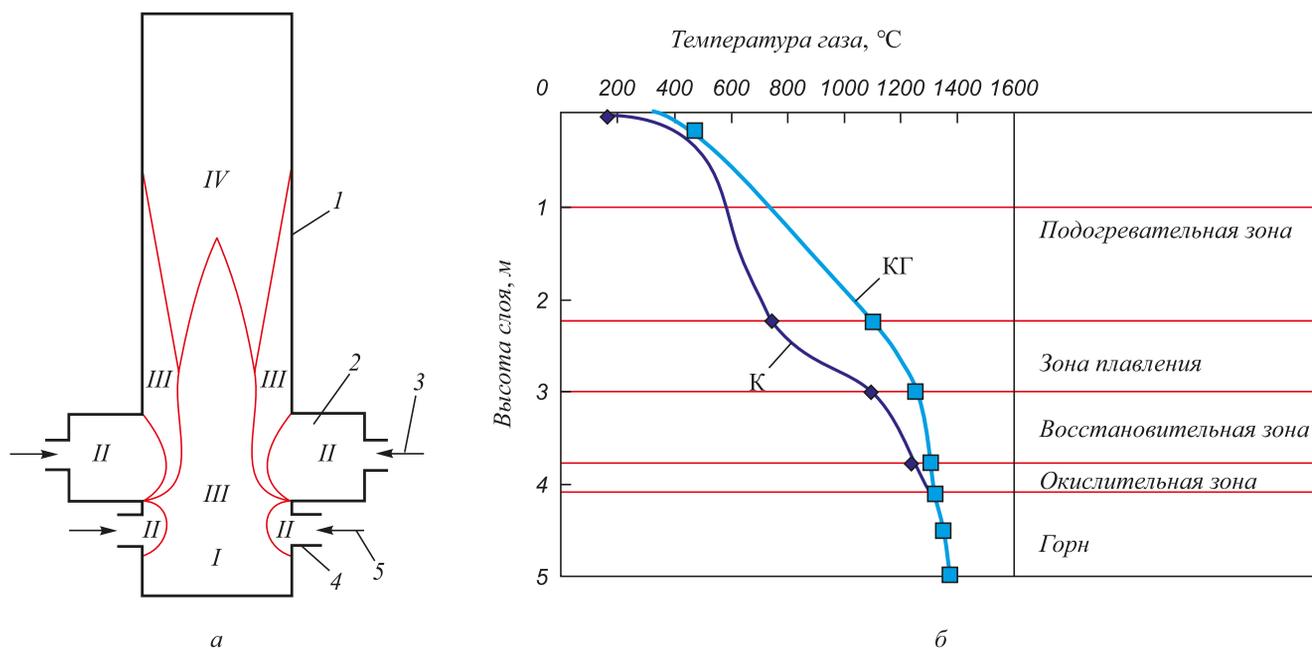


Рис. 1. Распределение тепловых зон (а) и температур газов (б) при коксовом (К) и коксо-газовом (КГ) отоплении шахтных печей: I – горн; II – окислительная зона; III – восстановительная зона; IV – подогревательная зона; 1 – шахта; 2 – выносная топка; 3 – подача газо-воздушной смеси; 4 – фурма; 5 – подача воздушного дутья

Fig. 1. Distribution of thermal zones (a) and gas temperatures (б) for coke (K) and coke-gas (KG) heating of shaft furnaces: I – well; II – oxidizing zone; III – reduction zone; IV – preheating zone; 1 – shaft; 2 – earth furnace; 3 – supply of gas-air mixture; 4 – tuyere; 5 – supply of air blowing

обслуживание горна во время выпуска металла и фурм в процессе работы вагранки.

В ряде случаев при коксогозовом отоплении шахтных печей с использованием выносных топок наблюдались нарушения газодинамического режима их работы, которые выражались в подвисании слоя, похолодании расплава, увеличении химического недожога, ухудшении условий работы футеровочных материалов. Ограниченная стойкость выносных топок при работе с повышенной температурой существенно сокращает срок их службы, увеличивая затраты на обслуживание плавильного агрегата.

Полная замена кокса газообразным топливом с использованием выносных топок связана в первую очередь с проблемами обеспечения равномерного контакта нагреваемых материалов с газом [5]. В противном случае не удается достичь эффективного нагрева и плавления шихты, а также перегрева получаемого расплава. В связи с этим общий расход теплоты в вагранках, использующих, например, природный газ, по сравнению с аналогичным показателем работы вагранки на коксовом отоплении возрастает примерно в 5 – 8 раз [10, 11]. Для обеспечения удовлетворительных технико-экономических и экологических показателей работы вагранок только на газообразном топливе ограничивают их производительность до уровня 1,5 – 2,0 т/ч.

Повышение эффективности использования газообразного топлива в вагранках может быть достигнуто при его сжигании непосредственно в плотном слое. В лабораторных и промышленных условиях работы слоевых установок было показано, что отличительной особенностью слоевого способа сжигания газообразного топлива является возможность его осуществления в плотном слое кусковых материалов практически любого химического состава с коэффициентом расхода воздуха как большим, так и меньшим единицы [12]. Правильное установление величины коэффициента расхода воздуха позволяет обеспечивать требуемые температурные условия тепловой обработки различных участков слоя. Поскольку процесс горения газа протекает внутри слоя, вне контакта с футеровкой агрегата, то при этом снижаются общие тепловые потери агрегата.

Механизм горения газообразного топлива достаточно полно описан в технической литературе [13, 14]. Поэтому следует остановиться лишь на тех особенностях реализации технологии выплавки чугуна в вагранке, которые возникают при сжигании природного газа непосредственно в слое шихты. Сжигание природного газа в плотном слое кускового материала должно обеспечить:

- сохранение температурно-временных условий для протекания окислительно-восстановительных и плавильных процессов непосредственно в слое шихты;
- выполнение технологических требований к качеству получаемого чугуна;

- снижение удельного расхода дорогостоящего кокса;
- снижение вредных выбросов парниковых газов в окружающую среду.

Промышленные испытания использования слоевого способа сжигания природного газа производили на чугунолитейной вагранке ОАО «Синарский трубный завод» со средней производительностью 10 т/ч. В период испытаний химический состав чугуна соответствовал содержанию, %: 2,57 Si; 0,53 Mn; 0,076 P; 0,047 S; 3,64 C; 0,068 Cr. В качестве основного топлива при ваграночной плавке использовали кокс марки КЛ-1 состава: 5 % влаги; 12,0 % золы; 0,6 % серы; 1,2 % летучих. Химический состав золы кокса представлен следующими компонентами, %: 53,0 SiO<sub>2</sub>; 29,0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 18,0 CaO, а состав его летучих, %: 35,0 CO<sub>2</sub>; 37,0 CO; 4,0 CH<sub>4</sub>; 6,0 H<sub>2</sub>; 18,0 N<sub>2</sub>. Природный газ включал следующие компоненты, %: 98,0 CH<sub>4</sub>; 0,1 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 0,3 CO<sub>2</sub> и 1,6 N<sub>2</sub>. В состав флюса – известняка, входили, %: 52,0 CaO; 1,75 SiO<sub>2</sub>; 1,0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,0 FeO; 0,2 FeS; 0,02 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. В качестве составляющих металлошихты были представлены отходы собственного производства, покупной чугунный лом, стальной ломом трубного производства, ферросилиций марки ФС45 и ферромарганец марки ФМн70.

Расход дутьевого холодного воздуха составлял около 10 000 – 10 500 м<sup>3</sup>/ч при содержании в нем влаги до 9 г/м<sup>3</sup>. Футеровка вагранки выполнялась из кислых огнеупоров (шамот), содержащих 60 % SiO<sub>2</sub>, 36 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 % CaO и 2 % MgO. При использовании природного газа для получения примерно одинакового состава чугуна для связывания кислых окисленных компонентов плавки повышали основность шихты с 0,69 до 0,74.

Подвод природного газа к вагранке осуществляли от отдельного газопровода через распределительный коллектор на газовое распределительное сопло, из которого природный газ поступал в поток воздушного дутья, направляемого для горения кокса (рис. 2). Регулирование расхода газа на каждую фурму осуществляли пробковым краном.

Режим слоевого сжигания природного газа характеризовался следующими показателями:

- расходом природного газа на одну фурму не более 25 – 30 м<sup>3</sup>/ч;
- расходом воздушного дутья на одну фурму до 1250 – 1300 м<sup>3</sup>/ч;
- средним коэффициентом расхода воздуха при подаче в зажженный слой кокса не ниже 5,0 – 6,0;
- общим расходом природного газа на вагранку не выше 200 – 250 м<sup>3</sup>/ч;
- общим расходом воздушного дутья не более 10 000 – 10 500 м<sup>3</sup>/ч;
- скоростью выхода газо-воздушной смеси из фурм в слой 35 – 50 м/с;
- давлением природного газа не ниже 0,3 атм.;
- давлением воздушного дутья не выше 0,22 атм.

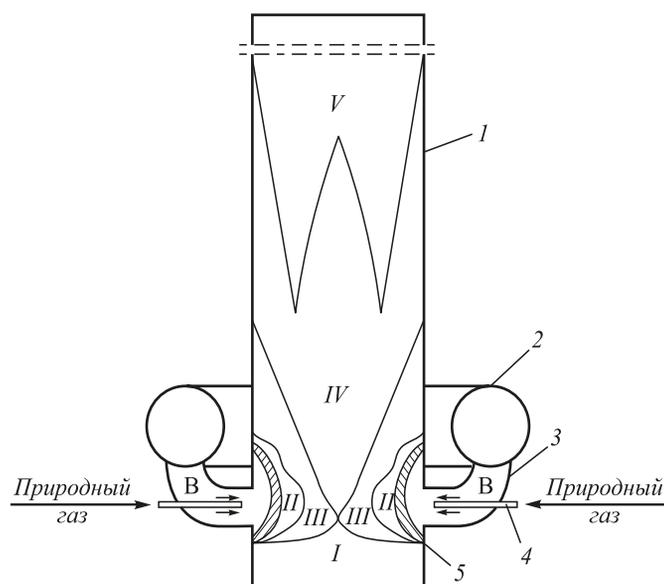


Рис. 2. Схема работы шахтной печи с использованием комбинированного топлива:  
 1 – шахта; 2 – воздушный распределительный коллектор; 3 – воздушная фурма; 4 – газовое сопло; 5 – зона горения газовой смеси; I – зона горна; II – зона горения кокса; III – окислительная зона горения кокса и природного газа; IV – восстановительная зона; V – подогревательная зона; В – воздушное дутье

Fig. 2. Operation scheme of shaft furnace with the use of combined fuel:  
 1 – shaft; 2 – air distribution manifold; 3 – air tuyere; 4 – gas nozzle; 5 – zone of combustion of the gas-air mixture; I – zone of the well; II – zone of coke burning; III – oxidizing zone of burning of coke and natural gas; IV – reduction zone; V – preheating zone; В – air blowing

Для поддержания заданных технологических параметров и обеспечения подачи добавок природного газа в зажженный слой кокса чугунолитейной вагранки были предусмотрены элементы автоматики, включающие контроль и регулирование расхода и давления воздушного дутья, природного газа.

Использование комбинированного топлива при ваграночной плавке чугуна требует организации совместного сжигания кокса и природного газа. Такая организация процессов сжигания двух различных видов топлива позволяет обеспечивать подачу дополнительной тепловой энергии непосредственно в зону получения расплава.

Процесс организации слоевого горения газовой смеси в плотном слое кусковых материалов можно представить как ряд последовательно проходящих стадий. Прежде всего, поток смеси газов, попадая в плотный слой шихты и сталкиваясь с твердыми кусками шихты, подвергается дополнительной турбулизации [15, 16], что улучшает перемешивание природного газа и воздуха. Одновременно с указанным явлением происходит нагрев холодной газовой смеси в опускающемся нагретом слое кусковых материалов. При этом существенного охлаждения шихты не происходит. Для устойчивого зажигания газовой смеси в плотном слое целесообразно при подаче ее в

разогретый слой поддерживать общий коэффициент расхода воздуха не ниже 2,5 – 3,0.

Горение в слое холодной газовой смеси с повышенными значениями коэффициента расхода воздуха может происходить только при обеспечении ее предварительного подогрева. Эти условия создаются при формировании холодной колоши, когда температура кусков кокса по всей ее высоте становится стабильной, а процесс горения кокса происходит в верхней части выше места установки воздушных фурм. В условиях стабильности процесса горения кокса холодная газозвушная смесь, проходя через горячий слой кокса холодной колоши, подогревается до температуры воспламенения и образует высокотемпературную зону горения природного газа с температурой до 1350 – 1380 °С непосредственно в слое протяженностью 60 – 70 мм. При повышенных значениях коэффициента расхода воздуха уровень предварительного подогрева газовой смеси для организации самостоятельного горения должен быть выше температуры воспламенения твердого топлива (700 – 800 °С) [17, 18] и составлять 850 – 1050 °С. Воздушное дутье, предназначенное для горения кокса, проходя через эту область горения природного газа подогревается до 250 – 300 °С.

В промышленных условиях зафиксированы результаты работы одной и той же вагранки, реализующей традиционный способ отопления на коксе и исследуемый способ отопления с использованием добавок природного газа. Сравнение показателей работы чугунолитейной вагранки в этих условиях представлено в табл. 1. Анализ показал, что применение слоевого способа сжигания природного газа для отопления чугунолитейной вагранки обеспечивает повышение производительности плавильного агрегата с 10 до 13,6 т/ч или на 36 %. При этом удельный расход кокса сократился на 80 кг/т или на 33,3 %.

Совмещение сжигания кокса и природного газа непосредственно в слое шихты с технологическим процессом нагрева и плавления материалов открывает возможность значительного улучшения управляемости качеством готовой продукции в результате тепловой обработки без существенных капитальных затрат.

Материальные балансы плавки, отражающие работу вагранки при отоплении ее только коксом (К) и с применением добавок природного газа (коксовое отопление – КГ), представлены в табл. 2. Сравнительный анализ этих данных показал, что при использовании слоевого способа сжигания природного газа в коксовой вагранке увеличивается удельный расход воздушного дутья на 3,7 % (отн.) при снижении общей массы материалов, участвующих в процессе на 3,01 % (отн.) в основном за счет снижения расхода кокса. Следует также отметить повышение выхода чугуна на 3,1 % (отн.) при сокращении выхода шлака на 9,87 % (отн.) и колошникового газа на 10,58 % (отн.). Образующаяся при этом невязка баланса связана с неравномерностью теп-

## Усредненные показатели работы чугунолитейной вагранки

Table 1. Average operational parameters of pig iron casting cupola

Показатель	Традиционный режим	Режим при слоевом способе сжигания природного газа
Производительность по чугуну, т/ч	10,0	13,6
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	240	160
Температура перегрева расплава, °С	1450	1440
Средний состав отходящих газов, %		
CO	12,05	8,9
CO <sub>2</sub>	18,80	13,61
SO <sub>2</sub>	0,10	0,08
N <sub>2</sub>	66,65	75,26
H <sub>2</sub> O	2,40	2,24
Коэффициент расхода воздуха, доли ед	0,63	1,05
Расход шихтовых материалов, кг/100 кг:		
отходы собственного производства	40	40
покупной чугун	40	40
стальной лом	20	20
ферромарганец	1,0	1,0
ферросилиций	5,4	5,4
известняк	3,88	3,576
Основность шлака, доли ед.	0,69	0,74

## Материальные балансы ваграночных плавов на 100 кг чугуна

Table 2. Material balances of cupola melts per 100 kg of pig iron

Статья прихода	Масса				Статья расхода	Масса			
	К		КГ при слоевом сжигании газа			К		КГ при слоевом сжигании газа	
	Кг	%	Кг	%		Кг	%	Кг	%
1. Металлическая шихта	100,00	38,68	100,00	39,88	1. Жидкий чугун	99,357	38,44	99,36	39,63
2. Кокс	24,0	9,28	16,00	6,38	2. Шлак	10,222	3,95	8,93	3,56
3. Природный газ	0	0	0,53	0,21	3. Колошниковый газ	168,61	65,23	146,25	58,33
3. Известняк	3,89	1,50	3,58	1,43	4. Невязка	-19,70	-7,62	-3,81	-1,52
4. Оплавленная футеровка (в шлак)	0,8	0,30	0,8	0,31					
5. Песок шихты	0,5	0,19	0,5	0,20					
6. Воздух дутья	129,32	50,05	129,32	51,90					
ИТОГО	258,51	100,00	250,73	100,0	ИТОГО	258,49	100,00	250,73	100,00

ловой работы вагранки в горизонтальном сечении ее рабочего пространства.

Тепловые балансы ваграночных плавов чугуна рассчитаны на основании данных материальных балансов. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Из анализа представленных данных следует, что общий расход тепловой энергии в ваграночном процессе при использовании слоевого способа сжигания природ-

ного газа сокращается с 133,12 до 108,12 кВт на каждые 100 кг полученного чугуна, т. е. на 18,78 %. Следствием этого результата является увеличение теплового КПД процесса выплавки чугуна с 35,58 до 42,26 % или на 15,81 %. При этом доля тепловой энергии, получаемой в результате горения кокса, сокращается с 92,16 до 88,05 %, т. е. на 4,46 % за счет более эффективного совместного сжигания твердого и газообразного топлива.

**Тепловые балансы ваграночной плавки на 100 кг чугуна**

*Table 3. Thermal balances of cupola melting per 100 kg of pig iron*

Статья прихода	Количество теплоты				Статья расхода	Количество теплоты			
	К		КГ при слоевом сжигании газа			К		КГ при слоевом сжигании газа	
	кВт	%	кВт	%		кВт	%	кВт	%
1. Теплота от сгорания кокса	122,69	92,16	95,20	88,05	1. Физическая теплота жидкого чугуна	36,65	27,53	36,64	33,88
2. Теплота от сгорания природного газа	0	0	7,35	6,80	2. Теплота расплавления и перегрева шлака	4,99	3,75	4,36	4,03
2. Окисление примесей чугуна, в т. ч.:	4,74	3,56	4,74	4,42	3. Теплота разложения известняка	4,37	3,28	4,02	3,72
железо	0,31	0,23	0,31	0,29					
кремний	3,96	2,97	3,96	3,66					
марганец	0,47	0,35	0,47	0,47					
3. Теплота шлакообразования	0,95	0,73	0,83	0,73	4. Теплота испарения влаги кокса	0,55	0,41	0,43	0,40
Всего	133,12	100,0	108,12	100,0	5. Теплота испарения влаги дутья	0,81	0,61	0,81	0,75
					6. Физическая теплота отходящих газов	32,91	24,72	19,59	18,12
					7. Химическая теплота ваграночных газов	46,14	34,66	34,21	31,64
					8. Потери теплоты в окружающую среду	6,14	4,61	6,14	5,68
					Невязка	0,56	0,43	1,92	1,78
					Всего:	133,12	100,0	108,12	100,00

По результатам плавки при переходе на использование совместного слоевого сжигания природного газа и кокса холостой колоши было отмечено увеличение доли физического теплосодержания чугуна с 27,53 до 36,64 % или на 33,09 %, доли физического теплосодержания шлака с 3,75 до 4,03 % или на 7,47 % (отн.).

Следует также отметить уменьшение доли физической теплоты отходящих газов с 24,72 до 18,12 % или на 26,7 % (отн.), а также химической теплоты ваграночных газов (химический недожог) с 34,66 до 31,64 % или на 8,71 %, что связано с более полным завершением процессов горения и тепломассообмена в слое.

Таким образом, использование природного газа при отоплении шахтных печей ваграночного типа позволяет существенно воздействовать на показатели их работы, улучшая процесс переплава исходных компонентов и обеспечивая более полное использование тепловой энергии. При этом удельный расход твердого топлива (кокса) снижается на 15 – 20 %. При сохранении удельного расхода кокса может быть повышена производительность вагранки на такую же величину.

Относительная простота реализации процесса сжигания газа в плотном слое открывает широкие воз-

можности его применения для интенсификации процессов тепломассообмена в шахтных печах ваграночного типа.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Матюхин В.И., Матюхина А.В. Расчет и проектирование ваграночного комплекса плавки чугуна. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 364 с.
2. Селянин И.Ф., Маркс Г.Л., Вальдман Л.М., Соколов Б.М. Экспериментальное исследование газообразования в слое кокса холостой колоши вагранки с расширенной зоной горения // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 10. С. 74 – 77.
3. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Я.М. Гордон, Б.А. Боковиков, В.С. Швыдкий и др. – М.: Металлургия, 1989. – 120 с.
4. Dong H., Cai J.-J., Wang G.-S., Yang J. Numerical simulation on gas flow affected by constructional parameters of pelletizing shaft furnaces // Dongbei Daxue Xuebao. Ziran Kexue Ban. J. Northeast. Univ. Natur. Sci. 2013. Vol. 34. No. 7. P. 980 – 984.
5. Чаплыгин Ю.В., Еринов А.Е. Использование природного газа при плавке чугуна. – Киев: Наукова думка, 1976. – 237 с.
6. Natsui S., Kon T., Ueda S. etc. Analysis of heat and mass transfer in a packed bed by considering particle arrangement. Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980-8577, Japan.

7. Фуклеев В.А. О работе коксгазовых вагранок // Литейное производство. 1964. № 8. С. 34 – 35.
8. Меркер Э.Э., Карпенко Г.А., Тынников И.М. Энергосбережение в промышленности и эксергетический анализ технологических процессов – Старый Оскол: ТНТ, 2010. – 316 с.
9. Часов Л.И., Протопопов Л.П. Обобщение некоторых данных о плавке чугуна на коксгазовых вагранках // ВНИИТИиЭПСМ: Сб. тр. 1971. Вып. 3. С. 346 – 349.
10. Светлов Ю.В. Интенсификация тепловых и гидродинамических процессов в аппаратах с турбулизаторами потока. Теория, эксперимент, методы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 304 с.
11. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
12. Лобанов В.И., Матюхин В.И., Гольцев В.А., Ярошенко Ю.Г. Исследование условий формирования зоны горения в слое железорудных окатышей для улучшения их металлургических свойств // Изв. вуз. Черная металлургия. 1987. № 6. С. 103 – 104.
13. Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Бедарев С.А. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных агрегатах малого диаметра. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.
14. Теория и практика теплогенерации / С.Н. Гушин, М.Д. Казяев, Ю.В. Крюченков, В.И. Лобанов; Под ред. В.И. Лобанова, С.Н. Гушина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 379 с.
15. Механика жидкости и газов / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон и др.; Под научн. ред. В.С. Швыдкого. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464 с.
16. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос: Учебник для вузов / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
17. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание. – М.: Теплотехник, 2002. – 688 с.
18. Равич М.Б. Поверхностное беспламенное горение. – М.-Л.: АН СССР, 1949. – 353 с.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 8, pp. 629–636.

## THE USE OF NATURAL GAS FOR HEATING OF SHAFT FURNACES OF CUPOLA TYPE TO INCREASE THE TECHNOLOGICAL PROCESSES EFFICIENCY OF PIG IRON SMELTING

V.I. Matyukhin<sup>1</sup>, Yu.G. Yaroshenko<sup>1</sup>, A.V. Matyukhina<sup>1</sup>,  
V.A. Dudko<sup>1</sup>, S.E. Punenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>JSC “URALASBEST”, Asbest, Sverdlovsk region, Russia

**Abstract.** Natural gas can be additionally used to reduce coke consumption in a shaft furnace of cupola type with an open or closed furnace top. Its burning is typically made in the external hearths installed around the perimeter of the furnace shell. Depending on design, the burners provide a partial or complete pre-mixing of gas and air at air flow rate of 1.2 to 1.5. Further, the combustion gas is fed directly to a charge layer. When implementing this method, the coke consumption was 8–9 % of furnace charge and fuel gas consumption was 30–40 m<sup>3</sup>/t of melt. For these conditions, there were observed a slight increase in the temperature of the melt (10–20 °C) and productivity growth of 15–20 % while reducing the amount of harmful gaseous emissions by 20–25 % (mostly of CO). In the work of the cupola, periodic disruptions of the gas-dynamical regime were observed accompanied by the suspension of the charge material layer, as well as cooling of the resulting melt, an increase in chemical underburn and deterioration of service conditions of the lining materials. When using the layered method for the gas mixture combustion, it is fed into the heated layer of bulk materials with the air flow rate not below 2.5–3.0 with formation of a high-temperature zone of 1350–1380 °C and the width of 60–70 mm, able to move through the layer at a speed of 15–20 mm/min. To implement it in the thick ventilated layer it is necessary to ensure uniform mixing of gas and air, required gas-dynamic conditions and formation of set “gas-air” ratio in the air flow rate more than 2.5 and 3.0. When supplying the cold gas-air mixture in a layer of shaft furnaces by tuyeres, the combustion zone divides the whole layer into two stages: initial and final. The high temperature level of combustion zone provides substantial cooling rate of the materials at the stage of gas-air mixture ignition, which prevents it from fire in free upperlayer space. The absence of direct contact of high temperatures zone with a unit working space increases the reliability and efficiency of this process (no heat losses). The use of the layered method of natural gas burning to heat the cast iron cupola increase the productivity of the melting unit from 10 to 13.6 t/h, or 36 % while reducing specific consumption of coke for 80 kg/t or 33.3 %, decrease in the total consumption of heat for the process by 25 kW, or 18.78 % and heat losses in the exhaust

gases by 25.32 kW, or 16.2 %. The overall thermal efficiency of the unit increased from 35.58 to 42.26 % or by 15.81 %.

**Keywords:** shaft furnace, external furnace, coke oven heating, combustion conditions of the gas-air mixture, combustion of solid and gaseous fuels, coke consumption, productivity.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-629-636

### REFERENCES

1. Matyukhin V.I., Matyukhina A.V. *Raschet i proektirovanie va-granochnogo kompleksa plavki chuguna* [Calculation and design of complex cupola melting of iron]. Ekaterinburg: UrFU, 2015, 364 p. (In Russ.).
2. Selyanin I.F. Marks G.L., Val’dman L.M., Sokolov B.M. Experimental study of gas formation in coke layer of cupola bed charge with extended combustion zone. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991, no. 10, pp. 74–77. (In Russ.).
3. Gordon Ya.M., Bokovikov B.A., Shvydkii V.S. *Teplovaya rabota shakhtnykh pechei i agregatov s plotnym sloem* [Thermal operation of shaft furnaces and aggregates with a dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 120 p. (In Russ.).
4. Dong H., Cai J.-J., Wang G.-S., Yang J. Numerical simulation on gas flow affected by constructional parameters of pelletizing shaft furnaces. *Dongbei Daxue Xuebao. Ziran Kexue Ban. J. Northeast Univ. Natur. Sci.* 2013, vol. 34, no. 7, pp. 980–984.
5. Chaplygin Yu.V., Erinov A.E. *Ispol'zovanie prirodnogo gaza pri plavke chuguna* [The use of natural gas at smelting of pig iron]. Kiev: Naukova dumka, 1976, 237 p. (In Russ.).
6. Natsui S., Kon T., Ueda S., Kano J., Inoue R., Ariyama T., Nogami H. *Analysis of heat and mass transfer in a packed bed by considering particle arrangement*. Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980-8577, Japan.
7. Fukleev V.A. Coke-gas cupola operation. *Liteinoe proizvodstvo*. 1964, no. 8, pp. 34–35. (In Russ.).
8. Merker E.E., Karpenko G.A., Tynnikov I.M. *Energoberezhnie v promyshlennosti i eksergeticheskii analiz tekhnologicheskikh protsessov* [Energy efficiency in industry and exergy analysis of technological processes]. Stary Oskol: TNT, 2010, 316 p. (In Russ.).

9. Chasov L.I., Protopopov L.P. Generalization of some data on iron smelting in coke-gas cupola. In: *VNIINTiEPSM: sb.tr.* 1971, Issue 3, pp. 346–349. (In Russ.).
10. Svetlov Yu.V. *Intensifikatsiya teplovykh i gidrodinamicheskikh protsessov v apparatakh s turbulizatorami potoka. Teoriya, eksperiment, metody rascheta* [Intensification of thermal and hydrodynamic processes in devices with turbulence flow. Theory, experiment, calculation methods]. Moscow: Energoatomizdat, 2003, 304 p. (In Russ.).
11. Lisienko V.G., Lobanov V.I., Kitaev B.I. *Teplofizika metallurgicheskikh protsessov* [Thermophysics of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 240 p. (In Russ.).
12. Lobanov V.I., Matyukhin V.I., Gol'tsev V.A., Yaroshenko Yu.G. Investigation of formation conditions of the combustion zone in a layer of iron ore pellets to improve their metallurgical properties. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987, no. 6, pp. 103–104. (In Russ.).
13. Selyanin I.F., Feoktistov A.V., Bedarev S.A. *Teoriya i praktika intensifikatsii tekhnologicheskogo protsessa v shakhtnykh agregatakh malogo diametra* [Theory and practice of process intensification in shaft units of small diameter]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 379 p. (In Russ.).
14. Gushchin S.N., Kazyaev M.D., Kryuchenkov Yu.V. *Teoriya i praktika teplogeneratsii* [Theory and practice of heat generation]. Lobanov V.I., Gushchin S.N. eds. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2005, 379 p. (In Russ.).
15. Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M. etc. *Mekhanika zhidkosti i gazov* [Mechanics of liquids and gases]. Shvydkii V.S. ed. Moscow: Akademkniga, 2003, 464 p. (In Russ.).
16. Telegin A.S., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassopereenos: uchebnik dlya vuzov* [Heat and mass transfer: Textbook for universities]. Yaroshenko Yu.G. ed. Moscow: Akademkniga, 2002, 455 p. (In Russ.).
17. Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G. *Topливо. Ratsional'noe szhiganie, upravlenie i tekhnologicheskoe ispol'zovanie: spravochnoe izdanie* [Fuel. Efficient combustion, control and technological use: Reference book]. Moscow: Teplotekhnika, 2002, 688 p. (In Russ.).
18. Ravich M.B. *Poverkhnostnoe besplamennoe gorenie* [Surface flameless combustion]. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1949, 353 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**V.I. Matyukhin**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"*  
(matyhin53@mail.ru)

**Yu.G. Yaroshenko**, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"* (yury-y@planet-a.ru)

**A.V. Matyukhina**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metrology, Standardization and Certification"*  
(a.v.matiukhina@urfu.ru)

**V.A. Dudko**, *MA Student of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"* (Vya4090@yandex.ru)

**S.E. Punenkov**, *Chief Technologist*  
(ore-dressing@control.uralasbest.ru)

Received April 12, 2017

УДК 669.162.283

## АНАЛИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ НЛМК

**Филатов С.В.<sup>1</sup>**, управляющий директор (filatov\_sv@nlmk.ru)

**Загайнов С.А.<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Металлургия железа и сплавов» (zagainovsky@mail.ru)

**Гилева Л.Ю.<sup>2</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов» (ly.gileva@gmail.com)

**Курунов И.Ф.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, главный доменщик (kurunov\_if@nlmk.com)

**Титов В.Н.<sup>1</sup>**, начальник аглодоменного отдела Технического управления (titov\_vn@nlmk.com)

<sup>1</sup> ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

(398004, Россия, Липецк, площадь Металлургов, 2)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

**Аннотация.** Анализ эффектов и рисков основных мероприятий, направленных на снижение энергозатрат показал, что изменение какого-либо одного параметра, направленного на снижение энергозатрат малоэффективно, наибольший эффект достигается при совместном изменении нескольких переменных. Теоретический анализ позволил выявить основные комбинации изменения режимных параметров, которые обеспечивают наибольший эффект от действия того или иного фактора. Влияние гранулометрического состава агломерата на эффективность доменной плавки рассматривается через влияние среднего диаметра кусков на скорость восстановления и газодинамику верхней зоны печи. Показано, что колебания затрат тепла во многом определяются колебаниями восстановительной работы газового потока, которая, в свою очередь, зависит от гранулометрического состава агломерата. Установлено, что при приближении реакции  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$  к равновесию, снижение затрат тепла на выплавку чугуна достигается путем повышения интенсивности плавки. Проанализированы конкретные пути снижения затрат тепла на выплавку чугуна в доменных печах на примере ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Показаны основные мероприятия, обеспечивающие снижение затрат тепла в условиях комбината: оптимизация качества железорудных материалов за счет снижения доли фракции +45 мм; повышение интенсивности работы доменных печей до удельной производительности 75 – 90 т/сут с квадратного метра горна печи; работа доменных печей на повышенном до предельно допустимых (по конструкции засыпного аппарата) значений давления; повышение горячей прочности кокса до 60 – 62 %; вдувание пылеугольного топлива до 140 кг/т чугуна и оптимизация распределения рудной нагрузки по радиусу печи. В результате реализации указанных мероприятий в 2013 – 2016 гг. достигнуто снижение удельного расхода кокса более чем на 10 кг/т чугуна. При этом снижается не только удельный расход кокса, но и расход суммарного углерода топлива.

**Ключевые слова:** доменная печь, расход кокса, суммарный расход углерода, интенсивность плавки, повышенное давление, скорость восстановления оксидов железа, энергозатраты, потери тепла, качество шихтовых материалов, тепловой баланс.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-637-642

Энергоэффективность работы доменных печей целесообразно оценивать по расходу суммарного углерода топлива на 1 т выплавляемого чугуна заданного качества.

Снижение энергозатрат и затрат топлива достигается за счет повышения содержания железа в железорудной части шихты, повышения степени использования восстановительного потенциала газа, повышения температуры дутья и снижения потерь тепла в системе охлаждения доменной печи.

Средние энергозатраты на выплавку чугуна в доменных печах ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК) снизились до 20 ГДж/т чугуна. На некоторых доменных печах энергозатраты составляют 15 ГДж/т [1].

Эффективность восстановительного процесса в лучших доменных печах, работающих с применением хорошо подготовленных железорудных материалов и кок-

са с высокой горячей прочностью ( $\text{CSR} > 65\%$ ), близка к термодинамическому пределу [2].

Анализируя эффекты и риски основных мероприятий, направленных на снижение энергозатрат, следует отметить, что изменение какого-либо одного параметра, направленного на снижение энергозатрат малоэффективно, наибольший эффект достигается при совместном изменении нескольких переменных [3 – 4].

Одним из путей снижения затрат тепла на производство чугуна является снижение потерь тепла. Анализ статей теплового баланса, выполненный с использованием методики, опубликованной в работе [5] показал, что колебания показателя, характеризующего затраты тепла в нижней зоне доменной печи ( $Q_n$ ) и потерь тепла ( $Q_{\text{пот}}$ ) во многом определяются колебаниями затрат тепла на развитие реакций прямого восстановления оксидов железа (рис. 1).

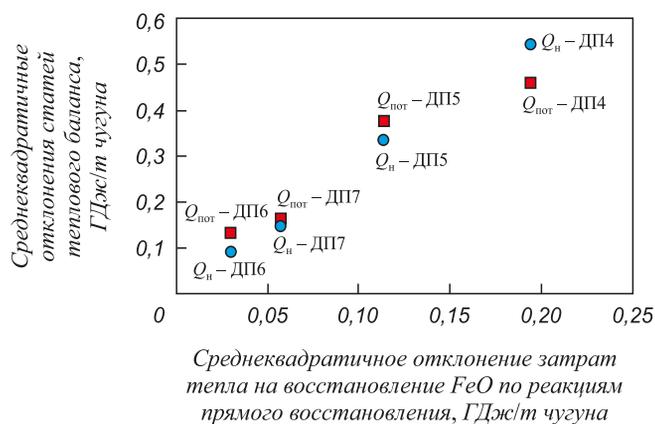


Рис. 1. Взаимосвязь между отклонением статей теплового баланса и колебанием затрат тепла на прямое восстановление FeO по данным за 2014 г.

Fig. 1. Connection of the heat balance deviation and variations of heat consumption at FeO direct reduction according to the operation data in 2014

Наличие взаимосвязи потерь тепла с затратами тепла на прямое восстановление FeO позволяет сформулировать следующий механизм влияния факторов на потери тепла. Вследствие изменений качества железорудных материалов и (или) распределения рудной нагрузки по радиусу печи происходит изменение степени развития косвенного, и, как следствие, прямого восстановления оксидов железа. Возникающий дефицит или избыток тепла компенсируется технологическим персоналом путем изменения прихода тепла в нижнюю зону доменной печи. Это сопровождается изменением процессов теплообмена как в верхней, так и в нижней зонах печи. При этом колебания потерь тепла сказываются на колебаниях состава продуктов плавки (рис. 2).

Приведенные данные показывают, что одним из путей повышения энергоэффективности выплавки чугуна в доменных печах является стабилизация процессов косвенного восстановления оксидов железа, которые во многом определяются степенью использования CO.

В рамках модели восстановления [6 – 8] взаимосвязь времени пребывания шихты в печи с изменением степени использования CO описывается уравнением [8]

$$\Delta\eta_{CO} = \frac{\eta_{CO}^p}{\eta_{CO}} \frac{ke^{k\tau}}{e^{k\tau} - 1} \Delta\tau,$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий влияние константы скорости реакции (значение  $k$  определяется по данным о работе доменных печей и находится в пределах от  $-0,48$  до  $-0,56$ );  $\eta_{CO}^p$ ,  $\eta_{CO}$  – равновесная и фактическая степень использования CO для реакции  $FeO + CO = Fe + CO_2$ ;  $\tau$  и  $\Delta\tau$  – время и изменение времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления.

Из приведенного уравнения можно понять, что влияние времени пребывания шихты в печи на раз-

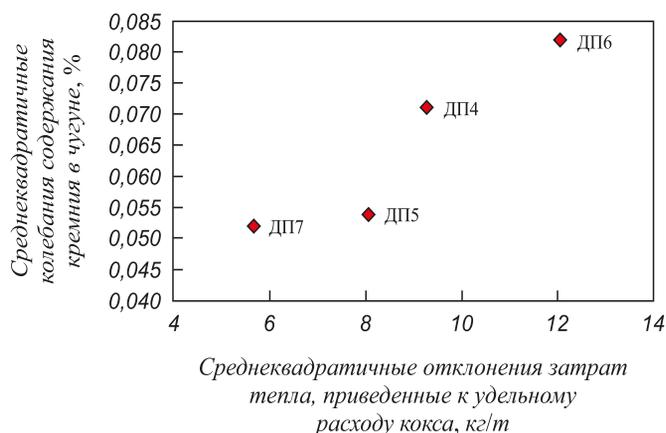


Рис. 2. Зависимость колебания кремния в чугуне от отклонения затрат тепла по данным за 2014 г.

Fig. 2. Dependence of silicon fluctuation in cast iron on the deviation of heat consumption according to the data in 2014

витие реакций косвенного восстановления в меньшей мере проявляется при приближении реакции  $FeO + CO = Fe + CO_2$  к равновесию. К снижению влияния времени пребывания шихты в печи на развитие косвенного восстановления приводит также увеличение скорости химической реакции, которая зависит от температуры и размера кусков [9 – 10].

В результате совместного решения уравнений, описывающих газодинамику слоя и скорость восстановления, установлено, что наилучшие показатели работы печей будут достигаться при доле фракции 5 – 25 мм не менее 80 %. При этом доли фракций  $-5$  и  $+45$  не должны превышать 5 %. Аналогичные результаты приводятся в работе [11].

Повышение времени пребывания железорудной части шихты в доменной печи достигается при замене кокса пылеугольным топливом (ПУТ) [12 – 13]. Повышение рудной нагрузки при вдувании ПУТ приводит к снижению доли объема печи, занимаемого коксом. Следовательно, при прежней интенсивности плавки время пребывания железорудных материалов в зоне косвенного восстановления увеличивается. При освоении технологии выплавки чугуна с использованием ПУТ степень использования CO на доменных печах НЛМК возросла на 1,0 – 1,5 %.

При сопоставлении работы доменных печей, работающих с совместным использованием ПУТ и природного газа (ДП № 4, 5) с печами, где еще не освоено вдувание ПУТ, установлено, что суммарный расход углерода на доменных печах, работающих с вдуванием ПУТ меньше, а степень использования CO выше (табл. 1).

Повышение интенсивности доменной плавки приводит к снижению времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления. Однако это мероприятие сопровождается снижением потерь тепла, что отмечалось еще А.Д. Готлибом, по данным которого при неиз-

Таблица 1

**Сопоставление работы доменных печей, работающих с использованием ПУТ с печами, работающими с использованием только природного газа**

*Table 1. Comparison of blast furnaces operating with the usage of pulverized coal and blast furnaces operating with the usage of natural gas only*

Доменная печь	Суточная производительность, т/сут	Суммарный расход углерода, кг/т	Степень использования CO, %
ДП № 3	5040,2	429,6	46,4
ДП № 4	5803,9	409,3	49,9
ДП № 5	8093,9	413,4	50,1
ДП № 6	8810,5	415,1	48,9
ДП № 7	12 220,0	398,2	49,2

менных шихтовых условиях работы печи потери тепла обратно пропорциональны ее производительности [14]. Подтверждением этого являются результаты анализа взаимосвязи среднего суммарного расхода углерода с суточным производством доменной печи «Россиянка» по данным, усредненным за 10 сут (январь – апрель 2016 г.) (рис. 3).

Приведенные данные показывают, что повышение интенсивности плавки является эффективным способом энергосбережения при выплавке чугуна в доменных печах.

Одним из путей повышения интенсивности плавки и снижения потерь тепла является повышение давления под колошником при одновременном повышении качества кокса [15, 16]. Теоретический анализ условий, обеспечивающих эффективную работу доменных печей и сопоставление показателей их работы при различном давлении под колошником (табл. 2) приведен в работе [15]. Сопоставлялись периоды работы доменных печей за 2012 – 2014 гг. с давлением под колошником, отличающимся на ±10 кПа от средних значений.

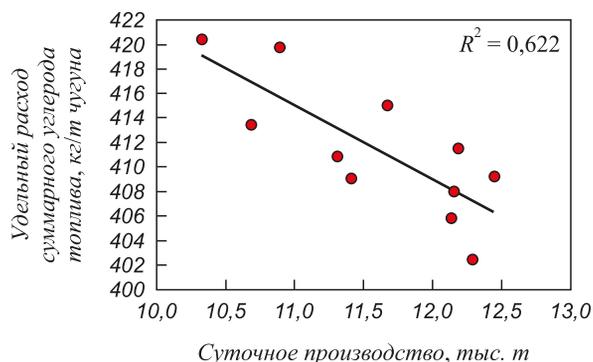


Рис. 3. Взаимосвязь суммарного расхода углерода с суточным производством доменной печи

Fig. 3. Connection of the total consumption of carbon and blast furnace daily production

Анализ показал, что эффективная работа доменных печей на давлении, максимально приближенном к технически обусловленному пределу, на каждой печи возможна только при высокой горячей прочности и высоком качестве агломерата. Это обусловлено тем, что при изменении давления под колошником верхний перепад давления изменяется в меньшей степени, чем нижний. При этом максимальный эффект достигается при сохранении верхнего и повышении нижнего перепада давления.

В реальных условиях доменной плавки возможности повышения нижнего перепада давления определяются размером кусков кокса в коксовой насадке, количеством и свойствами первичного шлака, количеством CO, образующегося при восстановлении железа из железистого первичного шлака, и протяженностью зоны когезии. Для условий работы доменных печей НЛМК рассчитано, что для сохранения нижнего перепада средний диаметр кусков кокса должен увеличиваться на 3,6 %, при этом степень косвенного восстановления повысится на 1,4 % и протяженность зоны вязкопластичного состояния уменьшится на 2,3 %.

Другим фактором, определяющим энергоэффективность доменной плавки, является распределение руд-

Таблица 2

**Показатели работы доменных печей при различном давлении под колошником**

*Table 2. Performance of blast furnaces at different pressures under the furnace top*

Показатель	Давление под колошником, кПа					
	ДП № 4		ДП № 6		ДП «Россиянка»	
	150	170	154	196	168	230
Удельный суммарный расход углерода топлива, кг/т чугуна	413,7	386,7	408,7	400,2	433,1	398,2
Удельная производительность, т/(м <sup>2</sup> ·сут)	61,63	74,11	68,42	77,27	65,59	90,7
CSR, %	52	63	49	61	52	66,8

ной нагрузки по радиусу печи. Современные доменные печи, оборудованные бесконусным засыпным аппаратом, работают с так называемой «отдушиной» по оси печи. Выравнивание рудной нагрузки в промежуточной и периферийной зонах печи сопровождается повышением степени использования СО. При этом наблюдается повышение тепловых нагрузок на холодильники распара и заплечиков.

Современные представления о закономерностях теплообмена в доменной печи, разработанные и развиваемые Уральской школой металлургов [17 – 20], позволяют в качестве показателя неравномерности рассматривать отношение температуры периферийных газов к средней температуре колошниковога газа. Взаимосвязь тепловых нагрузок на холодильники с теплосъемом с заплечиков приводится на рис. 4.

Наличие этой зависимости подтверждается результатами математического моделирования влияния рудной нагрузки и диаметра кусков железорудных материалов на высоту верхней ступени теплообмена.

Задача распределения рудной нагрузки по радиусу печи рассматривается как задача оптимизации, а именно, достижение максимальной степени использования СО при допустимых нагрузках на холодильники. Реализация такого управления осуществляется путем изменения программы загрузки при превышении допустимого значения тепловых нагрузок на холодильники доменной печи.

В результате повышения интенсивности плавки, горячей прочности кокса и давления под колошником расход суммарного углерода топлива на доменных печах НЛМК в 2014 г. составил 426,3 кг/т чугуна, а в 2015 г. снизился до 423,2 кг/т чугуна.

По данным работы [21] суммарный расход твердого топлива на доменных печах НЛМК (кокс + природный

газ + ПУТ) является одним из самых наименьших в России.

**Выводы.** Основными мероприятиями, обеспечивающими повышение энергоэффективности доменной плавки на НЛМК, являются:

- оптимизация качества железорудных материалов;
- повышение интенсивности работы доменных печей;
- работа доменных печей на повышенном давлении;
- повышение горячей прочности кокса;
- вдувание пылеугольного топлива;
- оптимизация распределения рудной нагрузки по радиусу печи.

Реализация отмеченных мероприятий позволила снизить удельный расход углерода топлива на доменных печах НЛМК за 2013 – 2016 гг. более, чем на 10 кг/т чугуна.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rammer B., Millner R., Boehm C. Comparing the CO<sub>2</sub> emission of different ironmaking rout // Proceedings of the VII European Coke and Ironmaking Congress – ECIC. 2016. P. 284 – 291.
2. Schmole P. The blast furnace – fit for future // Proceeding of the VII Europeaean Coke and Ironmaking Congress – ECIC. 2016. P. 3 – 12.
3. Товаровский И.Г. Процессы доменной плавки. Т. 2. Проблемы и перспективы. Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 406 с.
4. Товаровский И.Г. Доменная плавка. – 2-е изд. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.
5. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др.; Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.
6. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей // Сталь. 2000. № 9. С. 12 – 15.
7. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2011. – 462 с.
8. Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю., Пыхтеева К.Б. Разработка методики анализа процессов восстановления оксидов железа // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 9. С. 658 – 661.
9. Шварцман А.А., Жуховицкий А.А. Начала физической химии для металлургов. – М.: Металлургия, 1991. – 208 с.
10. Шаврин С.В. Закономерности восстановления оксидов железа и моделирование металлургических процессов // Физическая химия и технологии в металлургии: Сб. науч. тр. – Екатеринбург: УрО РАН, 1966. С. 239 – 248.
11. Фролов Ю.А., Птичников А.Г., В.Х. Баринов В.Х., Горшков Н.Н. Методика расчета и анализ факторов, влияющих на расход кокса и производительность доменных печей ОАО «ЧМК» // Металлург. 2013. № 3. С. 42 – 49.
12. Тирьон К., Суворов М., Шмит Л. О комплексном подходе при вдувании ПУТ в доменные печи // Доменное производство – XXI век: Тр. Междунар. конгресса доменщиков. – М., 2014. С. 80 – 91.
13. Коксозамещающие технологии в доменной плавке / В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский, Д.А. Демчук и др. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 276 с.
14. Готтлиб А.Д. Доменный процесс. – М.: Металлургия, 1966. – 503 с.

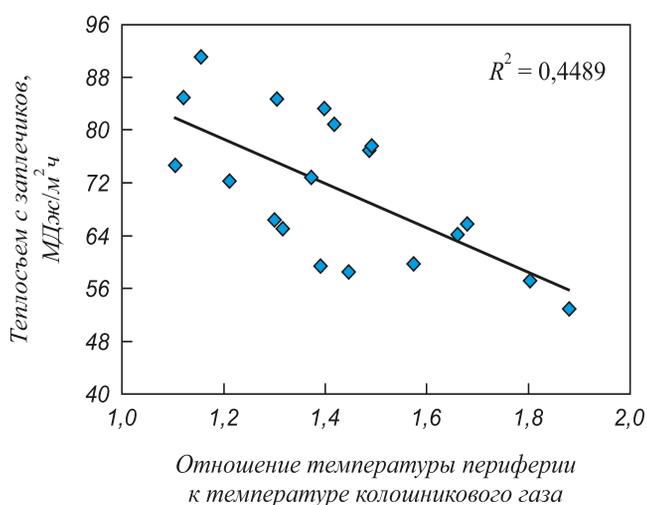


Рис. 4. Зависимость теплосъема с заплечиков от отношения температуры периферии к температуре колошниковога газа

Fig. 4. Dependence of heat removal from the shoulders on the ratio of periphery temperature to the top gas temperature

15. Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю. Влияние повышенного давления в доменной печи на эффективность ее работы // Сталь. 2015. № 4. С. 11 – 14.
16. Мищенко И.М., Кузин А.В. Качество кокса и другие важнейшие факторы обеспечения эффективной выплавки чугуна с применением пылеугольного топлива // Черная металлургия. Бюлл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 5. С. 26 – 32.
17. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Д. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
18. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков Б.А. и др. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
19. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
20. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии / Н.А. Спирин, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 205 с.
21. Катунин В.В., Петракова Т.М., Иванова И.М. Основные показатели работы черной металлургии России в 2015 г. // Черная металлургия. Бюлл. ин-та «Черметинформация». 2016. № 3. С. 3 – 24.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 8, pp. 637–642.

## ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY INCREASE OF CAST IRON SMELTING IN NLMK BLAST FURNACES

**S.V. Filatov<sup>1</sup>, S.A. Zagainov<sup>2</sup>, I.F. Kurunov<sup>1</sup>, V.N. Titov<sup>1</sup>, L.Y. Gileva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” Lipetsk, Russia

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia

B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The analysis of effects and risks of the main measures aimed at reducing energy costs has shown that the change in any one parameter is ineffective. The greatest effect can be achieved by the joint change of several variables. Theoretical analysis made it possible to identify the main combinations of changes in the regime parameters, which provide the greatest effect on the particular activity factor. The influence of the granulometric composition of the agglomerate on the efficiency of blast furnace smelting was examined through the influence of average diameter of the pieces, both on the rate of recovery and on the gas dynamics of furnace upper zone. It is shown that the variations in heat costs are largely determined by the fluctuations in recovery work of gas flow, which, in turn, depends on granulometric composition of the agglomerate. It was established that when the  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$  reaction is approached to balance, the heat loss reduction for cast iron smelting is achieved by increasing the melting intensity. The specific ways of reducing the heat costs for cast iron smelting in blast furnaces were analyzed on the example of PAO NLMK. It is shown that the main activities providing the reduction of heat losses in the plant conditions are: quality optimization of the iron ore materials due to the fraction decrease of +45 mm; increasing the intensity of the blast-furnace operation to relative production of 75 – 90 tons per day from square meter of the blast-furnace hearth; blast-furnace operation at the alarm pressure (according to the design of charging equipment); increasing the coke strength reactivity up to 60 – 62 %; pulverized coal injection up to 140 kg per ton of cast iron and optimization of the ore load distribution on the furnace’s radius. As a result of these measures implementation in 2013 – 2016, the coke rate reduction by more than 10 kg per ton of cast iron was achieved. In this case, not only the specific consumption of coke, but also the consumption of total carbon of fuel is reduced.

**Keywords:** blast-furnace, coke consumption, carbon total consumption, melting intensity, high-top pressure, reduction ratio of carbon oxides, energy consumption, heat losses, quality of the raw materials, heat balance.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-637-642

### REFERENCES

1. Rammer B., Millner R., Boehm C. Comparing the CO<sub>2</sub> emission of different ironmaking rout. *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC*. 2016, pp. 284–291.
2. Schmole P. The blast furnace – fit for future. *Proceeding of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC*. 2016, pp. 3–12.
3. Tovarovskii I.G. *Protsessy domennoi plavki. Tom 2. Problemy i perspektivy: monografiya* [Blast furnace processes. Vol.2. Problems and perspectives: Monograph]. Izdatel’skii dom LAP LAMBERT Akademik Publishing, 2012, 406 p. (In Russ.).
4. Tovarovskii I.G. *Domennaya plavka: monografiya* [Blast furnace smelting: Monograph]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2009, 768 p. (In Russ.).
5. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in automated process control system]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: OOO “UIPTs”, 2014, 558 p. (In Russ.).
6. Zagainov S.A., Onorin O.P., Gileva L.Yu. Volkov D.N., Tleugbulov B.S. Software for flexible blast-furnace operation. *Steel in Translation*. 2000, vol. 30, no. 9, pp. 9–11.
7. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P. *Model’nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenii v ASU TP domennoi plavki* [Model decision support systems in the automated process control system of blast furnace smelting]. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).
8. Filatov S.V., Zagainov S.A., Gileva L.Yu., Pykhteeva K.B. Development of the analysis of iron oxide reduction processes. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 9, pp. 658–661. (In Russ.).
9. Shvartsman A.A., Zhukhovitskii A.A. *Nachala fizicheskoi khimii dlya metallurgov* [Fundamentals of physical chemistry for metallurgists]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 208 p. (In Russ.).
10. Shavrin S.V. Regularities of reduction of iron oxides and modeling of metallurgical processes. In: *Fizicheskaya khimiya i tekhnologii v metallurgii: sbornik nauchnykh trudov* [Physical chemistry and technologies in metallurgy: Coll. of sci. papers]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1966, pp. 239–248. (In Russ.).
11. Frolov Yu.A., Ptichnikov A.G., Barinov V.Kh., Gorshkov N.N. Method of calculating and analyzing the factors that affect the coke consumption and productivity of blast furnaces at the Chelyabinsk Metallurgical Combine. *Metallurgist*. 2013, vol. 57, no. 3–4, pp. 183–193.
12. Tir’ov K., Suvorov M., Shmit L. On integrated approach for pulverized coal fuel blowing into blast furnaces. In: *Domennoe proizvodstvo – XXI vek: trudy mezhdunarodnogo kongressa domenschikov* [Blast furnace production – 21th century: Papers of Int. Congress of Blast Furnacemen]. Moscow: 2014, pp. 80–91. (In Russ.).
13. Lyalyuk V.P., Tovarovskii I.G., Demchuk D.A. etc. *Koksozameshchayushchie tekhnologii v domennoi plavke* [Coke-substituting technologies in blast furnace smelting]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2006, 276 p. (In Russ.).
14. Gotlib A.D. *Domennyi protsess* [Blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 503 p. (In Russ.).

15. Filatov S.V., Zagainov S.A., Gileva L.Yu., Kurunov I.F., Titov V.N. Influence of elevated pressure on blast-furnace performance. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 4, pp. 275–278.
16. Mishchenko I.M., Kuzin A.V. Quality of coke and other important factors for ensuring effective smelting of cast iron using pulverized coal. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 5, pp. 26–32. (In Russ.).
17. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Lazarev B.D. *Teploobmen v domennoi pechi* [Heat transfer in blast furnace]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 355 p. (In Russ.).
18. Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A. etc. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe* [Heat and mass transfer in a dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 432 p. (In Russ.). (In Russ.).
19. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L. etc. *Teplotekhnika domennogo protsesssa* [Thermal engineering of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
20. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Lobanov V.I., Lavrov V.V. *Vvedenie v sistemnyi analiz teplofizicheskikh protsessov metallurgii* [Introduction to the system analysis of thermophysical processes of metallurgy]. Ekaterinburg: UGTU, 1999, 205 p. (In Russ.).
21. Katunin V.V., Petrakova T.M., Ivanova I.M. Main performance indicators of the Russian ferrous metallurgy in 2015. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2016, no. 3, pp. 3–24. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**S.V. Filatov**, Managing Director (filatov\_sv@nlmk.ru)

**S.A. Zagainov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Metallurgy of Iron and Alloys" (s.a.zagainov@urfu.ru)

**I.F. Kurunov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Blast Furnaceman (kurunov\_if@nlmk.com)

**V.N. Titov**, Head of the Agglomeration and Blast Furnace Division of the Technical Department (titov\_vn@nlmk.com)

**L.Y. Gileva**, Cand. Sci. (Eng.) Assist. Professor of the Chair "Metallurgy of Iron and Alloys" (ly.gileva@gmail.com)

Received April 12, 2017

## ТЕПЛООБМЕННЫЙ БЛОК ДЛЯ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ ГОРЕЛКИ

*Дружинин Г.М.<sup>1,2</sup>, д.т.н., зам. директора по науке, профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (gorelka.D@yandex.ru)*

*Лошкарев Н.Б.<sup>2</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»*

*Лошкарев А.Н.<sup>2</sup>, старший преподаватель кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (mrAir@mail.ru)*

*Мухамадиева А.Х.<sup>2</sup>, магистрант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (halitovna93@gmail.com)*

*Муксинов Д.Ф.<sup>2</sup>, магистрант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (chuparpollo@mail.ru)*

<sup>1</sup>ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»

(620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Современные регенеративные горелки нагревательных и термических печей имеют достаточно большие размеры и малое время перекидки, что связано с низкой теплоемкостью огнеупорных материалов, применяемых для изготовления насадки. Большие габариты регенеративных горелок затрудняют их применение на нагревательных и термических печах, а малое время перекидок приводит к снижению срока эксплуатации перекидных клапанов. Существенно уменьшить размеры насадки и увеличить при этом время перекидки позволяет использование скрытой теплоты плавления металлов, которая на порядок выше теплоемкости керамики, из которой изготавливают насадку в современных рекуперативных горелках. В предлагаемом техническом решении рекомендуется использовать тонкостенные емкости, в которые помещаются металлы с различной теплотой плавления. Из таких емкостей набираются блоки, в которых температура плавления металла, заполняющего емкости, одинакова, а в соседних блоках отличается примерно на 100 °С. Как известно, при плавлении металлов их температура остается постоянной, поскольку вся подводимая к металлу теплота расходуется на плавление. Это позволяет поддерживать постоянную температуру секции, удерживая ее равной температуре плавления металла в данной секции, снимая с ее поверхности нагреваемым воздухом теплоту или отдавая поверхности теплоту продуктов сгорания, выделяющуюся при кристаллизации или поглощаемую при плавлении металлического ядра. Расчет времени перекидки и массы металла в одной секции, основанный на совместном решении уравнений теплового баланса и теплообмена между нагреваемым воздухом и поверхностью емкостей, позволяет определить габаритные размеры каждой секции, заполненной плавящимся или кристаллизующимся металлом и ее теплообменную поверхность. В данной работе приведен расчет массы плавкого ядра, размеров секции и времени перекидки регенеративного блока, состоящего из десяти секций с плавким ядром. Расчет обосновывает возможность снижения габаритов регенеративной насадки для горелки мощностью 200 кВт и увеличение времени перекидки, причем температура подогрева воздуха остается постоянной. Кроме того, в работе предложена конструкция секции и теплообменного блока, которые позволяют решить задачу уменьшения размеров регенеративного блока и увеличения времени перекидки по сравнению с существующими регенераторами, используемыми для нагрева воздуха в регенеративных горелках. Предлагаемая конструкция может быть использована для создания регенеративных горелок нового класса, обладающих высокой эффективностью, высокой температурой подогрева воздуха и значительным временем перекидки.

**Ключевые слова:** регенератор, теплообменный аппарат, утилизация теплоты, регенеративная горелка, плавкое ядро, плавкая насадка, скрытая теплота плавления.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-643-650

При постоянно растущей цене на энергоносители глубокая утилизация теплоты продуктов сгорания в нагревательных и термических печах становится одним из важнейших факторов экономии топлива и повышения эффективности его использования.

Традиционно теплоту продуктов сгорания утилизируют, применяя рекуператоры и регенераторы, устанавливаемые вблизи печей. Эти устройства имеют достаточно большие размеры, высокое гидравлическое сопротивление и, зачастую, малый срок эксплуатации.

При этом стоимость строительства теплообменных аппаратов достаточно высока.

Удачным решением применения теплообменных аппаратов можно считать рекуперативные и регенеративные горелки, которые сочетают в себе топливосжигающее устройство и теплообменник [1 – 11]. Это позволяет отказаться от строительства дорогостоящих рекуператоров или регенераторов, обязательных для печей, у которых температура продуктов сгорания на выходе из рабочего пространства превышает 600 °С.

При этом суммарная стоимость теплообменного аппарата и обычных горелок, которыми оборудована печь, оказывается заметно выше стоимости комплекта горелок со встроенными теплообменниками.

Широкая практика применения рекуперативных горелок на нагревательных и термических печах показывает их высокую эффективность, поскольку температура подогрева воздуха в рекуператорах таких горелок может достигать 500 и даже 700 °С при температуре продуктов сгорания, удаляемых из печи, порядка 1000 °С. При этом температура продуктов сгорания на выходе из рекуператоров составляет 550 – 320 °С.

Однако использование рекуперативных горелок ограничено температурой применения материала, из которого изготавливаются их рекуператоры, и при большей температуре продуктов сгорания срок эксплуатации рекуператоров и горелок в целом резко снижается.

Более эффективными теплообменными аппаратами являются регенераторы, в которых температура подогрева воздуха существенно выше, а значит выше и эффективность использования топлива. Кроме того, служат регенераторы значительно дольше. Однако и у регенераторов есть недостатки. В первую очередь, это большие размеры регенератора, связанные с необходимостью иметь как можно большую теплоемкость регенеративной насадки, что позволяет увеличить время перекидки и обеспечить при этом меньшее изменение температуры подогрева воздуха.

Сегодня на нагревательных печах достаточно успешно применяются регенеративные горелки, в которых проблемы теплоемкости насадки и стабилизации температуры подогрева воздуха для горения решаются не увеличением размеров насадки, а сокращением времени перекидки, которое для известных зарубежных горелок составляет примерно 10 – 15 с. Это требует установки на регенеративных горелках быстродействующих электромагнитных клапанов с высоким эксплуатационным ресурсом. При этом размеры насадки оказываются значительными, что увеличивает габариты горелки [12 – 14].

Работниками ОАО «ВНИИМТ» совместно с сотрудниками кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Уральского федерального университета им. первого Президента РФ Б.Н. Ельцина разработан компактный регенеративный теплообменник большой теплоемкости, предназначенный для установки на горелках нагревательных и термических печей.

Для увеличения теплосодержания насадки в теплообменнике данной конструкции используется скрытая теплота плавления металлического ядра, заключенного в теплопроводящую оболочку. В предлагаемом варианте конструкции насадки регенератора с плавким ядром существенно увеличивается ее теплосодержание за счет скрытой теплоты плавления металлов.

Идея создания регенератора с плавким ядром для увеличения теплосодержания насадки была выдвину-

та Ю.Г. Ярошенко, В.С. Швыдким, Я.М. Гордоном и В.Л. Советкиным [15] еще в 1988 г. Это техническое решение позволяет увеличить время перекидки или уменьшить размеры насадки регенератора, однако температура насадки, а значит и температура подогрева воздуха в этом случае изменяется в достаточно широких пределах, что негативно сказывается на тепловом режиме работы агрегатов, оборудованных подобными регенераторами.

В регенеративной горелке с насадкой, содержащей плавкое ядро, предполагается установить четное количество регенеративных блоков, половина которых работает на нагрев и плавление ядра, а значит и на охлаждение продуктов сгорания, а половина на охлаждение и кристаллизацию плавкого ядра и, следовательно, подогрев воздуха. Каждый блок состоит из десяти последовательно установленных секций, температура плавления ядра которых отличается в соседних секциях приблизительно на 100 °С. При этом максимальную температуру плавления имеет ядро той секции, которая установлена на выходе продуктов сгорания из рабочего пространства печи, т. е. самой горячей, а минимальную температуру плавления имеет ядро секции, располагающейся на входе холодного воздуха в регенеративный блок.

В качестве плавкого ядра могут быть использованы металлы и сплавы, приведенные в табл. 1.

Секция регенератора с плавким ядром состоит из оболочек, заполненных металлом. Оболочка должна иметь развитую наружную поверхность. Это необходимо для формирования теплового потока, обеспечивающего охлаждение продуктов сгорания на 100 °С за время прохождения их через секцию в количестве, образующемся при сжигании газа в горелке, работающей на номинальной мощности.

С точки зрения увеличения теплового потока на поверхности насадки возможно обеспечить высокие коэффициенты теплоотдачи за счет, например, высоких скоростей движения газов. Однако это будет приводить к росту гидравлического сопротивления при движении продуктов сгорания и воздуха через насадку, что крайне нежелательно. Именно поэтому для увеличения теплового потока, на взгляд авторов, следует развить теплообменную поверхность секции, обеспечив тем самым нагрев воздуха или охлаждение продуктов сгорания в каждой секции на температуру, равную разнице температур плавления ядер соседних секций, т. е. примерно на 100 °С [16, 17].

Масса плавкого ядра каждой секции может быть определена из ее теплового баланса. Количество теплоты, требуемое на расплавление ядра секции, должно быть значительно больше количества теплоты, требуемого на нагрев воздуха или охлаждение продуктов сгорания. Это обеспечит увеличение времени перекидок, при котором ядро секции всегда будет оставаться в состоянии плавления или кристаллизации.

## Свойства материалов для плавкого ядра регенеративной насадки

Table 1. Properties of materials for fusible kernel of a regenerative nozzle

Металл или сплав	Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Легкоплавкий сплав (16 % Bi, 36 % Pb, 48 % Sn)	155,0	45,73	8500
Олово	231,9	59,00	6834
Свинец	327,5	24,30	10 510
Цинк	419,5	112,20	7135
Силумин АК 12 (литейный сплав алюминия с кремнием)	550,0	364,36	2650
Алюминий	660,0	393,00	2380
АСМ (алюминиевый антифрикционный сплав)	750,0	382,84	2830
МЛ 11 (магниевый литейный сплав)	843,0	350,22	1800
Бронза БрБ2	955,0	209,44	8920
Медь	1083,0	213,00	8930

Для разработки методики расчета теплообмена необходимо определиться с конструкцией теплообменной секции, которая должна иметь развитую теплообменную поверхность на стороне газов и в которую можно было бы поместить достаточное количество материала плавкой насадки.

В качестве примера рассмотрим горелку мощностью 200 кВт с расходом природного газа 20 м<sup>3</sup>/ч. При этом расход воздуха, теоретически необходимый для сжигания природного газа с теплотой сгорания  $Q_H^p = 33\,500$ , составит  $L_0 = 9,2$  [18], а при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,1$  потребуется  $L_\alpha = 9,2 \cdot 1,1 = 10,12$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Таким образом, общий расход воздуха для сжигания 20 м<sup>3</sup>/ч природного газа составит  $V_B = 20 \cdot 10,12 = 202,4$  м<sup>3</sup>/ч (или 0,0562 м<sup>3</sup>/с).

Расход продуктов сгорания при  $\alpha = 1$   $V_0 = 10,2$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, а при  $\alpha = 1,1$   $V_\alpha = 10,2 + (\alpha - 1)L_\alpha = 10,2 + (1,1 - 1) \cdot 10,12 = 11,2$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Примем температуру продуктов сгорания, выходящих из рабочего пространства нагревательной печи,  $t_T = 1300$  °С, а температуру воздуха на входе в регенератор  $t'_B = 20$  °С.

В настоящий момент наиболее рациональным конструктивным решением представляется использование секции в виде шахматного пучка трубок из нержавеющей стали с наружным диаметром  $d_H = 5$  мм и внутренним  $d_B = 4$  мм (рис. 1).

Расстояние между наружными поверхностями рядов стоящих трубок 1,5 мм. Ширину и высоту секции примем одинаковыми (150 мм) (рис. 2). Это предварительные размеры секции, которые в результате расчетов могут быть скорректированы.

Длина секции определяется скрытой теплотой плавления ядра. Трубки заполняются изнутри плавким материалом и завариваются по торцам. Трубки одной

секции заполнены металлом с одинаковой температурой плавления. При этом трубки соседних секций заполняются металлом с температурой плавления, отличающейся приблизительно на 100 °С. Десять секций составляют блок регенератора (рис. 3). Всего в одной горелке предполагается разместить четыре регенеративных блока (рис. 4): два из них работают на подогрев воздуха и кристаллизацию ядра и два на охлаждение продуктов сгорания и нагрев насадки, т. е. расплавление ядра.

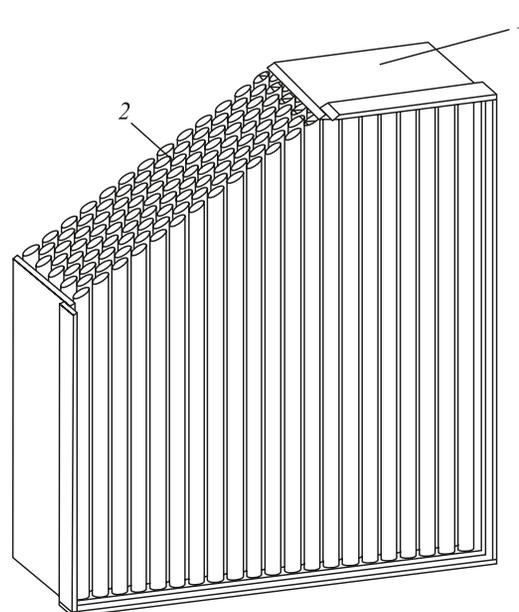


Рис. 1. Секция блока регенератора с плавким ядром: 1 – корпус теплообменной секции; 2 – трубки, заполненные плавким ядром

Fig. 1. Regenerator block section with a fusible kernel: 1 – body of heat exchange section; 2 – tubes filled with a fusible kernel

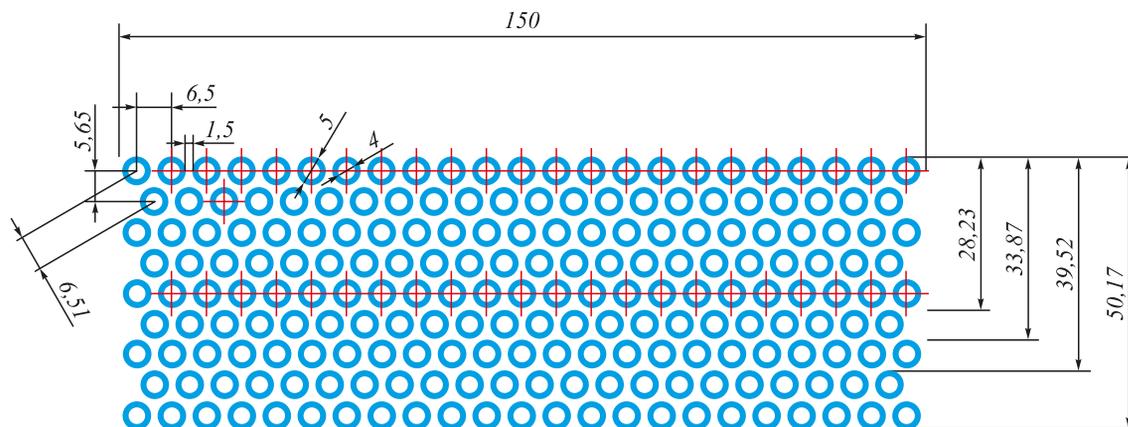


Рис. 2. Расположение трубок в секции регенератора с плавким ядром

Fig. 2. Arrangement of tubes in regenerator section with a fusible kernel

При такой компоновке температуры воздуха и продуктов сгорания, проходящих через регенератор, должны измениться в каждой секции приблизительно на 100 °С.

Целью расчета является определение размеров каждой секции, которые обеспечили бы заданные изменения температуры дыма и воздуха. При этом плавкое ядро секций должно оставаться в состоянии плавления или кристаллизации, при котором выделяется или поглощается скрытая теплота плавления и обеспечивается постоянство его температуры, а, следовательно, и температуры нагрева воздуха. Поскольку в каждой секции воздух нагревается на 100 °С, а количество секций с разными плавкими ядрами предполагается равным десяти, воздух должен нагреться приблизительно до 1000 °С. Поскольку одновременно на подачу воздуха будут работать два блока, то через каждый

блок расход воздуха составит  $202,4/2 = 101,2 \text{ м}^3/\text{ч}$  или  $V_{\text{в1}} = 101,2/3600 = 0,0281 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для подогрева 101,2 м<sup>3</sup>/ч воздуха на 100 °С за время его прохождения через одну секцию потребуется тепловой поток, который можно определить по уравнению

$$q = V'_{\text{в1}} C_{\text{в}} \Delta t_{\text{в1}} = 0,0281 \cdot 1290 \cdot 100 = 3624,9 \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{в}}$  – средняя теплоемкость воздуха в интервале изменения его температуры в секции, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\Delta t_{\text{в1}}$  – изменение температуры воздуха в первой по ходу его дви-

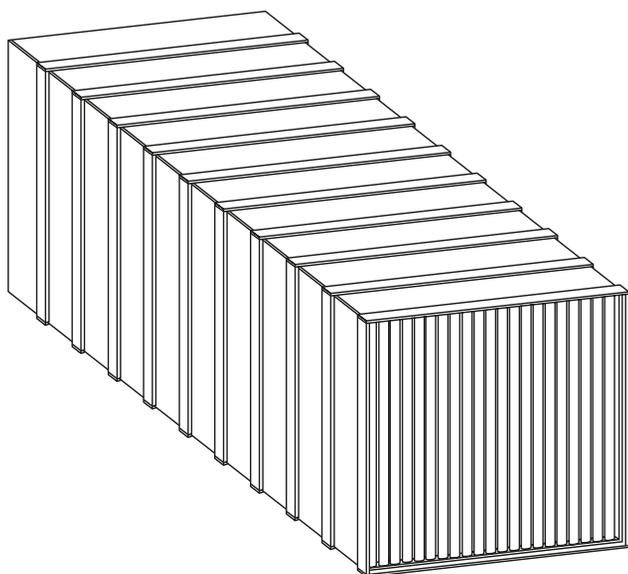


Рис. 3. Блок регенератора из десяти секций

Fig. 3. Regenerator block of ten sections

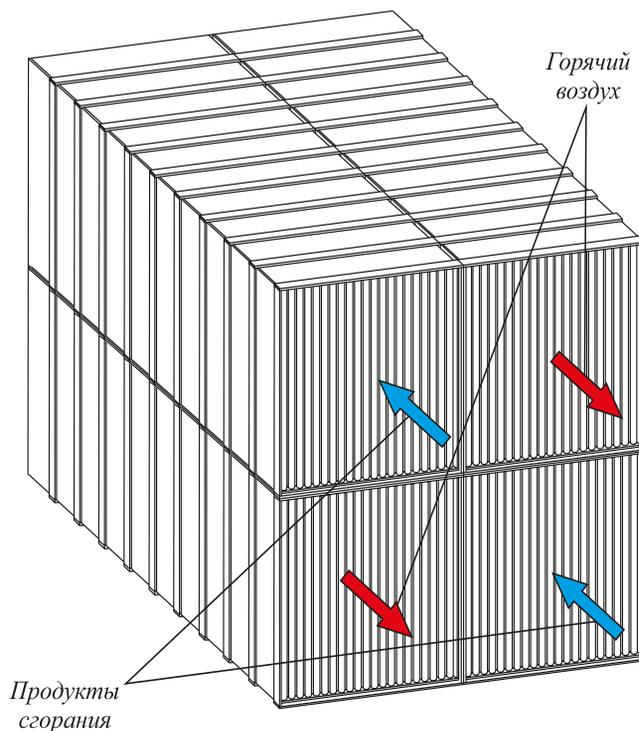


Рис. 4. Регенератор с плавким ядром из четырех блоков (по десять секций в каждом блоке)

Fig. 4. Regenerator with a fusible kernel of four blocks (ten sections in each block)

жения секции, °C;  $C_B = 1290$  – теплоемкость воздуха при средней его температуре в первой секции, Дж/(м<sup>3</sup>·K).

С другой стороны, тепловую мощность, передаваемую поверхностью секции воздуху, можно определить по уравнению теплообмена:

$$q = \alpha(\bar{t}_n - \bar{t}_b)f, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от теплообменной поверхности секции к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·K);  $t_n$  – средняя температура поверхности секции, °C;  $\bar{t}_b$  – средняя температура воздуха в секции, °C;  $f$  – площадь теплообменной поверхности секции, м<sup>2</sup>.

Среднюю температуру поверхности секции  $t_n$  можно принять равной температуре плавления ядра, поскольку стенки трубок тонкие и изготовлены из металла, хорошо проводящего теплоту, а коэффициенты теплоотдачи от жидкого металла к стенкам очень высоки. Поэтому теплота будет доставляться от расплавленного ядра к поверхности значительно быстрее, чем отдаваться поверхностью воздуху.

Коэффициент теплоотдачи для шахматного пучка труб можно определить по уравнению [19]

$$\begin{aligned} \alpha_b &= (4,3 + 0,0038\bar{t}_b)C \frac{w_b^{0,6}}{d_n^{0,4}} 1,163 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}) = \\ &= (4,3 + 0,0038 \cdot 70) \cdot 1,13 \cdot \frac{6^{0,6}}{0,005^{0,4}} \cdot 1,163 = \\ &= 146,39 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $w_b$  – средняя скорость воздуха в свободном сечении секции (примем ее равной 6 м/с, исходя из условий минимизации гидравлического сопротивления);  $\bar{t}_b$  – средняя температура воздуха в секции  $\left(\bar{t}_b = \frac{20 + 120}{2} = 70\right)$  °C;

$C$  – коэффициент, зависящий от соотношения расстояния между осями труб в ряду и их наружным диаметром: при  $x/d_n = 1,2 \div 3,0$   $C = 1 + 0,1x/d_n$ ; при  $x/d_n > 3$   $C = 1,333$ .

Расстояние между осями труб при принятой компоновке (см. рис. 2) составляет  $x = 6,5$  мм, а наружный диаметр трубки  $d_n = 5$  мм. Таким образом  $x/d_n = 6,5/5 = 1,3$ , тогда  $C = 1 + 0,1 \cdot 1,3 = 1,13$ .

Приравняв уравнения (1) и (2) и учитывая при этом потери теплоты в окружающую среду через боковые стенки секции (2 %), получим выражение

$$1,02V'_B C_B \Delta t'_B = \alpha(\bar{t}_n - \bar{t}_b)f,$$

откуда можно найти площадь теплообменной поверхности, необходимой для нагрева воздуха на 100 °C при данных условиях теплообмена. В расчетах приняты температура воздуха на входе 20 °C, температура воздуха на выходе из секции 120 °C для первой по ходу воздуха секции, в которой температура плавления лег-

коплавкого сплава (16 % Bi, 36 % Pb, 48 % Sn) составляет 155 °C:

$$f = \frac{V'_B C_B \Delta t'_B}{\alpha(\bar{t}_n - \bar{t}_b)} = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1290 \cdot 100}{146,39(155 - 70)} = 0,297 \text{ м}^2. \quad (4)$$

Поверхность одной трубки регенератора диаметром 5 мм и длиной 150 мм составляет  $f_1 = d_n \pi l = 0,005 \cdot 3,14 \cdot 0,15 = 0,002356$  м<sup>2</sup>. Общее количество трубок в секции должно составлять  $n = 0,297/0,002356 = 126$  шт.

Количество трубок, устанавливаемых в одном ряду ( $n_1$ ), определяется при заданном расходе воздуха 0,0281 м<sup>3</sup>/с, принятой скорости воздуха 6 м/с, заданной высоте трубок 150 мм и заданном расстоянии между трубками 1,5 мм по формуле

$$n_1 = \frac{V'_B}{w_b c z} = \frac{0,0281}{6 \cdot 0,0015 \cdot 0,15} = 20,8 \text{ шт}. \quad (5)$$

Примем целое число трубок в первом ряду  $n_1 = 21$  шт.

Поскольку принято шахматное расположение трубок в секции, то в следующем ряду будет располагаться 20 трубок. Таким образом, в паре рядов располагается 41 трубка, а значит, необходимо расположить в секции  $N = 126/41 = 3,07$  пары рядов трубок.

Общее количество рядов примем целое  $N = 6$  рядов. Общая длина секции при этом составит 34 мм.

Тепловую мощность, которую получит воздух, проходя через секцию, определим по формуле (1)

$$q = V'_B C_B \Delta t'_B = 0,0281 \cdot 1290 \cdot 100 = 3625 \text{ Вт}.$$

В 126 трубках внутренним диаметром 4 мм и длиной 150 мм можно поместить плавкое ядро массой  $M = 126 \cdot 0,0042 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 8500 = 2,018$  кг. На плавление такого количества плавкого ядра с теплотой плавления 45,73 кДж/кг и плотностью 8500 кг/м<sup>3</sup> затрачивается теплота  $Q = 45,73 \cdot 2,018 = 92,27$  кДж или 92 270 Дж.

Время плавления ядра, т. е. время перекидки составит:  $\tau = Q/q = 92\,270/3625 = 25,45$  с.

Аналогичным образом можно рассчитать время перекидки и длину второй и последующих секций с плавким ядром. Результаты этих расчетов представлены в табл. 2.

Общая длина регенеративного блока, состоящего из десяти секций, составляет 427 мм, минимальное время перекидки – 24,7 с. Именно минимальное время следует учитывать, поскольку при этом во всех остальных секциях плавкое ядро будет оставаться в состоянии, когда часть ядра кристаллизуется, а часть будет находиться в жидком состоянии, что существенно повышает коэффициент передачи теплоты от стенок к расплаву.

Важным показателем работы регенератора является его гидравлическое сопротивление.

Результаты расчетов длин секций и времени перекидок

Table 2. Results of calculations of sections lengths and swap time

Материал плавкого ядра	Температура плавления ядра, °С	Скрытая теплота плавления, кДж/кг	Плотность плавкого ядра, кг/м³	Масса ядра, кг	Длина секции, мм	Время перекидки, с
Легкоплавкий сплав (16 % Bi, 36 % Pb, 48 % Sn)	155,0	45,73	8500	2,02	34	25,45
Олово	231,9	59,00	6834	2,24	51	36,20
Свинец	327,5	24,30	10 510	3,74	57	24,74
Цинк	419,5	112,20	7135	2,96	68	90,10
Силумин АК 12 (литейный сплав алюминия с кремнием)	550,0	364,36	2650	1,84	40	181,00
Алюминий	660,0	393,00	2380	0,56	34	58,00
АСМ (алюминиевый антифрикционный сплав)	750,0	382,84	2830	0,92	35	92,50
МЛ 11 (магниевый литейный сплав)	843,0	350,22	1800	0,61	44	54,70
Бронза БрБ2	955	209,44	8920	2,27	34	122,80
Медь	1083	213,00	8930	1,73	30	94,00
Σ				18,89	427	Min 24,70

Расчет гидравлического сопротивления регенеративной насадки с плавким ядром проведен по методике, изложенной в справочнике И.Е. Идельчика [20].

Коэффициент сопротивления шахматного пучка труб (включая потери на вход и выход из пучка) при  $3 \cdot 10^3 < Re < 10^5$  может быть вычислен по формулам, предложенным Мочаном и Ревзиной.

Определим число Re для регенеративной насадки при движении в ней воздуха со средней температурой  $(20 + 1020)/2 = 520$  °С и принятыми диаметре трубки 5 мм и скорости 6 м/с:

$$Re = \frac{6 \left( \frac{T}{T_0} \right) d}{\gamma} = \frac{6 \left( \frac{520 + 273}{273} \right) \cdot 0,005}{87,78 \cdot 10^{-6}} = 1053.$$

Это значение меньше, чем указано в справочнике как условие применимости формул, определяющих коэффициент сопротивления. Следовательно, можно ожидать, что действительные значения указанного коэффициента будут меньше рассчитанных по формулам.

Соотношение

$$\frac{S_1}{d_n} = \frac{6,51}{5} = 1,3 < 2 \text{ и } \frac{S_1 - d_n}{S_2 - d_n} = \frac{5,65 - 5}{6,51 - 5} = 0,43,$$

где  $S_1$  – расстояние между первым и вторым рядом трубок по ходу движения (межосевое) (см. рис. 2);  $S_2$  – межосевое расстояние по диагонали;  $d_n$  – диаметр трубки.

Это больше 0,114 и меньше 0,7, а значит, для расчета коэффициента сопротивления следует применить следующую формулу:

$$\begin{aligned} \zeta &= \left[ \left( 4,6 - 2,7 \frac{S_1 - d_n}{S_2 - d_n} \right) \left( 2 - \frac{S_1}{d_n} \right) + 3,2 \right] Re_{cp}^{-0,27} (Z + 1) = \\ &= \left[ \left( 4,6 - 2,7 \frac{5,65 - 5}{6,51 - 5} \right) \left( 2 - \frac{5,65}{5} \right) + 3,2 \right] \times \\ &\quad \times 1053^{-0,27} (77 + 1) = 40,95, \end{aligned}$$

где  $Z$  – число рядов трубок.

Динамический напор определим по формуле

$$\begin{aligned} P_d &= \frac{w_{cp}^2 \rho}{2} = \frac{\left( 6 \cdot \frac{520 + 273}{273} \right)^2 \left( 1,293 \cdot \frac{273}{520 + 273} \right)}{2} = \\ &= 67,93 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Тогда потери напора в блоке регенератора составят:

$$P_{пот.} = \zeta P_d = 40,95 \cdot 67,93 = 2781 \text{ Па}.$$

В результате получено приемлемое гидравлическое сопротивление, которое может компенсировать центробежный вентилятор высокого давления. Такого давления хватит для работы горелки в качестве скоростной.

Минимальное время перекидки получилось на третьей секции  $\tau_3 = 24,7$  с (см. табл. 2).

Приняв это время перекидки, приходим к варианту работы блока регенератора, когда не во всех секциях плавкая насадка будет плавиться полностью, часть ее будет оставаться кристаллической. При этом и кристаллизоваться будет не все плавкое ядро. Это обеспечит высокие коэффициенты теплообмена на стороне расплавленного металла во все периоды работы регенератора. При таком времени перекидки ресурс работы клапанов увеличивается более чем в 2 раза, по сравнению с зарубежными аналогами, у которых время перекидки составляет 10 с.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бирюков А.Б. Современные аспекты использования регенеративных горелок для отопления пламенных печей // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2015. № 11. С. 31 – 36.
2. Contarin F., Barcellos W.M., Saveliev A.V., Kennedy L.A. Energy extraction from a porous media reciprocal flow burner with embedded heat exchangers // Journal of Heat Transfer. 2005. Vol. 127. No. 2. P. 123 – 130.
3. Contarin F., Barcellos W.M., Saveliev A.V., Kennedy L.A. A porous media reciprocal flow burner with embedded heat exchangers // Proceedings of the 2003 ASME Summer Heat Transfer Conference, Las Vegas, Nevada, USA, July 21–23, 2003. Vol. 2. P. 35 – 42.
4. Chatys R. Bloom reheating with regenerative burners // Steel Times. 2000. Vol. 228. No. 2. P. 65.
5. Orman L.J. NKK's low NOx energy regenerative burner // Steel Times. 2000. Vol. 228. No. 2. P. 62.
6. Malcho M. Evaluating low NOx burners // Steel Times. 2000. Vol. 228. No. 2. P. 64 – 65.
7. Rafidi N., Blasiak W. Heat transfer characteristics of hitac heating furnace using regenerative burners // Applied Thermal Engineering. 2006. Vol. 26. No. 16. P. 2027 – 2034.
8. Nellis G.F., Klein S.A. Regenerative heat exchangers with significant entrained fluid heat capacity // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 49. No. 1 – 2. P. 329 – 340.
9. Saastamoinen J.J. Heat transfer in crossflow regenerators // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol. 42. No.17. P. 3205 – 3216.
10. Erk H.F., Dudukovic M.P. Phase-change heat regenerators: modeling and experimental studies // Aiche Journal. 1996. Vol. 42. No. 3. P. 791 – 808.
11. Mitrovic J., Stephan K. Mean fluid temperatures in direct contact heat exchangers without phase change // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1996. Vol. 39. No. 13. P. 2745 – 2750.
12. Chatys R., Orman L.J., Malcho M. Heat transfer enhancement in phase-change heat exchangers // Aviation. 2014. Vol. 18. No. 1. P. 40 – 43.
13. Radchenko N. A concept of the design and operation of heat exchangers with change of phase // Archives of Thermodynamics. 2004. Vol. 25. No. 4. P. 3 – 18.
14. А.с. 366 791 СССР. Гордон Я.М., Швыдкий В.С., Советкин В.Л., Ярошенко Ю.Г. Регенеративный теплообменник // Бюл. изобретений. 1988. № 2.
15. Теплотехнические расчеты металлургических печей: Учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд. / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев и др. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
16. Расчеты нагревательных печей / Э.М. Гольдфарб, А.Ф. Кравцов, И.И. Радченко и др. / Под ред. Н.Ю. Тайца. – Киев: Госуд. изд-во технической литературы УССР, 1958. – 420 с.
17. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник / Под ред. Б.Е. Неймарк. – М.– Л.: Энергия, 1967. – 240 с.
18. Тимошпольский В.И. Теплотехнические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. – М.: Наука и техника, 1995. – 296 с.
19. Тимофеев В.Н., Карасина Э.С. Излучение газов (номограммы) // Изд. ВТИ. 1948. № 9, 10.
20. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М. – Л.: Госуд. энергетическое изд-во, 1960. – 465 с.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 8, PP. 643–650.

## HEAT EXCHANGE BLOCK FOR REGENERATIVE BURNER

G.M. Druzhinin<sup>1,2</sup>, N.B. Loshkarev<sup>2</sup>, A.N. Loshkarev<sup>2</sup>,  
A.Kh. Mukhamadiev<sup>2</sup>, D.F. Muksinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”), Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** Modern regenerative burners for heating and thermal furnaces have rather larger sizes and small heat exchange period time that is connected with a low thermal capacity of the refractory materials applied to production of a nozzle. Considerable decrease in the sizes of nozzle and increase in heat exchange period time can be reached by using the hidden warmth of metals melting, which can be placed in the closed thin-walled reservoirs. In addition, the paper propose section design and a heat exchange unit enable to solve the problem of reducing the size of regenerative unit and increase the time of the swap, compared to existing regenerators that are used for air heating in regenerative burners. The proposed design can be used to create regenerative burners, a new class of highly effective, high temperature air preheating, and considerable time of swap. Such reservoirs, in which temperature of metal melting is equal, are packed in the sections. The next sections' melting temperature differs approximately

by 100 °C. It allows to maintain the fixed section temperature, which is equal the temperature of metal melting in this section, and removing from its surface or giving it, by products of combustion, warmth, which sets out in case of crystallization or is absorbed when metal kernel melts. Calculation of the swap time and the metal mass in one section, based on the joint solution of equations of heat balance and heat transfer between the heated air and the surface of tanks, allows to determine the overall dimensions of each section, filled with melting or crystallizing metal and its heat exchange surface. Fusible kernel mass, sizes of section and heat exchange period time calculations for regenerative block consisting of ten sections with a fusible kernel is given in this work. Calculation proves a possibility of decrease in dimensions of a regenerative nozzle for a 200 kW burner, and increase in heat exchange period time, while air heating temperature remains constant. The technical solution can be used in a thin-walled container in which are placed the metals with different heat of fusion. Large size regenerative burners hamper their use in heating and thermal furnaces, and fast parecidos leads to a decrease in period of operation of the changeover valve.

**Keywords:** regenerator, heat exchange device, heat utilization, regenerative burner, fusible kernel, fusible nozzle, hidden warmth of melting.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-643-650

REFERENCES

1. Biryukov A.B. Modern aspects of use of regenerative burners for heating of blast furnaces. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2015, no.11, pp. 31–36. (In Russ.).
2. Contarin F., Barcellos W.M., Saveliev A.V., Kennedy L.A. Energy extraction from a porous media reciprocal flow burner with embedded heat exchangers. *Journal of Heat Transfer*. 2005, vol. 127, no. 2, pp. 123–130.
3. Contarin F., Barcellos W.M., Saveliev A.V., Kennedy L.A. A porous media reciprocal flow burner with embedded heat exchangers. In: *Proceedings of the 2003 ASME Summer Heat Transfer Conference, Las Vegas, Nevada, USA, July 21–23, 2003*, vol. 2, pp. 35–42.
4. Chatys R. Bloom reheating with regenerative burners. *Steel Times*. 2000, vol. 228, no. 2, pp. 65.
5. Orman L.J. NKK's low NO<sub>x</sub> energy regenerative burner. *Steel Times*. 2000, vol. 228, no. 2, p. 62.
6. Malcho M. Evaluating low NO<sub>x</sub> burners. *Steel Times*. 2000, vol. 228, no. 2, pp. 64–65.
7. Rafidi N., Blasiak W. Heat transfer characteristics of hitac heating furnace using regenerative burners. *Applied Thermal Engineering*. 2006, vol. 26, no. 16, pp. 2027–2034.
8. Nellis G.F., Klein S.A. Regenerative heat exchangers with significant entrained fluid heat capacity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006, vol. 49, no. 1-2, pp. 329–340.
9. Saastamoinen J.J. Heat transfer in crossflow regenerators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1999, vol. 42, no. 17, pp. 3205–3216.
10. Erk H. F., Dudukovic M. P. Phase-change heat regenerators: modeling and experimental studies. *Aiche Journal*. 1996, vol. 42, no. 3, pp. 791–808.
11. Mitrovic J., Stephan K. Mean fluid temperatures in direct contact heat exchangers without phase change. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1996, vol. 39, no. 13, pp. 2745–2750.
12. Chatys R., Orman L.J., Malcho M. Heat transfer enhancement in phase-change heat exchangers. *Aviation*. 2014, vol. 18, no. 1, pp. 40–43.
13. Radchenko N. A concept of the design and operation of heat exchangers with change of phase. *Archives of Thermodynamics*. 2004, vol. 25, no.4, pp. 3–18.
14. Gordon Ya.M., Shvydkii V.S., Sovetkin V.L., Yaroshenko Yu.G. *Regenerativnyi teploobmennik* [Regenerative heat exchanger]. Certificate of authorship USSR no. 1 366 791. *Byulleten' izobretenii*. 1988, no. 2. (In Russ.).
15. Zobnin B.F., Kazyayev M.D., Kitaev B.I., Lisienko V.G., Telegin A.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* [Thermal technical calculations of metallurgical furnaces: Manual for universities]. Moscow: Metallurg, 1982, 360 p. (In Russ.).
16. Gol'dfarb E.M., Kravtsov A.F., Radchenko I.I. *Raschety nagrevatel'nykh pechei* [Calculations of heating furnaces]. Taitis N.Yu. ed. Kiev: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhnicheskoi literatury USSR, 1958, 420 p. (In Russ.).
17. *Fizicheskie svoystva stalei i splavov, primenyaemykh v energetike: Sprav.* [Physical properties of steels and alloys for energy industry: Reference book]. Neimark B.E. ed. Moscow-Leningrad: Energiya, 1967, 240 p. (In Russ.).
18. Timoshpol'skii V.I. *Teplotekhnicheskie osnovy metallurgicheskikh protsessov i agregatov vysshego tekhnicheskogo urovnya* [Fundamentals of metallurgical heat engineering processes and units of the highest technical level]. Moscow: Nauka i tekhnika, 1995, 296 p. (In Russ.).
19. Timofeev V.N., Karasina E.S. *Izluchenie gazov* (nomogrammy) [Emission gases (nomograms)]. Izd. VTI, 1948, no. 9–10. (In Russ.).
20. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Reference book on hydraulic resistances]. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1960, 465 p. (In Russ.).

Information about the authors:

- G.M. Druzhynin**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Science, Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (gorelka.D@yandex.ru)
- N.B. Loshkarev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"
- A.N. Loshkarev**, Senior Lecturer of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (mrAir@mail.ru)
- A.Kh. Mukhamadieva**, MA Student of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (halitovna93@gmail.com)
- D.F. Muksinov**, MA Student of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (chuparpollo@mail.ru)

Received April 12, 2017

УДК 62-784.23:697.982

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВАЛА ПЕЧНОГО ВЕНТИЛЯТОРА, ОСНАЩЕННОГО УСТРОЙСТВАМИ СТЕРЖНЕВОГО ТИПА\*

*Зайнуллин Л.А.<sup>1,2</sup>, д.т.н., профессор, генеральный директор (aup@vniimt.ru)*

*Калганов М.В.<sup>1</sup>, научный сотрудник (z1917@mail.ru)*

*Калганов Д.В.<sup>1</sup>, научный сотрудник (KalganovDV@mail.ru)*

*Спирин Н.А.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теплофизика  
и информатика в металлургии» (n.a.spirin@urfu.ru)*

<sup>1</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»

(620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 19)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Предложена конструкция устройства воздушного охлаждения вала печного вентилятора стержневого типа трех типоразмеров. В ходе исследований на экспериментальном стенде получены в критериальном виде зависимости конвективной теплоотдачи от поверхности этих устройств в окружающую среду при различной частоте вращения вала. Установлено, что в диапазоне изменения относительной длины стержней от 3,3 до 6,1 имеет место режим, близкий к автомоделному, где теплоотдача от их поверхности описывается универсальной зависимостью. В диапазоне изменения относительной длины стержней от 6,1 до 8,6 экспериментальные данные обобщены в виде степенной зависимости с коэффициентом пропорциональности, зависящим от величины отношения диаметра вала к внешнему диаметру устройства. Наименьший коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности оказался у СТ-346 с наибольшим внешним диаметром и, соответственно, наиболее длинными стержнями, что, по-видимому, связано с тем, что в процессе теплопередачи от вала в окружающую среду лимитирующим участком теплообмена является подвод тепла теплопроводностью вдоль оси стержней. Наибольший коэффициент теплоотдачи в сопоставимых условиях наблюдается у СТ-286 со средними стержнями, где более сбалансированы подвод тепла теплопроводностью вдоль стержней и отвод его от их внешних поверхностей конвекцией в окружающую среду. При сравнении полученных данных по СТ-286 и СТ-220 было установлено, что при одинаковой частоте вращения вала коэффициент теплоотдачи по поверхности у СТ-286 больше, чем у СТ-220 примерно на 15 – 20 %, что связано с уменьшением интенсивности обдувки воздухом укороченных стержней СТ-220 вследствие снижения их средней линейной скорости движения по окружности. Из анализа полученных результатов следует, что наиболее эффективным в сопоставимых условиях является устройство с максимальным диаметром 346 мм, где рассеиваемая тепловая мощность в установившемся режиме больше в 1,1 раза, чем у устройства диаметром 286 мм и в 2,0 раза больше, чем у устройства диаметром 220 мм. Полученные материалы могут быть полезны при разработке и проектировании нагревательных и термических печей с использованием принудительной циркуляции теплоносителя.

**Ключевые слова:** устройство охлаждения вала вентилятора, печной высокотемпературный вентилятор, конвективный теплообмен.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-649-653

Постоянное совершенствование конструкций высокотемпературных вентиляторов в настоящее время связано с повышением к ним требований по энергоэффективности и надежности их работы. Энергоэффективность вентиляторов достигается за счет выбора оптимальных аэродинамических характеристик, обеспечивающих наименьшие затраты на организацию движения теплоносителя по циркуляционному контуру печей с конвективным типом теплообмена [1 – 22].

Эксплуатационная надежность печных вентиляторов определяется во многом удовлетворительными условиями работы наиболее механически нагруженного элемента – узла подшипников, находящегося под постоянным воздействием нагрева за счет передачи тепла теплопроводностью вдоль вращающегося вала.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке, постановление № 211 Правительства РФ, контракт № 02.A03.21.0006.

Необходимый тепловой режим узла подшипников в этом случае поддерживают путем оснащения вала устройствами охлаждения различных конструкций.

В ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ») совместно с Уральским федеральным университетом (УрФУ) было разработано устройство воздушного охлаждения вала стержневого типа (рис. 1), состоящее из втулки 1 и равномерно расположенных по ее радиусу стержней 2. Устройство представляет из себя теплообменник, где теплоотдача от поверхности стержней интенсифицируется за счет их вращения.

На экспериментальном стенде ОАО «ВНИИМТ» [23] были определены закономерности теплоотдачи от поверхности стержневых устройств трех типоразмеров в зависимости от частоты вращения вала вентилятора. Разработанные устройства выполнены в натуральную

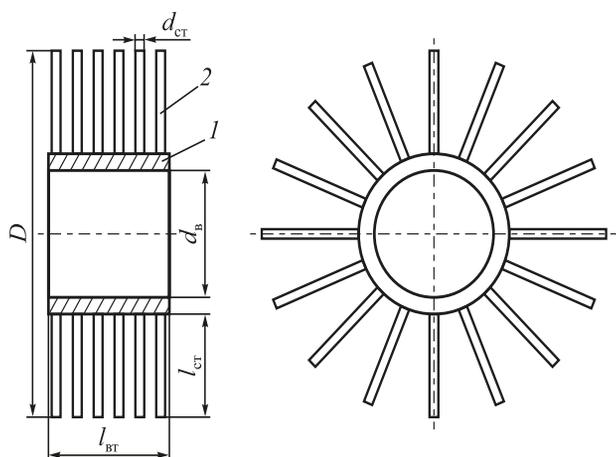


Рис. 1. Схема устройства воздушного охлаждения вала стержневого типа:  
1 – втулка; 2 – стержень

Fig. 1. Scheme of the rod-type air cooling shaft device:  
1 – sleeve; 2 – rod

величину и в дальнейшем применялись в конструкциях высокотемпературных печных вентиляторов.

В таблице представлены геометрические размеры исследованных устройств стержневого типа.

Результаты исследований на экспериментальном стенде устройств охлаждения (рис. 2) после обработки соответствуют следующим зависимостям.

Для устройства с внешним диаметром 346 мм (СТ-346):

**Геометрические размеры стержневых устройств трех типоразмеров**

**Geometrical dimensions of rod devices of three standard sizes**

Показатель	Обозначение устройства		
	СТ-346	СТ-286	СТ-220
Внешний диаметр $D$ , мм	346	286	220
Диаметр вала вентилятора $d_b$ , мм	110	110	110
Отношение диаметров $D/d_b$	0,318	0,385	0,5
Число стержней в одном ряду	16	16	16
Число рядов	5	5	5
Общее число стержней	80	80	80
Длина единичного стержня $l_{ст}$ , мм	103	73	40
Диаметр стержня $d_{ст}$ , мм	12	12	12
Отношение длины стержня к его диаметру $l_{ст}/d_{ст}$	8,6	6,1	3,3
Длина втулки устройства охлаждения $L_{вт}$ , мм	110	110	110
Теплообменная площадь устройства, м <sup>2</sup>	0,3485	0,2580	0,1586
Применяемый материал	Ст. 45	Ст. 45	Ст. 45

$$Nu = 0,05399 Re^{0,8} \tag{1}$$

Для устройств с внешними диаметрами 286 мм (СТ-286) и 220 мм (СТ-220) зависимость оказалась универсальной:

$$Nu = 0,07553 Re^{0,8}, \tag{2}$$

где  $Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_b}$ ;  $Re = \frac{DW}{\nu} = \frac{\pi D^2 n}{\nu}$ .

Здесь  $Nu$  – число Нуссельта;  $Re$  – число Рейнольдса;  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи от открытой поверхности устройства охлаждения, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $D$  – внешний диаметр устройства, м;  $\lambda_b$  – коэффициент теплопроводности окружающей среды, Вт/(м·К);  $W$  – линейная скорость движения внешней образующей вращающегося устройства, м/с;  $n$  – угловая скорость вращения устройства, 1/с;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости окружающей среды, м<sup>2</sup>/с.

Полученные экспериментальные зависимости были обобщены в виде

$$Nu = C Re^{0,8}, \tag{3}$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от соотношения  $d_b/D$  рассматриваемых устройств.

Изменение коэффициента  $C$  от  $d_b/D$  приведено на рис. 3. Зависимость справедлива в исследованном диапазоне  $0,318 \leq d_b/D \leq 0,5$ .

В диапазоне изменения  $0,385 \leq d_b/D \leq 0,5$ , что соответствует уменьшению относительной длины стержней

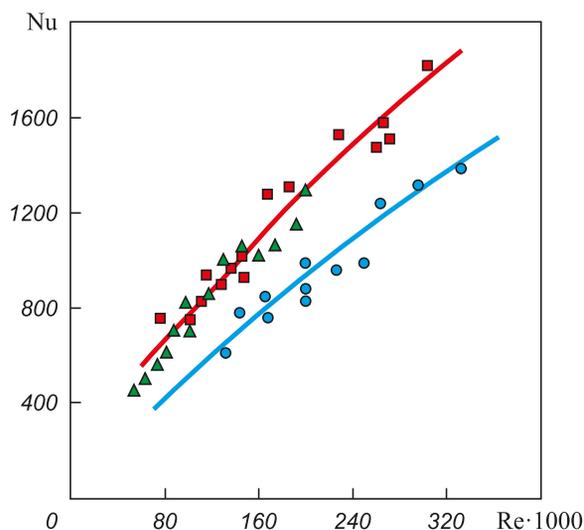


Рис. 2. Зависимость величины числа  $Nu_a$  от числа  $Re$  для условий конвективного теплообмена между поверхностью вращающегося устройства охлаждения стержневого типа вала печного вентилятора и окружающей средой:  
● – СТ-346; ■ – СТ-286; ▲ – СТ-220

Fig. 2. The number  $Nu_a$  dependence on the number  $Re$  for convective heat exchange conditions between surface of the rotating furnace fan shaft rod-type cooling device and the environment:  
● – СТ-346; ■ – СТ-286; ▲ – СТ-220

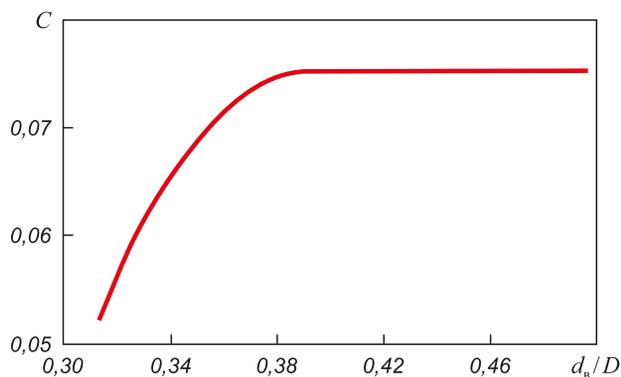


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $C$  от соотношения диаметров вала и внешнего диаметра устройства охлаждения стержневого типа

Fig. 3. Dependence of  $C$  coefficient on the shaft diameter and outer diameter of rod-type cooling device

$l_{ст}/d_{ст}$  с 6,1 до 3,3, имеет место режим, близкий к автомобильному, где теплоотдача для данного типа устройства описывается универсальной степенной зависимостью с постоянным коэффициентом  $C = 0,07553$ .

В исследованном диапазоне  $0,318 \leq d_b/D \leq 0,385$ , что соответствует изменению относительной длины стержней от 8,6 до 6,1, автомобильного режима теплоотдачи не наблюдается и коэффициент  $C$  является величиной переменной.

На рис. 4 представлены зависимости среднего коэффициента теплоотдачи по поверхности устройств стержневого типа от частоты вращения вала вентилятора.

Наименьший коэффициент теплоотдачи оказался у СТ-346 с наибольшим внешним диаметром и, соот-

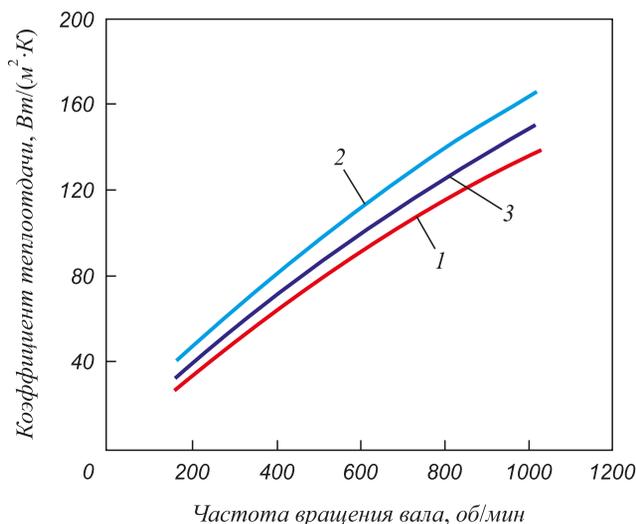


Рис. 4. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи поверхности устройств охлаждения стержневого типа от частоты вращения вала печного вентилятора:  
1 – СТ-346; 2 – СТ-286; 3 – СТ-220

Fig. 4. Dependence of average heat transfer coefficient from rod-type cooling devices surface on shaft rotating speed of furnace fan:  
1 – СТ-346; 2 – СТ-286; 3 – СТ-220

ветственно, наиболее длинными стержнями ( $l_{ст}/d_{ст} = 8,6$ ). Это явление связано, по-видимому, с тем, что в процессе теплопередачи от вала в окружающую среду лимитирующим участком теплообмена в этом случае является подвод тепла теплопроводностью вдоль оси стержней.

Наибольший коэффициент теплоотдачи в сопоставимых условиях наблюдается у СТ-286 со стержнями  $l_{ст}/d_{ст} = 6,1$ , где более сбалансированы подвод тепла теплопроводностью через внутренние сечения стержней и отвод его от их внешних поверхностей конвекцией в окружающую среду.

Сравнивая полученные данные по СТ-286 и СТ-220, было установлено, что при одинаковой частоте вращения вала, коэффициент теплоотдачи по поверхности у СТ-286 больше, чем у СТ-220 примерно на 15 – 20 %, что вполне объяснимо уменьшением интенсивности обдувки воздухом укороченных стержней СТ-220 вследствие снижения их средней линейной скорости движения по окружности.

На рис. 5 представлены графики, показывающие эффективность отвода тепла устройствами стержневого типа при изменении частоты их вращения.

Расчет произведен при следующих параметрах: диаметр вала  $d_b = 110$  мм; длина вала, охватываемая устройством охлаждения (длина втулки  $l_{вт}$ ) равна 110 мм; разность средней температуры поверхности устройства и окружающей среды составляет 50 °С.

Из рассмотрения полученных результатов следует, что наиболее эффективным в сопоставимых условиях все же является устройство с максимальным диаметром СТ-346, где рассеиваемая тепловая мощность в установившемся режиме, пропорциональна произведению среднего

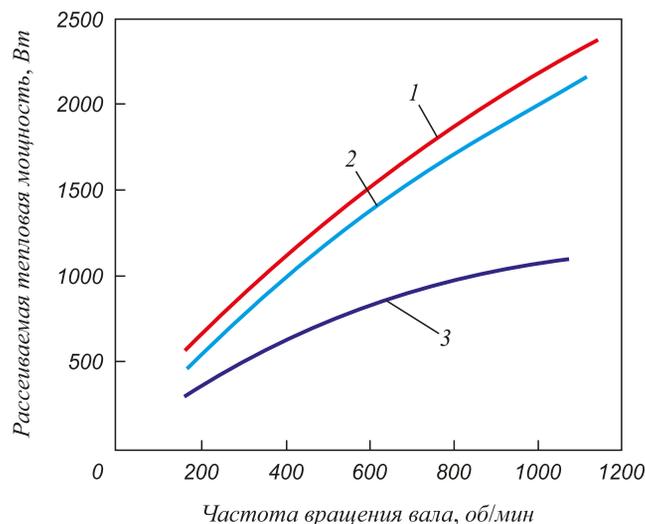


Рис. 5. Тепловая мощность, рассеиваемая с помощью устройств охлаждения вала стержневого типа в зависимости от частоты вращения:  
1 – СТ-346; 2 – СТ-286; 3 – СТ-220

Fig. 5. The thermal power dissipated by rod-type shaft cooling devices depending on rotation speed:  
1 – СТ-346; 2 – СТ-286; 3 – СТ-220

коэффициента теплоотдачи и теплообменной площади стержней, оказалась максимальной. Наименьшая рассеиваемая тепловая мощность в сопоставимых условиях наблюдается у СТ-220 с наиболее короткими стержнями.

Увеличение относительной длины стержня от 3,3 (СТ-220) до 6,1 (СТ-286) приводит к существенному повышению рассеиваемой тепловой мощности. Так, например, при частоте вращения вала 1000 об/мин мощность увеличивается с 1100 до 2000 Вт, т. е. в 1,8 раза. Тогда как относительное удлинение стержней с 6,1 (СТ-286) до 8,6 (СТ-346) позволяет увеличить тепловую мощность лишь в 1,1 раза до 2200 Вт, что вполне согласуется с вышеизложенным анализом полученных данных.

**Выводы.** Таким образом, в результате исследований установлено, что в диапазоне изменения относительной длины стержней от 3,3 до 6,1 имеет место режим, близкий к автотемпературному, где теплоотдача от их поверхности описывается универсальной зависимостью.

В диапазоне изменения относительной длины стержней от 6,1 до 8,6 полученные результаты обобщены в виде степенной зависимости  $Nu = CRe^{0,8}$  с коэффициентом пропорциональности, зависящим от соотношения величин диаметра вала и внешнего диаметра устройства  $d_b/D$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аптерман В.Н., Тымчак В.М. Протяжные печи. – М.: Металлургия, 1969. – 320 с.
2. Дружинин Г.М., Ашихмин А.А., Маслов П.В. и др. Термическая печь с комбинированной системой отопления // *Сталь*. 2015. № 3. С. 70 – 74.
3. Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В. и др. Создание печных электронагревателей с радиационно-конвективным способом теплообмена // *Сталь*. 2015. № 3. С. 75 – 77.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
5. Казанцев Е.И. Промышленные печи. – М.: Металлургия, 1975. – 367 с.
6. Зайнуллин Л.А., Спирин Н.А., Калганов М.В., Калганов Д.В. Применение центробежных вентиляторов при работе термической конвективной печи в режиме охлаждения // *Сталь*. 2015. № 3. С. 78 – 80.
7. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 175 с.
8. Bloom W. Jet heat reparation of waste furnace gases on strip lines // *Iron and Steel Engineer*. 1979. No. 12. P. 32 – 37.
9. Martin H. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces // *Advances in Heat Transfer*. 1977. Vol. 13. P. 1 – 60.
10. Launder B.E., Rodi W. The turbulent wall jet // *Prog. Aerospace Science*. 1981. Vol. 19. P. 81 – 128.
11. Кузьмин И.И., Зубков С.В., Лыжин Ю.А. Совершенствование конструкции циркуляционного вентилятора колпаковых печей // *Сталь*. 2007. № 8. С. 89 – 91.
12. Султанов Н.Л., Мироненков Е.И., Жиркин Ю.В. Управление тепловым состоянием подшипниковых опор на стане-тандеме 2000 холодной прокатки ОАО ММК // *Сталь*. 2014. № 4. С. 71 – 73.
13. Кутлубаев И.М., Мацко Е.Ю., Усов И.Г. Совершенствование охлаждения листового проката // *Сталь*. 2015. № 8. С. 44 – 50.
14. Демин К.К., Паршиков С.Ф. Совершенствование технологии охлаждения ленты после светлого отжига в одностопной колпаковой печи // *Сталь*. 2008. № 4. С. 69.
15. Zareba S., Wolff A., Jelali M. Mathematical modelling and parameter identification of a stainless steel annealing furnace // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2016. Vol. 60. P. 15 – 39.
16. Strommer S., Niederer M., Steinboeck A., Kugi A. A mathematical model of a direct-fired continuous strip annealing furnace // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 69. P. 375 – 389.
17. Feng H.J., Chen L.G., Xie Z.H., Sun F.R. Constructal designs for insulation layers of steel rolling reheating furnace wall with convective and radiative boundary conditions // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 100. P. 925 – 931.
18. Blaszcuk A., Nowak W. Heat transfer behavior inside a furnace chamber of large-scale supercritical CFB reactor // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 87. P. 464 – 480.
19. Feng H.J., Chen L.G., Xie Z.H., Sun F.R. Constructalentransy optimizations for insulation layer of steel rolling reheating furnace wall with convective and radiative boundary conditions // *Chinese Science Bulletin*. 2014. Vol. 59. P. 2470 – 2477.
20. Emadi A., Saboonchi A., Taheri M., Hassanpour S. Heating characteristics of billet in a walking hearth type reheating furnace // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 63. P. 396 – 405.
21. Prieto M.M., Fernandez F.J., Rendueles J.L. Development of stepwise thermal model for annealing line heating furnace // *Ironmaking & Steelmaking*. 2005. Vol. 32. P. 165 – 170.
22. Kim Y.D., Kang D.H., Kim W.S. Experimental and numerical studies on the thermal analysis of the plate in indirectly fired continuous heat treatment furnace // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009. Vol. 23. P. 631 – 642.
23. Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В. Исследование эффективности охлаждения вращающегося вала печного высокотемпературного вентилятора // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2015. № 9. С. 662 – 666.

Поступила 12 апреля 2017 г.

### STUDY OF THE COOLING EFFICIENCY OF FURNACE FAN'S SHAFT EQUIPPED WITH DEVICES OF ROD TYPE

L.A. Zainullin<sup>1,2</sup>, M.V. Kalganov<sup>1</sup>, D.V. Kalganov<sup>1</sup>, N.A. Spirin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>OJSC Scientific Research Institute of metallurgical heat engineering (VNIIMT), Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The design of the air cooling device for the furnace fan's shaft of rod type of three standard sizes is proposed. During the experiments at

the experimental stand, the convective heat transfer from the surface of these devices to the environment at a different shaft rotation frequency was obtained critically. It was established that in the range of variation of the relative length of the rods from 3.3 to 6.1, a regime close to the self-similar mode takes place, where the heat transfer from their surface can be described by a universal dependence. In the range of variation of the relative length of the rods from 6.1 to 8.6, the experimental data are generalized in the form of a power law with a proportionality coefficient that depends on the ratio of the shaft diameter to the outer diameter of the device. The least coefficient of heat transfer from the

external surface was found in ST-346 with the largest outside diameter and, correspondingly, the longest rods, which is apparently due to the fact that in the process of heat transfer from the shaft to the environment, the limiting heat exchange section is the heat supply by heat conduction along of the rods axis. The highest heat transfer coefficient under comparable conditions is observed in ST-286 with medium rods, where the heat supply is more balanced by thermal conductivity along the rods and its removal from their external surfaces by convection to the environment. When comparing the data obtained with CT-286 and CT-220, it was found that at the same shaft rotation frequency, the heat transfer coefficient over the surface of ST-286 is about 15–20 %, which is associated with a decrease in intensity of air blowing of shortened rods of ST-220 due to the decrease in their average linear speed of movement along the circumference. From the analysis of the obtained results, it follows that the most effective in comparable conditions is the device with a maximum diameter of 346 mm, where the dissipated thermal power in the steady state is 1.1 times higher than that of the device with a diameter of 286 mm and 2.0 times greater than for devices with a diameter of 220 mm. The obtained materials can be used in the design of heating and thermal furnaces using forced coolant circulation.

**Keywords:** cooling fan shaft, furnace high-temperature fan, convective heat transfer.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-651-655

## REFERENCES

1. Apterman V.N., Tymchak V.M. *Protyazhnye pechi* [Continuous furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 320 p. (In Russ.).
2. Druzhinin G.M., Ashikhmin A.A., Maslov P.V., Popov A.B., Loshkarev N.B., Galkin S.A. Furnace with a hybrid heating system. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 216–220.
3. Zainullin L.A., Kalganov M.V., Kalganov D.V., Loshkarev N.B., Fatkhutdinov A.R., Pugin A.I. Furnace electric heaters with radiant-convective heat transfer. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 221–223.
4. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Energiya, 1977, 343 p. (In Russ.).
5. Kazantsev E.I. *Promyshlennye pechi* [Industrial Furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 367p. (In Russ.).
6. Zainullin L.A., Kalganov M.V., Kalganov D.V., Spirin N.A. Using centrifugal fans in the cooling of convective furnaces. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 224–225.
7. Solomakhova T.S., Chebysheva K.V. *Tsentrobezhnye ventilyatory: spravochnik* [Centrifugal fans: Handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980, 175 p. (In Russ.).
8. Bloom W. Jet heat reparation of waste furnace gases on strip lines. *Iron and Steel Engineer*. 1979, no. 12, pp. 32–37.
9. Martin H. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. *Advances in Heat Transfer*. 1977, vol. 13, pp. 1–60.
10. Launder B.E., Rodi W. The turbulent wall jet. *Prog. Aerospace Science*. 1981, vol. 19, pp. 81–128.
11. Kuz'min I.I., Zubkov S.V., Lyzhin Yu.A. Improving of the circulation fan design in bell furnaces. *Stal'*. 2007, no. 8, pp. 89–91. (In Russ.).
12. Sultanov N.L., Mironenkov E.I., Zhirkin Yu.V. Managing of thermal state of bearings on cold rolling tandem-mill 2000 of MMK OMO. *Stal'*. 2014, no. 4, pp. 71–73. (In Russ.).
13. Kutlubaev I.M., Matsko E.Yu., Usov I.G. Improvement of cooling of rolled products. *Stal'*. 2015, no. 8, pp. 44–50. (In Russ.).
14. Demin K.K., Parshikov S.F. Improvement of the tape cooling technologies after bright annealing in a one-foot bell furnace. *Stal'*. 2008, no. 4, p. 69. (In Russ.).
15. Zareba S., Wolff A., Jelali M. Mathematical modelling and parameter identification of a stainless steel annealing furnace. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2016, vol. 60, pp. 15–39.
16. Strommer S., Niederer M., Steinboeck A., Kugi A. A mathematical model of a direct-fired continuous strip annealing furnace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014, vol. 69, pp. 375–389.
17. Feng H.J., Chen L.G., Xie Z.H., Sun F.R. Constructal designs for insulation layers of steel rolling reheating furnace wall with convective and radiative boundary conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 100, pp. 925–931.
18. Blaszcuk A., Nowak W. Heat transfer behavior inside a furnace chamber of large-scale supercritical CFB reactor. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, vol. 87, pp. 464–480.
19. Feng H.J., Chen L.G., Xie Z.H., Sun F.R. Constructal entransy optimizations for insulation layer of steel rolling reheating furnace wall with convective and radiative boundary conditions. *Chinese Science Bulletin*. 2014, vol. 59, pp. 2470–2477.
20. Emadi A., Saboonchi A., Taheri M., Hassanpour S. Heating characteristics of billet in a walking hearth type reheating furnace. *Applied Thermal Engineering*. 2014, vol. 63, pp. 396–405.
21. Prieto M.M., Fernandez F.J., Rendueles J.L. Development of stepwise thermal model for annealing line heating furnace. *Ironmaking & Steelmaking*. 2005, vol. 32, pp. 165–170.
22. Kim Y.D., Kang D.H., Kim W.S. Experimental and numerical studies on the thermal analysis of the plate in indirectly fired continuous heat treatment furnace. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009, vol. 23, pp. 631–642.
23. Zainullin L.A., Kalganov M.V., Kalganov D.V. Investigation of cooling efficiency of the rotating high temperature furnace fan. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 9, pp. 662–666. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by Act 211 of the Government of the Russian Federation, contract no. 02.A03.21.0006.

### Information about the authors:

**L.A. Zainullin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Direktor (aup@vniimt.ru)

**M.V. Kalganov**, Research Associate (z1917@mail.ru)

**D.V. Kalganov**, Research Associate (KalganovDV@mail.ru)

**N.A. Spirin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (n.a.spirin@urfu.ru)

Received April 12, 2017

## КИНЕТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕГИДРАТАЦИИ ЛИСАКОВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА\*

*Карелин В.Г.<sup>1</sup>, к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории грануляции  
металлургических расплавов (karelin@lab62.vniimt.ru)*

*Зайнуллин Л.А.<sup>1,2</sup>, д.т.н., профессор, генеральный директор (aup@vniimt.ru)*

*Епишин А.Ю.<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории грануляции  
металлургических расплавов (epishin.artem@yandex.ru)*

<sup>1</sup>ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» («ВНИИМТ») (620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Лисаковское месторождение бурого железняка (Кустанайская область, Казахстан) разрабатывается открытым способом, что обеспечивает более дешевую добычу руды. На фабрике ЛФ ТОО «Оркен» гравитационно-магнитным способом производят обогащение руды с получением гравитационно-магнитного концентрата, содержащего 48 – 49 % Fe, 10 – 12 % SiO<sub>2</sub>, 4,5 – 5,5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,7 – 0,9 % P. Полученный продукт поступает на агломерацию в АО «АрселорМиттал Темиртау» (г. Темиртау, Казахстан). Из-за повышенного содержания фосфора в гравитационно-магнитном концентрате спрос на него ограничен. В лисаковском концентрате содержится значительное количество гидратной влаги (до 12 %). Большая часть влаги находится в виде гидратов железа и разлагается при умеренной температуре 320 – 350 °С. Другая часть, судя по всему, связана с фосфорсодержащим компонентом, разлагающимся при повышенной температуре. При этом в процессе окислительного обжига происходит образование свободного оксида фосфора. Проведены исследования разложения гидратного фосфорсодержащего компонента в лисаковском железорудном концентрате с целью определения кинетики процесса. Удаление фосфора из железорудного концентрата на стадии подготовки к металлургическому переделу возможно после высокотемпературного окислительного обжига материала и последующего сернокислотного выщелачивания. Из исходного концентрата гидрометаллургическим способом фосфор не выщелачивается. Необходимо при помощи высокой температуры разрушить химическую связь и перевести фосфор в свободный оксид. От полноты разложения гидратного фосфорсодержащего компонента при обжиге зависит качество последующей сернокислотной обработки обожженного продукта. Выделение высокотемпературной гидратной влаги из лисаковского концентрата происходит ступенчато. С ростом температуры прокаливания скорость высокотемпературной дегидратации уменьшается, что объясняется замедлением диффузии водяных паров при дегидратации через слой материала, который уплотняется при увеличении температуры.

**Ключевые слова:** руда, концентрат, обжиг, кислота, выщелачивание, фосфор, компонент, гидратная влага, кинетика, разложение, температура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-656-661

Лисаковский железорудный концентрат представлен бурым железняком [1, 2] и имеет повышенное содержание фосфора (до 0,8 – 0,9 %), что сдерживает масштаб производства концентрата, в котором содержатся также гидраты (до 12 %), имеющие различную природу. Основная доля гидратов связана с оксидом железа, а меньшая (около 1,0 – 1,5 %) с фосфорсодержащим компонентом. Гидраты железа разлагаются с выделением гидратной влаги при относительно пониженной температуре 320 – 350 °С. Гидраты фосфорсодержащего компонента разлагаются при температуре 800 °С и выше [3 – 5].

Выполнены многочисленные исследования по изучению проблемы обесфосфоривания лисаковских руд [6 – 11]. Для удаления фосфора из лисаковского концентрата перед металлургическим переделом разработана технология, в основе которой лежит высоко-

котемпературный окислительный обжиг материала с последующим выщелачиванием фосфора водным раствором слабой серной кислоты [12 – 14]. Из исходного концентрата фосфор не переходит в раствор, так как находится в связанном состоянии. В процессе окислительного обжига фосфорсодержащий компонент разлагается (дегидратируется), в результате чего фосфор в виде оксида становится свободным и может быть переведен в раствор, например, слабой (5 %-ной) серной кислоты [3 – 5].

Вопросы, связанные с низкотемпературной дегидратацией лисаковского концентрата, рассмотрены ранее [15, 16]. Ниже представлены результаты экспериментального исследования кинетики высокотемпературной дегидратации лисаковского гравитационно-магнитного концентрата. Исследование проведено термометрическим методом [17 – 19] на приборе NETZSCH STA 449 C Jupiter, на котором одновременно при изменяющейся температуре авто-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке, постановление № 211 Правительства РФ, контракт № 02.А03.21.0006.

матически определяются изменение массы (термогравиметрия) и калориметрические эффекты (дифференциальная сканирующая калориметрия) в образце. Встроенные электромагнитные компенсационные микровесы с верхней загрузкой измеряют массу образца в граммах с точностью до четвертого знака после запятой. Вакуум-плотная конструкция камеры с образцом обеспечивает измерения в заданной газовой атмосфере. Электрическая печь прибора позволяет проводить измерения при температурах от 20 до 1650 °С.

В качестве образца использовали частицы лисаковского гравитационно-магнитного концентрата крупностью до 3 мм и массой около 5 г, имеющих округлую форму. Нагрев пробы производили по следующему режиму: от комнатной температуры до 700 °С со скоростью 50 °С/мин, далее следовала выдержка до постоянного веса, после чего с такой же скоростью увеличивали температуру до 800 °С с выдержкой 30 мин и затем ступенчато через 50 °С до температуры 1000 °С с выдержками по 30 мин на каждой температурной ступени.

Уменьшение массы образца на каждой температурной ступени связано с удалением высокотемпературной гидратной влаги, содержащейся в фосфорсодержащем компоненте концентрата. В специальном опыте пары, выделяющиеся при высокой температуре, были уловлены силикагелем, что атрибутирует их как воду. Скорость изменения массы пробы характеризует кинетику разложения этого гидратированного фосфорсодержащего компонента. Длительность выдержки 30 мин на каждой температурной ступени была достаточной для стабилизации изменения массы образца, т. е. завершения процесса высокотемпературной дегидратации при данной температуре. Внешняя и низкотемпературная гидратная влага удалялись в ходе нагрева пробы до 700 °С.

На рис. 1 представлены изменения массы образца во времени на всех температурных ступенях. Как видно, выделение высокотемпературной гидратной влаги из лисаковского концентрата происходит ступенчато: при каждой температуре выделяется определенная доля гидратной влаги. Если за 100 % принять суммарную массу

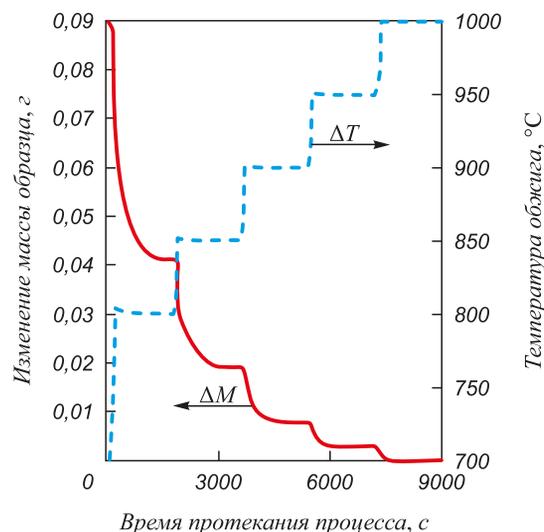


Рис. 1. Зависимость изменения массы образца во времени в заданном температурном режиме

Fig. 1. Dependence of change over time of the sample mass in a given temperature regime

высокотемпературной гидратной влаги, выделившейся в диапазоне температур 800 – 1000 °С, то доля такой гидратной влаги, удаленной при разных температурах, составляет, %: 54,5 при 800 °С, 24,4 при 850 °С, 12,2 при 900 °С, 5,6 при 950 °С и 3,3 при 1000 °С (см. таблицу). На каждой температурной ступени калориметрическая система прибора зафиксировала эндотермические эффекты, совпадающие с выделением высокотемпературной гидратной влаги. Как видно из представленных данных, более половины общей высокотемпературной гидратной влаги выделяется при 800 °С. С увеличением температуры доля выделившейся гидратной влаги на каждой температурной ступени резко уменьшается и при 1000 °С составляет всего 3,3 %. Если полученные данные проэкстраполировать в область температур выше 1000 °С, то последняя порция высокотемпературной гидратной влаги будет удалена при 1050 – 1100 °С. Однако в этой области температур уже начинает проявляться процесс спекания лисаковского концентрата, что не позволяет проводить прямые измерения при таких повышенных температурах.

**Результаты исследования кинетики высокотемпературной дегидратации лисаковского железорудного концентрата**

**Research results of high-temperature dehydration kinetics of Lisakovsk iron ore concentrate**

Показатель	Температура обжига концентрата, °С				
	800	850	900	950	1000
Доля выделившейся высокотемпературной гидратной влаги, %	54,5	24,4	12,2	5,6	3,3
Максимальная скорость высокотемпературной дегидратации, 10 <sup>-5</sup> , г/с	5,8	4,8	3,3	1,5	1,0
Длительность высокотемпературной дегидратации, с	1250	1110	910	670	420

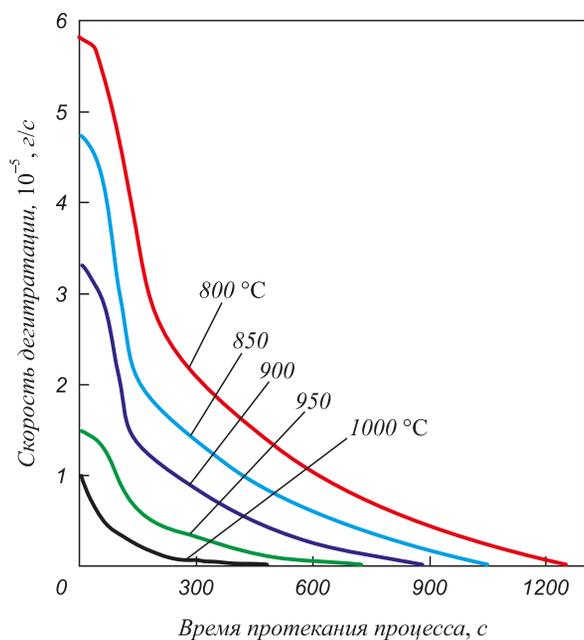


Рис. 2. Зависимость скорости высокотемпературной дегидратации лисаковского концентрата от времени протекания процесса при различных температурах

Fig. 2. Dependence of the rate of high-temperature dehydration of Lisakovsk concentrate from process time at different temperatures

На рис. 2 представлены кривые скорости высокотемпературной дегидратации лисаковского концентрата при различных температурах и их изменение во времени. С увеличением температуры величина максимальной скорости процесса уменьшается (см. таблицу). Такой характер зависимости объясняется некоторым замедлением диффузии водяных паров при дегидратации через слой уже дегидратированного материала, который при увеличении температуры претерпевает твердофазное уплотнение. Частично диффузия водяных паров через слой дегидратированного материала облегчается при образовании трещин в этом слое, которые появляются на частицах концентрата при высоких температурах.

Для каждой температурной ступени рассчитали изменение степени высокотемпературной дегидратации во времени (доли единицы) как отношение массы удаленной гидратной влаги от начала температурной стадии до текущего времени процесса к общей массе выделившейся гидратной влаги на данной температурной ступени. На рис. 3 представлены кривые изменения степени высокотемпературной дегидратации во времени при различных температурах. Как видно, при одинаковой длительности процесса с увеличением температуры степень высокотемпературной дегидратации возрастает, а при значении степени дегидратации 1,0 разложение фосфорсодержащего компонента завершается для каждой температурной ступени. Определение времени окончания дегидратации методом взвешивания массы было затруднено вследствие достижения

предела точности электронных весов. Поэтому длительность высокотемпературной дегидратации на различных температурных стадиях была определена следующим способом.

Известно, что процессы дегидратации подчиняются закономерностям гетерогенных реакций, в которых образование реакционной зоны протекает очень быстро по сравнению со скоростью химической реакции и не лимитирует последнюю [20]. Для таких реакций скорость процесса монотонно уменьшается во времени, что и видно на рис. 2. Поэтому для реакций дегидратации твердых сферических частиц лисаковского концентрата кинетика процесса подчиняется закону [20]

$$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = K_i \tau,$$

где  $\alpha$  – степень высокотемпературной дегидратации, доли единицы;  $\tau$  – время протекания процесса дегидратации, с;  $K_i$  – константа скорости высокотемпературной дегидратации, с<sup>-1</sup> (в расчете на 1 г исходного материала).

На рис. 4 представлена зависимость величины  $A = 1 - (1 - \alpha)^{1/3}$  от времени протекания процесса высокотемпературной дегидратации  $\tau$  при различных температурах. Как видно, такие зависимости имеют линейный вид. Экстраполируя эти зависимости до значения  $A = 1,0$  (при  $\alpha = 1,0$ ), определены значения длительности ( $\tau_i$ , с) дегидратации при разных температурах (см. таблицу). Из таблицы следует, что с увеличением температуры от 800 до 1000 °C длительность процесса

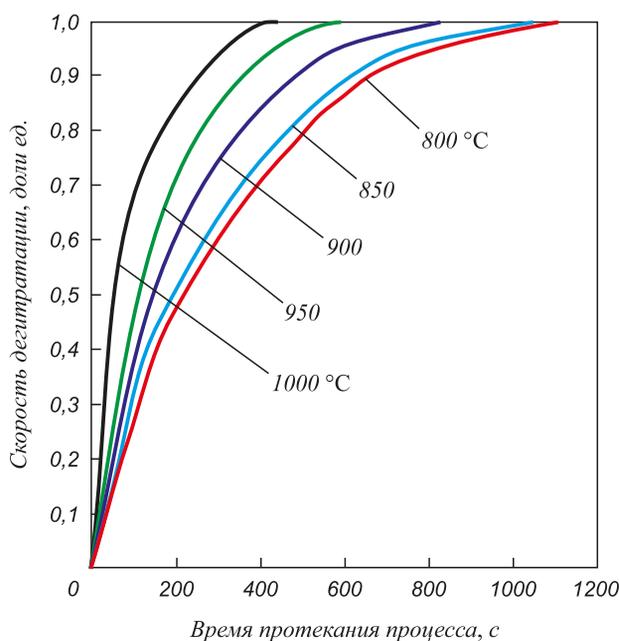


Рис. 3. Зависимость степени высокотемпературной дегидратации лисаковского концентрата от времени протекания процесса при различных температурах

Fig. 3. Dependence of high-temperature dehydration degree of Lisakovsk concentrate on process time at different temperatures

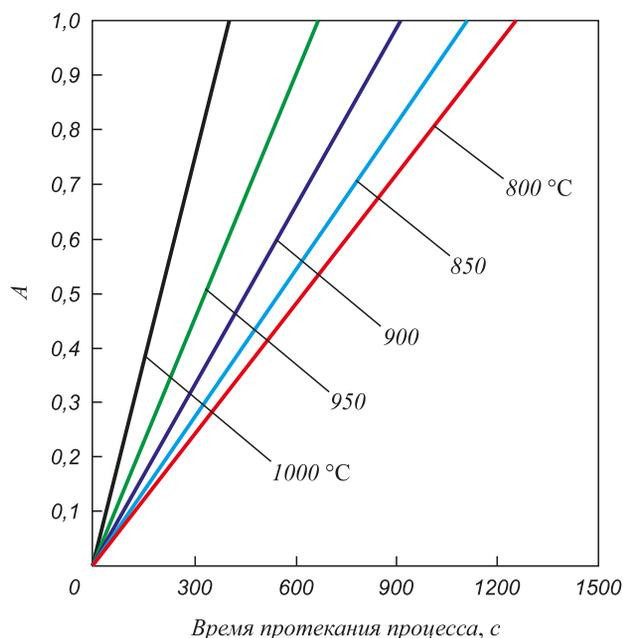


Рис. 4. Зависимость величины  $A = 1 - (1 - \alpha)^{1/3}$  от времени протекания процесса высокотемпературной дегидратации при различных температурах

Fig. 4. Dependence of  $A = 1 - (1 - \alpha)^{1/3}$  on process time of high-temperature dehydration at different temperatures

высокотемпературной дегидратации на данной температурной ступени монотонно уменьшается от 1250 до 420 с. Указанные времена для каждой температуры коррелируют с окончанием проявления эндотермических эффектов, зарегистрированных калориметрической системой прибора.

Ниже приведены расчетные величины констант скорости высокотемпературной дегидратации  $K_i$  при различных температурах обжига.

Температура обжига концентрата, °C	800	850	900	950	1000
Константа скорости высокотемпературной дегидратации, с <sup>-1</sup>	0,0025	0,0015	0,0011	0,0009	0,0008

Как видно, константа скорости высокотемпературной дегидратации  $K_i$  уменьшается с возрастанием температуры обжига и подчиняется закону Аррениуса

$$K_i = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где  $K_0$  – предэкспоненциальный коэффициент;  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура, К.

Эта зависимость в полулогарифмических координатах изображена на рис. 5 и имеет линейный вид. Из уравнения прямой, представленной на этом рисунке, рассчитали энергию активации процесса высокотемпе-

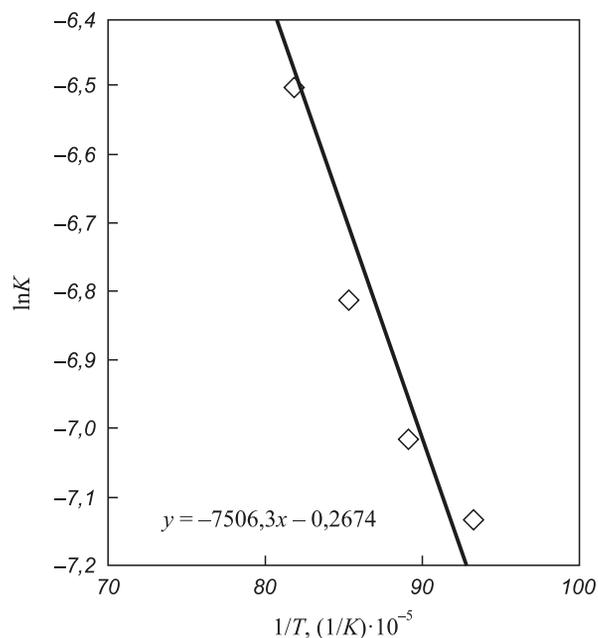


Рис. 5. Зависимость величины натурального логарифма константы скорости высокотемпературной дегидратации от обратного значения температуры концентрата

Fig. 5. Dependence of natural logarithm of the high-temperature dehydration rate constant on return value of the concentrate temperature

ратурной дегидратации  $E = 143,7$  кДж/моль и коэффициент  $K_0 = 1,3$ .

**Выводы.** Результаты исследований лисаковского гравитационно-магнитного концентрата термометрическим методом показали, что выделение высокотемпературной гидратной влаги из лисаковского концентрата происходит ступенчато. С ростом температуры прокаливания скорость высокотемпературной дегидратации уменьшается, что объясняется замедлением диффузии водяных паров при дегидратации через слой материала, который уплотняется при увеличении температуры.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акатов А.И., Герасимов А.Г., Тащненко П.А. Обогащение бурых железняков Лисаковского месторождения на опытной обогатительной фабрике Сибэлектросталь // Обогащение руд. 1957. № 6. С. 3 – 8.
2. Тащненко П.А., Долгих М.А. Обжигмагнитное обогащение руд Лисаковского месторождения // Обогащение полезных ископаемых. 1977. № 21. С. 44 – 48.
3. Епишин А.Ю., Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А. Поведение фосфорсодержащего компонента при высокотемпературном обжиге лисаковского железорудного концентрата // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 59 – 60.
4. Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю., Артов Д.А. Комбинированная пиро-гидрометаллургическая технология обесфосфоривания бурого железняка лисаковского месторождения // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2015. № 2. С. 10 – 15.
5. Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю., Артов Д.А. Особенности пиро-гидрометаллургической технологии обесфосфоривания бурого железняка лисаковского месторождения // Сталь. 2015. № 3. С. 8 – 11.

6. Епишин А.Ю., Зайнуллин Л.А., Карелин В.Г. Исследование обжига лисаковского железорудного концентрата для определения температуры разложения гидратного фосфорсодержащего минерала // Матер. X Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и специалистов. – Магнитогорск, 2009. С. 144 – 147.
7. Епишин А.Ю., Зайнуллин Л.А., Карелин В.Г. О дефосфорации бурого железняка методом выщелачивания с предварительным обжигом // Сб. матер. VIII конгресса обогатителей стран СНГ. – М., 2011. С. 83 – 86.
8. Левинтов Б.Л., Мирко В.А., Пчелинцева О.А. Состояние и перспективы решения проблемы обесфосфоривания трудновсываемого железорудного сырья Казахстана. – В кн.: Создание научных основ принципиально новых химических и металлургических технологий, адаптированных к сырьевой базе Казахстана. – Алматы: Комплекс, 2003. С. 137 – 142.
9. Пчелинцева О.А., Мажренова Н.Р., Левинтов Б.Л. О возможности радиационного стимулирования процесса обесфосфоривания лисаковских концентратов // Комплексное использование минерального сырья. 2003. № 3. С. 57.
10. Левинтов Б.Л., Мирко В.А., Кантемиров М.Д. и др. Особенности строения бурожелезняковых руд и их влияние на эффективность термохимического обогащения лисаковских концентратов // Сталь. 2007. № 8. С. 8 – 11.
11. Пат. 2413012 РФ. Способ очистки железосодержащего материала от мышьяка и фосфора / И.Г. Ковзун, З.Р. Ульберг, И.Т. Проценко и др.; заявл. 16.11.2009., опубл. 27.02.2011. Бюл. изобретений. 2009. № 6.
12. Пат. 2184158 РФ. Способ очистки железорудного концентрата от примеси фосфора / В.В. Беликов, В.Б. Огородов, А.О. Ядрышников и др.; заявл. 23.05.2001., опубл. 27.06.2002. Бюл. изобретений. 2002. № 18.
13. Беликов В.В., Огородов В.Б., Ядрышников А.О., Михайловича Н.А. Обесфосфоривание бурожелезняковых руд и концентратов // Обогащение руд. 2003. № 3. С. 8 – 12.
14. Naudyonov V.A. Experience of operation of Lisakovsk deposit of brown iron ore // International Seminar on Vision Mineral Development. Bhubaneswar, India. 2005. P. 83 – 87.
15. Карелин В.Г., Резвов Г.А. Особенности дегидратации лисаковских материалов // Сб. тезисов совещания «Проблемы обогащения и комплексной переработки фосфористых лисаковских руд». Темиртау, 1979. С. 38 – 39.
16. Карелин В.Г., Резвов Г.А., Кузовникова Е.А. Кинетические особенности дегидратации лисаковского концентрата в кипящем слое // Металлургическая теплотехника. 1975. № 4. С. 153 – 156.
17. Иванова В.П. Термический анализ минералов и горных пород / В.П. Иванова, Б.К. Касагов, Т.Н. Красавина, Е.Л. Розина. – Л.: Недра, 1974. – 399 с.
18. Уэндландт У. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 572 с.
19. Шестак Я. Теория термического анализа. – М.: Мир, 1987. – 456 с.
20. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. – М.: Мир, 1972. – 554 с.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 8, pp. 656–661.

## KINETICS OF HIGH-TEMPERATURE DEHYDRATION OF LISAKOVSK IRON ORE CONCENTRATE

V.G. Karelin<sup>1</sup>, L.A. Zainullin<sup>1,2</sup>, A.Yu. Epishin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”), Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** Lisakovsk deposit of brown iron ore (Kostanay region, Kazakhstan) is developed by the open method, which provides cheaper ore mining. At the LF LLP “Orken”, the ore is enriched in a gravity-magnetic process to produce a gravitational-magnetic concentrate containing 48 to 49 % of Fe, 10 to 12 % of SiO<sub>2</sub>, 4.5 to 5.5 % of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 0.7–0.9 % of P. The product is supplied to the agglomeration in JSC “Arcelor Mittal Temirtau” (Temirtau, Kazakhstan). Because of the increased content of phosphorus in the gravitational-magnetic concentrate, the demand for it is limited. Lisakovsk concentrate contains a significant amount of hydrated moisture (up to 12 %). Most of the moisture is in the form of iron hydrates and decomposes at a moderate temperature of 320–350 °C. The other part, apparently, is associated with a phosphorus-containing component decomposing at elevated temperature. In this process, oxidative firing results in the formation of free phosphorus oxide. Studies on decomposing a hydrated phosphorous-containing component in Lisakovsk iron ore concentrate were undertaken to determine kinetics of the process. Removal of phosphorus from the iron ore concentrate during preparation for metallurgical processing is possible after high-temperature oxidizing roasting of the material and subsequent sulphuric acid leaching. Phosphorus is not leached from the original concentrate by hydrometallurgical method. Using high temperature, it is necessary to break the chemical bond and transfer phosphorous to a free oxide. Complete decomposing of the hydrated phosphorous-containing component at roasting affects the quality of subsequent sulphuric acid treatment of the roasted product. High-temperature hydrate moisture is exuded from Lisakovsk concentrate step-by-step. The rate of high-temperature dehydration de-

creases with the rise of calcination temperature, which is explained by slow water vapour diffusion through the layer of material that becomes packed at the temperature rise.

**Keywords:** ore, concentrate, roasting, acid, leaching, phosphorus, component, hydrate moisture, kinetics, decomposing, temperature.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-656-661

### REFERENCES

1. Akatov A.I., Gerasimov A.G., Tatsienko P.A. Enrichment of hematites of Lisakovsky field at Sibelectrostral experimental concentrating factory. *Obogashchenie rud.* 1957, no. 6, pp. 3–8. (In Russ.).
2. Tatsienko P.A., Dolgikh M.A. Magnetic roasting enrichment of ores of the Lisakovsky field. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh.* 1977, no. 21, pp. 44–48. (In Russ.).
3. Epishin A.Yu., Karelin V.G., Zainullin L.A. The behavior of a phosphorus-containing component by a high-temperature roasting of Lisakovsk iron ore concentrate. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2012, no. 12, pp. 59–60.
4. Karelin V.G., Zainullin L.A., Epishin A.Yu., Artov D.A. Combined pyro-hydrometallurgical technology of dephosphorization of hematites of Lisakovsky field. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta “Chermetinformatsiya”.* 2015, no. 2, pp. 10–15. (In Russ.).
5. Karelin V.G., Zainullin L.A., Epishin A.Yu., Artov D.A. Features of pyro-hydrometallurgical technology of dephosphorization of hematite of Lisakovsky field. *Stal’.* 2015, no. 3, pp. 8–11. (In Russ.).
6. Epishin A.Yu., Zainullin L.A., Karelin V.G. Study of firing of Lisakovsk iron ore concentrate to determine the decomposition temperature of hydrated phosphate mineral. In: *Materialy Desyatoy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i spetsialistov* [Materials of 10th All-Russian Sci.-Pract. Conf. of Students, Postgraduates and Specialists]. Magnitogorsk: 2009, pp. 144–147. (In Russ.).

7. Epishin A.Yu., Zainullin L.A., Karelin V.G. Dephosphorization of hematites by leaching with preliminary firing. In: *Sbornik materialov Vos'mogo kongressa obogatitelei stran SNG* [Coll. of materials of 8th Congress of Dressers of CIS Countries]. Moscow: 2011, pp. 83–86. (In Russ.).
  8. Levintov B.L., Mirko V.A., Pchelintseva O.A. Status and prospects of solving the problem of dephosphoration of refractory iron ore raw materials of Kazakhstan. In: *Sozdanie nauchnykh osnov printsiipal'no novykh khimicheskikh i metallurgicheskikh tekhnologii, adaptirovannykh k syr'evoi baze Kazakhstana* [Creation of scientific bases of essentially new chemical and metallurgical technologies adapted to a source of raw materials of Kazakhstan]. Almaty: Kompleks, 2003, pp. 137–142. (In Russ.).
  9. Pchelintseva O.A., Mazhrenova N.R., Levintov B.L. On the possibility of radiation stimulation of dephosphorization process of Lisakovsk concentrates. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 2003, no. 3, pp. 57. (In Russ.).
  10. Levintov B.L., Mirko V.A., Kantemirov M.D., Klimushkin A.N., Naidenov V.A., Bobir A.V. Structure of oolitic brown iron ores and their influence on the thermochemical enrichment of Lisakovsk concentrates. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 8, pp. 681–685.
  11. Kovzun I.G., Ul'berg Z.R., Protsenko I.T. etc. *Sposob ochistki zhelezosoderzhashchego materiala ot mysh'yaka i fosfora* [Way of purification of ferriferous material of arsenic and phosphorus]. Patent RF no. 2413012. *Byulleten' izobretenii*. 2009, no. 6. (In Russ.).
  12. Belikov V.V., Ogorodov V.B., Yadryshnikov A.O. etc. *Sposob ochistki zhelezorudnogo kontsentrata ot primesi fosfora* [Way of cleaning of iron ore concentrate of phosphorus impurity]. Patent RF no. 2184158. *Byulleten' izobretenii*. 2002, no. 18. (In Russ.).
  13. Belikov V.V., Ogorodov V.B., Yadryshnikov A.O., Mikhailovina N.A., Dephosphorization of hematite ores and concentrates. *Obogashchenie rud*. 2003, no. 3, pp. 8–12. (In Russ.).
  14. Naydyonov V.A. Experience of operation of Lisakovsk deposit of brown iron ore. In: *International Seminar on Vision Mineral Development. Bhubaneswar, India, 2005*, pp. 83–87. (In Russ.).
  15. Karelin V.G., Rezvov G.A. Features of dehydration of Lisakovsk materials. In: *Sbornik tezisov soveshchaniya "Problemy obogashcheniya i kompleksnoi pererabotki fosforistykh lisakovskikh rud"* [Abstracts of the meeting "Problems of enrichment and complex processing of Lisakovsk phosphorous ore"]. Temirtau: 1979, pp. 38–39. (In Russ.).
  16. Karelin V.G., Rezvov G.A., Kuzovnikova E.A. Kinetic features of dehydration of Lisakovsk concentrate in the boiling layer. *Metallurgicheskaya teplotekhnika*. 1975, no. 4, pp. 153–156. (In Russ.).
  17. Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N., Rozinova E.L. *Termicheskii analiz mineralov i gornyykh porod* [Thermal analysis of minerals and rocks]. Leningrad: Nedra, 1974, 399 p. (In Russ.).
  18. Wendlandt Wesley Wm. *Thermal methods of analysis*. New York: Interscience Publishers, 1964, 424 p. (Russ.ed.: Wendlandt W. *Termicheskie metody analiza*. Moscow: Mir, 1978, 526 p.).
  19. Shestak Ya. *Teoriya termicheskogo analiza* [Theory of thermal analysis]. Moscow: Mir, 1987, 456 p. (In Russ.).
  20. Delmon Bernard. *Introduction à la Cinétique Hétérogène*. Ed. Technip. Paris 1969. (Russ.ed.: Delmon B. *Kinetika geterogennykh reaktsii*. Moscow: Mir, 1972, 554 p.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by Act 211 of the Government of the Russian Federation, contract no. 02.A03.21.0006.
- Information about the authors:**
- V.G. Karelin**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Granulation of Metallurgical Melts (karelin@lab62.vniimt.ru)  
**L.A. Zainullin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director (aup@vniimt.ru)  
**A.Yu. Epishin**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Granulation of Metallurgical Melts (epishin.artem@yandex.ru)

Received April 12, 2017

УДК 662.61+621.181.7

**ФАКЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТИ****Торопов Е.В.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры промышленной теплоэнергетики (evtor@mail.ru)**Лымбина Л.Е.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры промышленной теплоэнергетики (evtor@mail.ru)**Ярошенко Ю.Г.<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика

в металлургии» (yury-y@planet-a.ru)

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет

(454080, Россия, Челябинск, проспект Ленина, 76)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Для решения задачи определения температуры факела в рабочем пространстве теплотехнических агрегатов предложено рассчитывать изменение адиабатической энтальпии методами теории вероятностей. Показано, что нормальная функция распределения топливных элементов позволяет получить интегральную функцию распределения энтальпии и адиабатической температуры по длине факела, в том числе при несимметричной функции распределения. Задача решена относительно гомогенного диффузионного газообразного факела, связанного с горением распыленного жидкого топлива. Определены условия регуляризации решений уравнений переноса, предложены аппроксимации для зависимости числа гомохронности от массообменного числа Био и сходимость суммы ряда при регуляризации решений уравнения поверхности горения по методике Бурке-Шумана. Показано, как учитывается переменность дисперсионного фактора по длине реального факела. Предложено объяснение S-образной формы температурной кривой, наблюдаемой при сжигании практически всех топлив в установках различных типов. Обобщенное рассмотрение факельных процессов с позиций теории вероятностей при различной плотности нормального распределения  $\varphi(U)$  для гомогенного факела произведено с помощью интегральной нормальной функции  $\Phi(U)$ . Устойчивая форма  $\Phi(U)$  достоверно объясняет S-образную продольную температурную функцию, наблюдаемую на практике и служащую базой для тепловой и нестационарной теории воспламенения. На основе распределения адиабатической температуры в факельном континууме, связанной с  $\Phi(U)$ , возможно определение фактической температуры факела в рабочем пространстве с учетом радиационных свойств всех элементов теплообменной системы. Аналогично решается задача описания продольной температуры гетерогенного факела при переменном дисперсионном факторе  $\sigma$ .

**Ключевые слова:** факел, гомогенный, теория вероятности, распределение фракций, дисперсионный фактор, интегральная функция, энтальпия, адиабатическая температура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-662-669

Факельные процессы широко применяются во многих технологиях, включая металлургическое производство. Эффективность сжигания топлива зависит от основных положений теории и практической реализации этих положений в конкретных горелочных устройствах.

При рассмотрении температуры по длине стационарного диффузионного факела Ф.А. Вильямс [1] применяет упрощенную модель, основанную на законах сохранения и представляющую собой дифференциальное уравнение второго порядка. При этом априори принимается S-образное изменение температуры по длине факела. Принятая схема факела не обосновывается, за исключением ссылок на «ранние» тепловые теории адиабатического ламинарного факела. Аналогичный подход реализован в работах [2, 3].

Существенный вклад в описание процессов в факеле внесли советские ученые, в том числе ученые уральской школы металлургов – теплотехников: Б.И. Китаев, В.Г. Лисиенко и другие, получившие достоверные зависимости для расчета факелов в промышленных печах различного назначения [4 – 7].

Новые исследования факельных процессов на уровне практического применения связаны с численными методами решения уравнений сохранения, которые позволяют на основе методов конечных 3D объемов вычислить все характеристики факельных потоков с учетом турбулентности и многофазности приемами CFD – гидродинамики [8]. Обозначившийся в последние годы застой с широким внедрением этих разработок автор научного направления Д.Б. Сполдинг связывает с коммерциализацией [9]. Однако представляется, что высокая стоимость программ, обучения и требуемого оборудования – не единственная причина застоя. В этом сложном и важном вопросе должен быть целый спектр решений на основе подходов с разных позиций при различной доступности и точности. Ниже представлены зависимости для факельных процессов на основе представлений теории вероятностей [10].

**Постановка задачи, обоснование методов решения**

Предпосылками к применению методов теории вероятностей (ТВ) к факельным процессам служат три

обстоятельства. Во-первых, распределение топливных и окислительных элементов в потоке подчиняется законам ТВ; во-вторых, характеристики факельного потока также связаны с законами ТВ. И, наконец, в зону реагирования ансамбль топливных частиц при наличии частиц различного размера входит пофракционно, начиная с самых мелких и заканчивая относительно крупными частицами, что соответствует функции распределения [10].

Условием применимости математического аппарата ТВ к факельным процессам является идентификация понятия частицы реагирующего континуума – в гетерогенных факелах это частицы твердого или жидкого топлива, реагирующие в диффузионно-кинетическом режиме с газообразной средой, включающей окислитель [11 – 13]. В гомогенных факелах это микрообъемы или объемные элементы газовой смеси топлива и окислителя, причем горение протекает в микрообъемах со стехиометрическим соотношением топлива и окислителя в концентрационных пределах горения.

Также к условиям применения аппарата ТВ относятся принимаемые допущения: стационарность процессов; преобладание турбулентной диффузии и динамического давления в факельном континууме; температура в факеле изменяется только по его длине; в адиабатических условиях не учитывается радиационный и конвективный теплообмен факельного континуума с окружающей средой в агрегате. Изменение температуры, таким образом, связано с тепловыделениями при сгорании топливных компонентов. Эти тепловыделения суммируются вдоль по потоку факельного континуума. Момент вступления сечения факела в процесс горения определяется участием трех механизмов воспламенения – инициированием от горящих объемов топочной среды, тепловым самовоспламенением и цепным воспламенением от раскаленных поверхностей ограждения агрегата.

### Схема решения задачи

В рамках принятых условий фракционный состав ансамбля реагирующих частиц может быть описан в соответствии с ТВ кривой Гаусса для плотности нормального распределения

$$\varphi(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-0,5\left(\frac{d-\xi}{\xi\sigma}\right)^2\right], \quad (1)$$

где  $X = \frac{d-\xi}{\xi}$  – безразмерная величина топливной час-

тицы с размером в сферическом приближении  $d$ , мкм, и масштабом нормализации  $\xi$ , мкм, обычно принимаемым за центр распределения, т. е. размером средней (медианной) частицы, которая имеет максимальную частоту обнаружения в ансамбле. Дисперсия (рассеяние)  $\sigma_2$  отра-

жена в формуле (1) в виде положительного квадратного корня из  $\sigma_2$ , называемого дисперсионным фактором.

При выборе в качестве масштаба медианного размера частиц  $\xi$ , формула (1) будет иметь в показателе экспоненты  $(d/\xi - 1)$ , что позволяет всю совокупность топливных частиц поделить на две части: все частицы размером меньше медианного будут располагаться в отрицательной части оси абсцисс, все частицы большего размера – в положительной. Этот процесс соответствует в терминах ТВ нормализации, а приведение всех распределений к единой форме введением в знаменатель показателя экспоненты дисперсионного фактора  $\sigma$  – стандартизацией. Это позволяет с единых позиций рассматривать и подвергать сравнительному анализу различные симметричные распределения вида (1). В этом случае нормальное стандартизованное распределение при  $\sigma = 1$  описывается формулой

$$\varphi(U) = \frac{\exp\left(-\frac{U^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi}}, \quad (2)$$

где  $U = \frac{d-\xi}{\xi\sigma}$  – новый масштаб для оси абсцисс.

Все симметричные распределения, подчиняющиеся соотношению (1), могут быть найдены в справочниках по математическому анализу и ТВ, например, в работе [10] при  $\sigma = 1$ . При изображении распределения с другим дисперсионным фактором  $\sigma$  необходимо справочные данные по  $\varphi(U)$  поделить на  $\sigma$ . На рис. 1 изображены нормальные функции распределения при  $\sigma = 1$  (стандартизованные) и при  $\sigma = 1,25; 0,75$ .

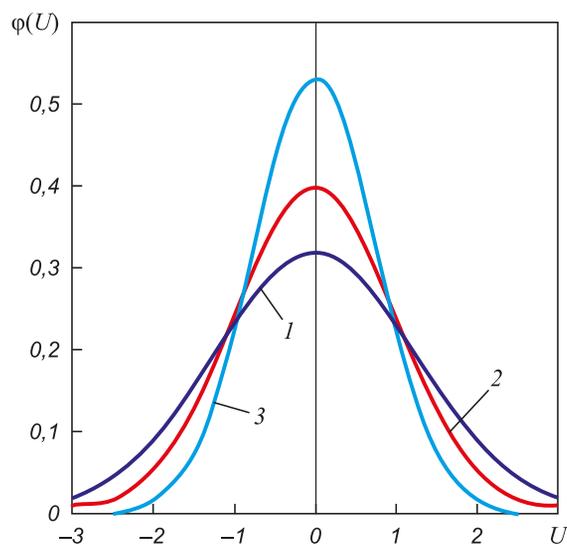


Рис. 1. Плотность нормального распределения  $\varphi(U)$  при различном дисперсионном факторе  $\sigma$ :  
1 – 1,25; 2 – 1,00; 3 – 0,75

Fig. 1. The density of normal distribution  $\varphi(U)$  at various dispersive factor  $\sigma$ :  
1 – 1.25; 2 – 1.00; 3 – 0.75

Следует отметить, что специальные функции (1) и (2) могут быть представлены ортогональным многочленом Эрмита  $H_k$  степени  $k$ .

Поскольку ортогональные многочлены являются специальными решениями линейных однородных дифференциальных уравнений второго порядка, то в данном случае уравнениям (1) – (3) соответствует вырожденное гипергеометрическое дифференциальное уравнение с однородными условиями однозначности в части последовательности собственных значений типа Штурма–Лиувилля. В применении к факельным процессам таким уравнением является основанное на законах сохранения уравнение энергии [1]

$$\lambda \frac{d^2 T}{dl^2} - m_m c_p \frac{dT}{dl} + q_v = q_n, \quad (3)$$

где  $l$  – координата по нормали к фронту горения, м;  $\lambda$ ,  $c_p$  – средние значения коэффициента теплопроводности и теплоемкости факельной среды, Вт/(м·К), Дж/(кг·К);  $m_m$  – поток массы через единицу площади поперечного сечения факела в направлении  $l$ , кг/(м<sup>2</sup>·с);  $q_v$  – мощность тепловыделений в единице объема факельной среды, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_n$  – тепловые потери единицей объема факельной среды, Вт/м<sup>3</sup>. С фиксацией теплофизических свойств факельной среды и параметров потока массы  $m_m = \rho w$  основные нелинейности в уравнении (3) связываются с источниковым слагаемым  $q_v$  и потерями  $q_n$ .

В работе [1] на основе аксиоматического  $S$ -образного распределения температуры по длине факела анализируются условия воспламенения и погасания в факеле, границы скорости распространения процесса горения, концентрационные пределы и влияние этих факторов на соотношение  $q_v$  и  $q_n$ .

Результаты этого анализа инициировали целый ряд теоретических и экспериментальных исследований, в том числе разработку стационарной и нестационарной теории теплового самовоспламенения. Связь рассматриваемого решения для ансамбля топливных частиц с фундаментальными законами сохранения, согласно (1) – (3), свидетельствует о достоверности подхода к описанию факельных процессов с позиций ТВ.

В каждом сечении факела присутствуют частицы всех размеров, но процесс воспламенения начинается с мельчайших частиц, которые быстрее прогреваются, образуют горючую газообразную фазу и воспламеняются. Дальнейший процесс воспламенения, горения и повышения энтальпии и температуры факела происходит аддитивно до полного выгорания топливных компонентов. Повышение энтальпии с принятием адиабатных условий происходит от  $I_{\text{физ}}$  до  $I_{\text{ад}} = I_{\text{физ}} + I_{\text{хим}}$ . Физическая энтальпия определяется предварительным нагревом компонентов горения, химическая энтальпия определяется теплотой сгорания топлива при заданном коэффициенте расхода воздуха. Адиабатическую эн-

тальпию  $I_{\text{ад}}$  можно связать с адиабатической температурой  $T_{\text{ад}}$ . Например, при  $c_p = \text{const}$ ,  $\rho = \text{const}$ ,  $T_{\text{ад}} = \frac{I_{\text{ад}}}{c_p \rho}$ . При этом  $I_{\text{физ}}$  не изменяется по длине факела, а  $I_{\text{хим}}$  изменяется в соответствии с пофракционным выгоранием частиц топлива. Процесс роста  $I_{\text{хим}}$  отражается в ТВ нормальной интегральной функцией распределения топливных частиц

$$\Phi(U) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_{\text{кон}}} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU = \frac{1 + \text{erf}\left(\frac{U}{\sqrt{2}}\right)}{2}. \quad (4)$$

Нормальные стандартизованные (при  $\sigma = 1$ ) функции распределения  $\Phi(U)$ , как и функции ошибок  $\text{erf}(z)$  приведены в справочниках, например, в [10]. На рис. 2 приведены интегральные функции  $\Phi(U)$  для  $\varphi(U)$  в рамках примера распределений, показанных на рис. 1. Как показывает анализ рис. 2, интегральная функция распределения  $\Phi(U)$  стремится к своему максимальному значению в соответствии с дисперсионным фактором  $\sigma$ . Таким образом, нормализация фракционного распределения и центральное расположение оси ординат позволяют согласовать левую и правую части координатного пространства при адаптации асимметричного распределения и привести его к стандартному виду.

**Гомогенный диффузионный факел.** Поток газообразного топлива вытекает со скоростью  $w_T$  из отверстия топливного сопла размером  $2x_0$  в поток газообразного окислителя, движущегося со скоростью  $w_{\text{ок}}$  в канале смесителя размером  $2S_0$ . При решении задачи базовой принимается схема с прямоугольной системой координат с расположением оси  $z$  в направлении дви-

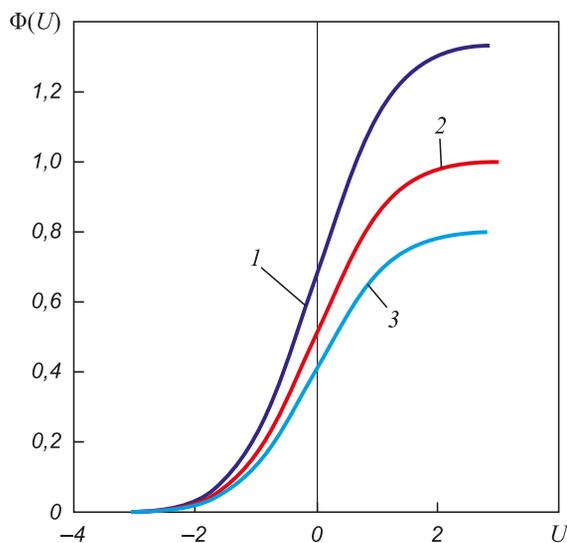


Рис. 2. Интегральная функция распределения  $\Phi(U)$  при различных  $\sigma$ :  
1 – 1,25; 2 – 1,00; 3 – 0,75

Fig. 2. Integrated function of distribution  $\Phi(U)$  at various  $\sigma$ :  
1 – 1.25; 2 – 1.00; 3 – 0.75

жения потоков топлива и окислителя при расположении оси  $x$  поперек потоков. В направлении оси  $y$  все параметры потоков неизменны, т. е.  $\partial/\partial y = 0$ .

Фронт горения берет начало в области среза топливного сопла и располагается в пространстве смесителя там, где диффузионные потоки компонентов горения находятся в стехиометрическом соотношении. В зависимости от соотношения расходов топлива и окислителя форма фронта горения может быть различной. Как показывает теория, подтвержденная экспериментами, фронт горения отклоняется в область компонента, находящегося в недостатке [3].

При условии равенства коэффициентов диффузии компонентов горения между собой  $D_1 = D_2 = D$  и описания химической реакции горения одним уравнением вида  $\nu_1 a_1 + \nu_2 a_2 = \nu_3 a_3$ , где индексами обозначены соответственно окислитель (1), горючее (2) и продукты сгорания (3), а символом  $\nu$  – стехиометрические коэффициенты, создается возможность введения фактора Бурке–Шумана  $\psi$ , который удовлетворяет уравнению  $L(\psi) = 0$  при  $\psi = \frac{C_1}{\nu_1} - \frac{C_2}{\nu_2}$ . Это позволяет исключить скорость реакции горения из системы дифференциальных уравнений и решать их относительно фактора  $\psi$ .

Уравнение для определения координат поверхности фронта горения в трехмерном пространстве имеет вид

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{D}{w} \nabla^2 \psi \quad (5)$$

и его решение методом Фурье в плоскости  $x, z$  записывается в виде

$$\psi = \psi_z \psi_x = B_1 \exp\left(-\frac{D}{w} k^2 z\right) [B_2 \sin(kx) + B_3 \cos(kx)], \quad (6)$$

где  $k, B_1, B_2, B_3$  – константы разделения решений и условий однозначности.

Конкретный вид решения (7) зависит от выбранной системы координат и условий однозначности. При этом рационально выделить области избытка и недостатка окислителя или области недостатка и избытка топлива. Далее последовательно решаются задачи для выделенных областей в прямоугольной, цилиндрической и сферической системах координат.

**Область избытка окислителя.** Определив граничные условия для области недостатка топлива (избытка окислителя):

- при  $z = 0$  и  $0 \leq x \leq x_0$   $\psi = -C_{2,0}/\nu_2$ ;
- при  $x = 0$  условие симметрии  $\partial\psi/\partial x = 0$ ,
- получим  $B_2 = 0$  и далее

$$\psi = B_1 \exp\left(-\frac{D}{w} k^2 z\right) \cos(kx). \quad (7)$$

В зависимости (6) аргумент косинуса преобразуется при замене  $kx_0 = \mu$  и  $x = x_0 X$ :  $kx = \mu X$ ; аргумент экспо-

ненты также приводится к безразмерному виду заменой  $\frac{Dk^2 z}{w} = \mu^2 Ho$ , где  $Ho = \frac{Dz}{wx_0^2}$  – число гомохронности процесса.

Таким образом, уравнение (7) приводится к виду

$$\psi = B_1 \exp(-\mu^2 Ho) \cos(\mu X), \quad (8)$$

что позволяет сформулировать задачу по определению  $k = \mu/x_0$  как задачу по определению собственных чисел краевой задачи Штурма–Лиувилля  $\mu$ . Решение этой задачи известно из теории линейных дифференциальных уравнений в частных производных [10], поэтому ряд собственных чисел можно записать в общем виде при  $jx_0 > \rho D$

$$\mu_n = 0,5\pi(2n - 1), \quad (9)$$

причем  $\mu_n$  определяется при решении характеристического уравнения

$$\mu_n \left( \frac{jx_0}{\rho D} \right) = \text{ctg} \mu_n. \quad (10)$$

Трансцендентное уравнение (10) имеет бесконечный ряд решений  $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 \dots < \mu_n$ , поэтому общее решение уравнения (5) представляется суммой бесконечного ряда

$$\psi = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} B_{1n} \cos(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 Ho). \quad (11)$$

Аналогично (11) записывается зависимость для  $\psi_0$ , только при экспоненциальном множителе, равном единице, так как  $Ho = 0$ , что характеризует эту зависимость как разложение  $\psi_0 = 1,0$  в ряд Фурье по собственным числам краевой задачи

$$\psi_0 = B_{1n} \cos(\mu_n X). \quad (12)$$

Обычным методом, с учетом ортогональности функций косинуса, можно получить

$$B_{1n} = \frac{\psi_0 2 \sin \mu_n}{(\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n)}, \quad (13)$$

поэтому общее решение уравнения (5) в безразмерном виде при  $\Psi = \psi/\psi_0$

$$\Psi = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} E_{1n} \cos(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 Ho), \quad (14)$$

где  $E_{1n} = \frac{B_{1n}}{\psi_0}$ .

При этом сходимость ряда (14) определяется соотношением чисел  $Ho$  и  $\frac{jx_0}{\rho D} = \text{Bi}_m$ , которое можно назвать числом диффузионной массивности  $\text{Bi}_m$ . При  $\text{Bi}_m \rightarrow 0$ ,

что практически не наблюдается в технических устройствах по сжиганию топлива,  $\mu_n = (n - 1)\pi$ . Фактически континуум собственных чисел рассматриваемой краевой задачи можно описать зависимостью  $\mu_n = (n - k)\pi$ , где  $k$  – переменный фактор,  $k = 0,5 \dots 1,0 = f(\text{Bi}_M)$ . В крайних значениях при  $\text{Bi}_M \rightarrow 0$ ,  $k = 1,0$  и  $\mu_n = (n - 1)\pi$ ; при  $\text{Bi}_M = 100$ ,  $k = 0,5$  и  $\mu_n = 0,5(2n - 1)\pi$ ; промежуточные значения собственных чисел можно найти интерполяцией. В работе [1] рассмотрен только частный случай  $\text{Bi}_M \rightarrow 0$ .

Координата точки схождения касательных к кривым  $\psi$  расположена на расстоянии  $x_1 = \frac{1}{\text{Bi}_M} = \frac{\rho D}{jx}$  от плоскости соприкосновения потоков  $x_0$ , координата  $z_0$  точки пересечения линий  $\Psi$  с плоскостью соприкосновения – на расстоянии  $z_0$  от оси  $x$

$$\left(\frac{\partial \Psi}{\partial x}\right)_{x=x_0} = -\frac{\rho D}{jx_0} = -\frac{1}{\text{Bi}_M}. \quad (15)$$

Зависимость (15) позволяет определить форму поверхности стехиометрического горения  $\psi$  в функции формы горелочного устройства и граничных условий.

**Область избытка топлива.** Поскольку формально граничное условие непроницаемости стенки при  $x = S_0$  имеет такое же математическое выражение, как условие симметрии в случае избытка окислителя  $\partial \psi / \partial x = 0$  по причине равенства нулю плотности потока массы на стенке  $j = 0$ , то настоящую задачу можно свести к предыдущей простой заменой координаты  $x$  на координату  $\xi_x^r = S_0 - x$ , тогда в плоскости соприкосновения потоков  $\xi_x^r = S_0 - x_0$ .

Сохранив все выводы из предыдущей задачи, можем перечислить основные величины, влияющие на расположение фронта горения топлива:

– общее решение

$$\Psi = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{B_{1n}}{\Psi_0} \cos(\mu_n \Xi) \exp(-\mu_n^2 Ho_1); \quad (16)$$

– число гомотронности  $Ho_1 = \frac{Dz}{w\xi_0^2}$ ;

– число массивности задачи  $\text{Bi}_{M1} = \frac{j\xi_0}{\rho D}$ ;

– безразмерная координата по нормали к потоку  $\Xi = \frac{\xi_x^r}{\xi_0}$ ;

– характеристическое уравнение  $\text{ctg} \mu_n = \frac{\mu_n}{\text{Bi}_{M1}}$ .

Обычные теплотехнические технологии при нагреве и плавлении материалов реализуются в условиях, соответствующих области избытка окислителя. Другая задача решается в технологиях получения горючего газообразного топлива и защитных газов.

Большое конструктивное разнообразие горелочных устройств, где сечение для прохода компонентов горе-

ния создается изменением конфигурации ограничивающих поверхностей, можно условно свести к пересечению простых геометрических фигур трех канонических форм – пластины, цилиндра и шара. Обобщенное уравнение для описания поверхности стехиометрического горения для тел трех канонических форм каналов можно представить в виде

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{D}{w} \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + \frac{\gamma - 1}{\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right). \quad (17)$$

В приведенных зависимостях фактор формы  $\gamma = 1$  для пластины,  $\gamma = 2$  для цилиндра и  $\gamma = 3$  для шара;  $\eta$  – координата, нормальная к продольной координате  $z$ . С присоединением условий однозначности решение в безразмерных числах подобия примет вид:

$$\Psi = \sum_{i=1}^{\infty} E_i C_i \exp(-\mu_i^2 Ho). \quad (18)$$

Параметр  $E_i$  отражает влияние на развитие фронта горения формы канала и числа  $\text{Bi}_M = \frac{jx}{\rho D}$ , а также свя-

занных с  $\text{Bi}_M$  посредством характеристических уравнений собственных чисел  $\mu_i$ . Параметр  $C_i$  отражает влияние формы канала, числа  $\text{Bi}_M$  и безразмерной координаты рассматриваемой точки по нормали к потоку  $X = x/x_0$ . Расчетные формулы для определения  $E_i$  и  $C_i$  для тел канонических форм приведены в работе [11].

**Анализ полученного решения.** Сходимость ряда (18), а, следовательно, и число слагаемых при заданной точности расчета определяются формой канала, числом Био, заданными условиями однозначности и числом  $Ho$ .

При малых значениях  $\text{Bi}_M \rightarrow 0$  форма поверхности  $\psi$  слабо зависит от диффузионных потоков поперек потока компонентов, так как при этом  $\frac{1}{j} \ll \frac{x_0}{\rho D}$  – это ста-

новится возможным при больших значениях плотности потока массы вдоль координаты  $z$ . Также такой режим возможен при низких значениях  $\rho D$  и при большом значении поперечного размера канала  $x_0$ , причем плотность вещества в потоке  $\rho$ , как и коэффициент диффузии  $D$  являются физическими параметрами компонентов горения, а размер  $x_0$  – конструктивным параметром горелки. Гипотетический предел  $\text{Bi}_M \rightarrow 0$  позволяет связать относительное значение  $\Psi = \psi/\psi_0$  с фактором формы канала  $\gamma$  и произведением  $\text{Bi}_M Ho$ . Эти соотношения имеют значение в самопроизвольных процессах горения газообразного топлива при низкой скорости движения компонентов горения.

В работе [3] утверждается, что число значимых для точности расчетов членов ряда в уравнении (18) зависит от значения  $Ho$ , что не вполне корректно, так как необходимо учитывать и значение числа  $\text{Bi}_M$ .

Для другой области  $\text{Bi}_M \geq 100$  аналогичных простых зависимостей найти не удастся. Определенные для этой

области собственные числа краевой задачи  $\mu_i$  и коэффициенты начальных условий  $D_i$  приведены в [10]. Фактически при  $Bi_m \geq 100$  процесс формирования фронта горения переходит в область граничных условий первого рода [3, 11].

Обработав численные значения для функции  $Ho = f(Bi)$ , можно получить для плоского канала аппроксимацию

$$Ho_p = 0,309Bi_m^{0,8495} \exp(-0,362Bi_m). \quad (19)$$

Зависимость (19) свидетельствует о том, что связь между  $Ho_p$  и  $Bi_m$  – сложная, экспоненциально-степенная.

Для определения массовой доли фракции топливных элементов, которые представляются стехиометрическими микрообъемами, содержащими топливо и окислитель, необходимо переменную массу фракции  $k$  отнести к суммарной массе всех фракций от начальной при  $z = 0$  до значения при  $z = 1 - \delta$ , где  $\delta = \psi_{нар} - \psi_{вн}$  при  $z = 0$ . В приближении  $\delta = \text{const}$  при эквидистантном развитии наружной  $\psi_{нар}$  и внутренней  $\psi_{вн}$  поверхностей фронта горения элементарный объем фракции  $V_{фр} = l_x l_y l_z$  растет за счет увеличения  $l_x$  при  $l_y = \text{const}$  и  $l_z = \text{const}$ . Этот постепенный рост продолжается до продольной координаты  $z = 1 - \delta$ . После  $z = 1 - \delta$  происходит интенсивное снижение до 0 массовой доли фракции из-за уменьшения фракционного объема  $V_{фр}$ .

Эти данные с определением  $\varphi(U)$  представлены на рис. 3, на рис. 4 изображена интегральная функция распределения  $\Phi(U)$ .

Безразмерная форма поверхности горения для плоского канала  $\Psi$ , согласно (18), с помощью данных [11] распространяется на каналы других форм, а уравнение (15) позволяет решить задачу по описанию  $\Psi$  для

переменных по длине  $z$  поперечных размеров канала. Применение метода суперпозиции решений позволяет найти  $\Psi$  для ограниченных каналов любых канонических, согласно [11, 14, 15], поперечных сечений.

Аналогичные результаты получаются при рассмотрении гетерогенных факелов, формирующихся из диспергированного жидкого или измельченного твердого топлива [16 – 18].

**Выводы.** Обобщенное рассмотрение факельных процессов с позиций теории вероятностей при различной плотности нормального распределения  $\varphi(U)$  и различии фазового состава компонентов горения произведено с помощью интегральной нормальной функции  $\Phi(U)$ . Устойчивая форма  $\Phi(U)$  достоверно объясняет S-образную продольную температурную функцию, наблюдаемую на практике и служащую базой для тепловой и нестационарной теории воспламенения.

На основе распределения адиабатической температуры в факельном континууме, связанной с  $\Phi(U)$ , возможно определение фактической температуры факела в рабочем пространстве с учетом радиационных свойств всех элементов теплообменной системы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вильямс Ф.А. Теория горения. – М.: Наука, 1971. – 616 с.
2. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения: Физика. – М.: Изд-во «Книга по Требованию», 2012. – 320 с.
3. Математическая теория горения и взрыва / Б.Я. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
4. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1995. – 240 с.
5. Лисиенко, В.Г. Волков В.В., Гончаров А.Л. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах. – Киев: Наукова думка, 1984. – 232 с.

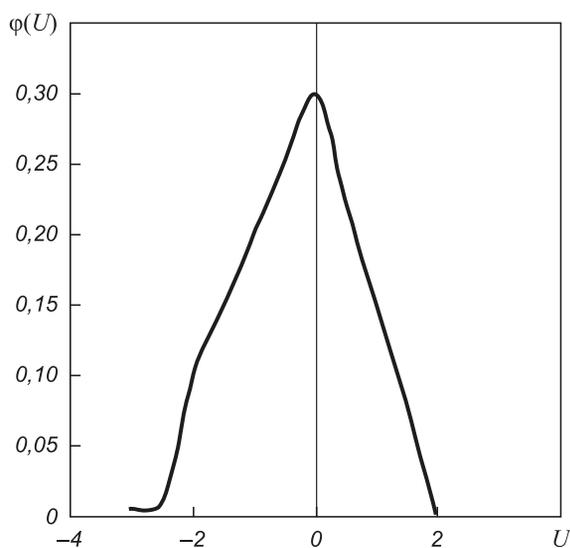


Рис. 3. Плотность нормального несимметричного распределения  $\varphi(U) \equiv f(U)$  в гомогенном факеле

Fig.3. Density of normal asymmetrical distribution  $\varphi(U) \equiv f(U)$  in a homogeneous flame

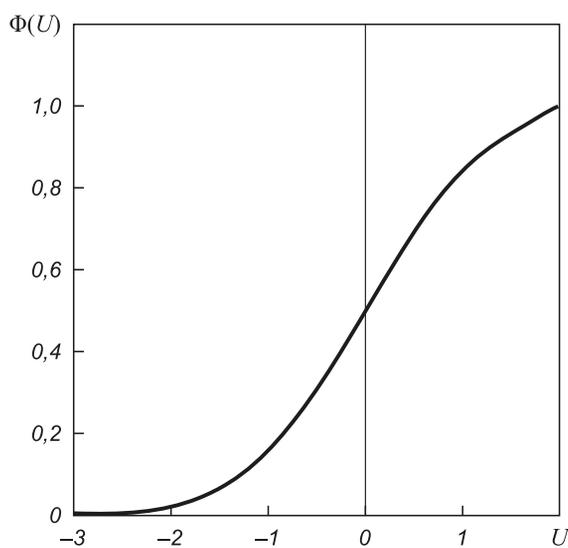


Рис. 4. Интегральная функция распределения  $\Phi(U)$  в гомогенном факеле по данным рис. 3.

Fig. 4. The cumulative distribution function  $\Phi(U)$  in a homogeneous flame according to the Fig. 3.

6. Лисенко В.Г., Волков В.В., Маликов Ю.К. Улучшение топливоиспользования и управления теплообменом в металлургических печах. – М.: Металлургия, 1988. – 230 с.
7. Лисенко В.Г. Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание. В 2-х книгах. Кн. 2. – М.: Теплоэнергетик, 2003. – 768 с.
8. ANSYS: <http://www.ansys.com/products>.
9. Сполдинг Д.Б. Вычислительная гидродинамика (CFD): прошлое, настоящее и будущее: Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках. В 2-х томах. Т. 1. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. С. 9 – 13.
10. Корн, Г.А., Корн, Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – СПб.: Лань, 2003. – 831 с.
11. Торопов Е.В. Влияние формы и термической массивности тел на эффективность аккумуляционных процессов // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. 2016. Т. 16. № 2. С. 117 – 121.
12. Торопов Е.В., Осинцев К.В. Концентрация факельного континуума для зоны интенсивного горения котельного агрегата // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. 2015. Т. 15. № 3. С. 5 – 10.
13. Торопов Е.В., Осинцев К.В. Основные характеристики факельного континуума в зоне интенсивного горения котельного агрегата // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. 2016. Т. 16. № 2. С. 14 – 21.
14. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
15. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос: Учебник для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
16. Торопов Е.В., Осинцев К.В. Математическая модель определения начального участка гетерогенного факела и ее адаптация // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. 2016. Т. 16. № 3. С. 15 – 22.
17. Харрьё Д.Т., Рирдон Ф.Г. Неустойчивость горения в ЖРД. – М.: Мир, 1975. – 869 с.
18. Технологическое сжигание и использование топлива / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, Ю.М. Голдобин, Г.П. Ясников. – М.: Теплотехник, 2005. – 288 с.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 8, pp. 662–669.

## FLAME PROCESSES FROM POSITIONS OF PROBABILITY THEORY

*E.V. Toropov<sup>1</sup>, L.E. Lymbina<sup>1</sup>, Yu.G. Yaroshenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** To solve the problem of determining the flame temperature in the working space of the thermal units it is proposed to calculate the change of adiabatic enthalpy by using methods of probability theory. It is shown that the normal function of the fuel cells distribution allows to obtain the integral function of enthalpy and adiabatic temperature along the length of flame distribution, including at asymmetrical distribution function. The problem is solved regarding homogeneous diffusive gaseous flames, associated with the combustion of sprayed liquid fuel. Transfer equations solutions regularization's conditions are defined, homochronic number and Bio mass transfer number relation's approximations are proposed. For synthesis of the solution on canals of initial forms the corresponding linear connections are proposed; the limits of change of the mass transfer Bio number and the convergence of series sums in the regularization of solutions of the surface combustion equation are defined according to the method of Burke-Schumann. Flame length's dispersion factor's variability is considered. The explanation of the S-shaped temperature curve observed by the burning of nearly all fuels in installations of various types is proposed. Flame processes generally examined by probability theory with various density of normal distribution function  $\varphi(U)$  for homogenic flame by normal integral function  $\Phi(U)$  are described. The steady form  $\Phi(U)$  significantly explains the S-shaped longitudinal temperature function observed in practice and which serves as a basis for thermal and non-stationary theory of ignition. Actual flame's temperature determination is possible on flare's continuum adiabatic temperature placement taking into account the radiative properties of all heat transfer system's elements. Likewise the task of heterogenic flame's axial temperature's description with variable dispersion factor  $\sigma$  can be solved.

**Keywords:** flame, homogeneous, probability theory, distribution of fractions, dispersion factor, integral function, enthalpy, adiabatic temperature.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-662-669

### REFERENCES

1. Williams Forman A. *Combustion theory*. Addison-Wesley Publishing Company, 1965, 447 p. (Russ.ed.: Williams F.A. *Teoriya goreniya*. Moscow: Nauka, 1971, 616 p.).
2. Spalding D.B. *Some fundamentals of combustion*. London: Butterworth Scientific publications, 1955, 250 p. (Russ.ed.: Spalding D.B. *Osnovy teorii goreniya: Fizika*. Moscow: Izd-vo Kniga po Trebovaniyu, 2012, 320 p.).
3. Zel'dovich B.Ya., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* [Mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow: Nauka, 1980, 478 p. (In Russ.).
4. Lisienko V.G. Lobanov V.I., Kitaev B.I. *Teplofizika metallurgicheskikh protsessov* [Thermal physics of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1995, 240 p. (In Russ.).
5. Lisienko V.G. Volkov V.V., Goncharov A.L. *Matematicheskoe modelirovanie teploobmena v pechakh i agregatakh* [Mathematical modeling of heat transfer in furnaces and aggregates]. Kiev: Naukova dumka, 1984, 232 p. (In Russ.).
6. Lisienko V.G., Volkov V.V., Malikov Yu.K. *Uluchshenie toplivoispol'zovaniya i upravleniya teploobmenom v metallurgicheskikh pechakh* [Improving fuel consumption and management of heat transfer in metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 230 p. (In Russ.).
7. Lisienko V.G. Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G. *Khrestomatiya energosberezheniya: Spravochnoe izdanie: V 2-kh knigakh. Kniga 2* [Energy saving readings: Ref.: In 2 books. Book 2]. Moscow: Teploenergetik, 2003, 768 p. (In Russ.).
8. ANSYS: *Products*. Available at URL: <http://www.ansys.com/products>.
9. Spalding D.B. *Vychislitel'naya gidrodinamika (CFD): proshloe, nastoyashchee i budushchee: Problemy gazodinamiki i teploobmena v energeticheskikh ustanovkakh. V 2-kh tomakh. Tom 1* [Computational fluid dynamics (CFD): past, present and future: Problems of gas dynamics and heat exchange in power plants. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow: Izdatel'skii dom MEI, 2007, pp. 9–13. (In Russ.).
10. Korn Granino A., Korn Theresa M. *Mathematical handbook for scientists and engineers. Definitions, theorems and formulas for reference and review*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw – Hill, 2000. (Russ.ed.: Korn G.A., Korn T.M. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. St. Petersburg: Lan', 2003, 831 p.).
11. Toropov E.V. Influence of shape and thermal massiveness of the bodies on the accumulation processes efficiency. *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya*. 2016, vol. 16, no. 2, pp. 117–121. (In Russ.).
12. Toropov E.V., Osintsev K.V. Concentration of flare continuum for the intensive burning zone in boiler unit. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*. 2015, vol. 15, no. 3, pp. 5–10. (In Russ.).

13. Toropov E.V., Osintsev K.V. Main characteristics of the flare continuum in intensive burning zone in boiler unit. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*. 2016, vol. 16, no. 2, pp. 14–21. (In Russ.).
14. Kutateladze S.S. *Teplotperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie: Spravochnoe posobie* [Heat transfer and flow resistance: Reference manual]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 367 p. (In Russ.).
15. Telegin A.S., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassoperenos: Uchebnik dlya vuzov* [Heat and mass transfer: Textbook for universities]. Moscow: Akademykniga, 2002, 455 p. (In Russ.).
16. Toropov E.V., Osintsev K.V. Mathematical model for determining the initial zone of heterogeneous torch and its adaptation. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*. 2016, vol. 16, no. 3, pp. 15–22. (In Russ.).
17. Harrje D.T., Reardon F.H. *Liquid propellant rocket combustion instability*. Washington D.C.: NASA, 1972, 657 p. (Russ.ed.: Harrje D.T., Reardon F.H. *Neustoichivost' goreniya v ZhrD*. Moscow: Mir, 1975, 869 p.).
18. Vintovkin A.A., Ladygichev M.G., Goldobin Yu.M., Yasnikov G.P. *Tekhnologicheskoe szhiganie i ispol'zovanie topliva* [Technological combustion and use of fuel]. Moscow: Teplotekhnika, 2005, 288 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**E.V. Toropov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Heat Power Engineering” (evtor@mail.ru)

**L.E. Lymbina**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Heat Power Engineering”

**Yu.G. Yaroshenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (yury-y@planet-a.ru)

Received April 12, 2017

## РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ПЕЧЕЙ-МИКСЕРОВ ДЛЯ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

*Дружинин Г.М.<sup>1,2</sup>, д.т.н., зам. директора по науке, профессор кафедры «Теплофизика  
и информатика в металлургии» (avto1943@gmail.com)*

*Ашихмин А.А.<sup>2</sup>, к.т.н., зам. заведующего лабораторией теплотехники и систем  
отопления нагревательных печей (gorelka.a@yandex.ru)*

*Лошкарев Н.Б.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (gorelka.l@yandex.ru)*

*Маслов П.В.<sup>2</sup>, старший научный сотрудник (pavvmaslov@yandex.ru)*

*Хамматов И.М.<sup>2</sup>, к.т.н., ведущий инженер лаборатории теплотехники и систем  
отопления нагревательных печей (hammatof@yandex.ru)*

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»  
(620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

**Аннотация.** Особенностью плавки в печи Ванюкова медьсодержащих руд является образование жидких продуктов в виде расплавов шлака и штейна, которые, как правило, сливаются в отдельные емкости (печи-миксера), где необходимо поддерживать нужную температуру. Печь-миксер представляет собой футерованную внутри цилиндрическую емкость, закрытую с двух сторон торцевыми днищами, где с одной стороны устанавливается горелка для разогрева и поддержания температуры внутри емкости, с другой размещена заливная горловина. Разработаны, изготовлены и запущены в эксплуатацию автоматизированные горелочные устройства ГПМ-3,6 печей-миксеров шлака и штейна на медеплавильном заводе Алмалыкского горно-металлургического комбината (Республика Узбекистан). Назначение горелочных устройств – разогрев печей-миксеров до рабочих температур  $1250 \div 1275$  °С и  $1110 \div 1150$  °С соответственно и поддержание температуры залитого в миксер расплава на заданном уровне при любых технологических операциях. Система автоматизации обеспечивает надежную и безопасную работу горелочных устройств, включая розжиг из холодного состояния, работу в заданных диапазонах температур через регулирование тепловой нагрузки и остановка, в том числе по аварийным условиям. При этом в полном объеме происходит передача и обмен информацией с центральным контроллером АСУ печи Ванюкова посредством интерфейса Profibus DP. Разработанные горелочные устройства полностью соответствуют требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования» и нормам и правилам металлургического производства. Для газоснабжения горелочных устройств была разработана специальная газовая рампа, представляющая собой компактный (отдельный) участок газопровода со всей необходимой газовой аппаратурой для эксплуатации основной и запальной горелок как в ручном режиме управления, так и в автоматическом. В состав газовой рампы включена система газовой безопасности. Наличие такой рампы обеспечивает регулирование давления газа до параметров, необходимых для работы основной горелки, плавное регулирование расхода топлива в пределах устойчивой работы горелочного устройства, технологический учет расхода газа на отопление миксера, безопасную эксплуатацию запальной и основной горелок. Для воздухообеспечения горелочного устройства была также разработана воздушная рампа, представляющая собой компактный участок воздухопровода с установленной на нем запорно-регулирующей арматурой. В состав воздушной рампы входит поворотный узел, позволяющий осуществлять поворот печи-миксера на определенный угол для слива расплава без отсоединения воздухопровода горелки.

**Ключевые слова:** печь-миксер, штейн, шлак, горелочное устройство, запальная горелка, природный газ, газовая рампа, воздушная рампа, температура расплава, система автоматики.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-670-678

При плавке в печи Ванюкова [1 – 5] сульфидных медьсодержащих руд образуются жидкие продукты в виде шлака и штейна, которые по обогреваемым желобам поступают в специальные печи-миксеры для накопления. Из них периодически штейн при температуре  $1110 \div 1150$  °С выпускается в ошлакованные ковши, а шлак с температурой  $1250 \div 1275$  °С – в чаши железно-дорожных шлаковозов.

Печь-миксер (рис. 1) представляет собой футерованную внутри цилиндрическую емкость, закрытую с обеих сторон торцевыми днищами. В одно из них устанавливают горелочное устройство, а в другом находится заливочная горловина.

В горловине расположен носик заливного желоба, по которому подается расплав шлака или штейна из печи Ванюкова. Кроме того, в корпусе имеется сливное

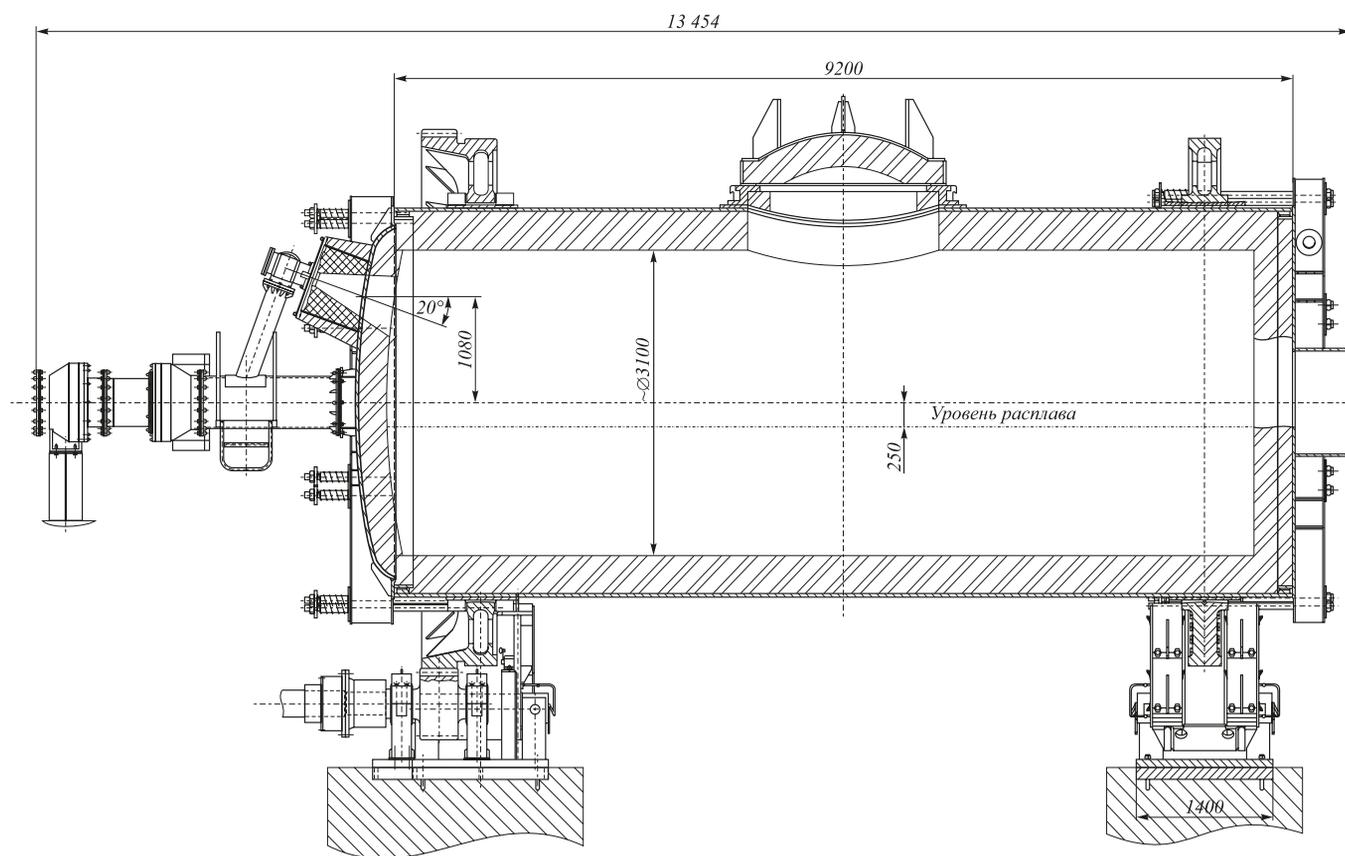


Рис. 1. Печь-миксер

Fig. 1. Holding furnace

отверстие, через которое при повороте миксера по оси на угол  $45 - 50^\circ$  проходит выпуск расплава в соответствующие емкости.

Назначение горелочных устройств – разогрев печи-миксера до рабочих температур, обеспечивающих безопасную заливку расплавов шлака или штейна и поддержание температуры расплава на заданном уровне (шлака –  $1250 \div 1275^\circ\text{C}$ , штейна –  $1110 \div 1150^\circ\text{C}$ ).

Согласно проекту, на обоих миксерах должны быть установлены идентичные горелки для сжигания природного газа. Тепловая мощность горелок – до 3,6 МВт. Теплота сгорания газа  $Q_H^P = 34,35 \text{ МДж/м}^3$ , давление газа после газорегуляторной установки (ГРУ)  $P_G = 45 \text{ кПа}$ , давление воздуха после вентилятора  $P_B = 25 \text{ кПа}$ . Диапазон регулирования мощности горелки – 0,8 – 3,6 МВт.

Горелочное устройство [6 – 9] должно иметь систему розжига и контроля факела, а также снабжено полнофункциональной автоматикой безопасности и регулирования с интерфейсом Profibus DP для связи и обмена командами с центральным процессором управления печи [10 – 12].

В соответствии с этими требованиями была разработана новая двухпроводная горелка ГПМ-3,6 (рис. 2). Технические характеристики приведены ниже.

Номинальная тепловая мощность, МВт	3,6
Номинальный расход газа, $\text{м}^3/\text{ч}$	360
Номинальное давления перед горелкой, кПа:	
– газа	10
– воздуха	10
Коэффициент избытка воздуха номинальный	1,1
Коэффициент рабочего регулирования	5
Масса горелки, кг	48
Габаритные размеры горелки, мм	626×315×380

Горелка ГПМ-3,6 относится к классу горелок с принудительной подачей воздуха и неполным предварительным смешением по ГОСТ 21204-97 [9] и конструктивно состоит из следующих основных частей (см. рис. 2):

- цилиндрический корпус 1 с радиальным воздушным патрубком;
- газовая труба 2 с резьбовым концом и фланцем крепления к корпусу 1;
- газовое сопло 3 с центрирующими лопатками, которое навинчивается на резьбовой конец газовой трубы 2;
- подводящий газовый патрубок 4, который крепится к фланцу газовой трубы 2 с наружной стороны;
- оптический датчик контроля пламени основной горелки 5.

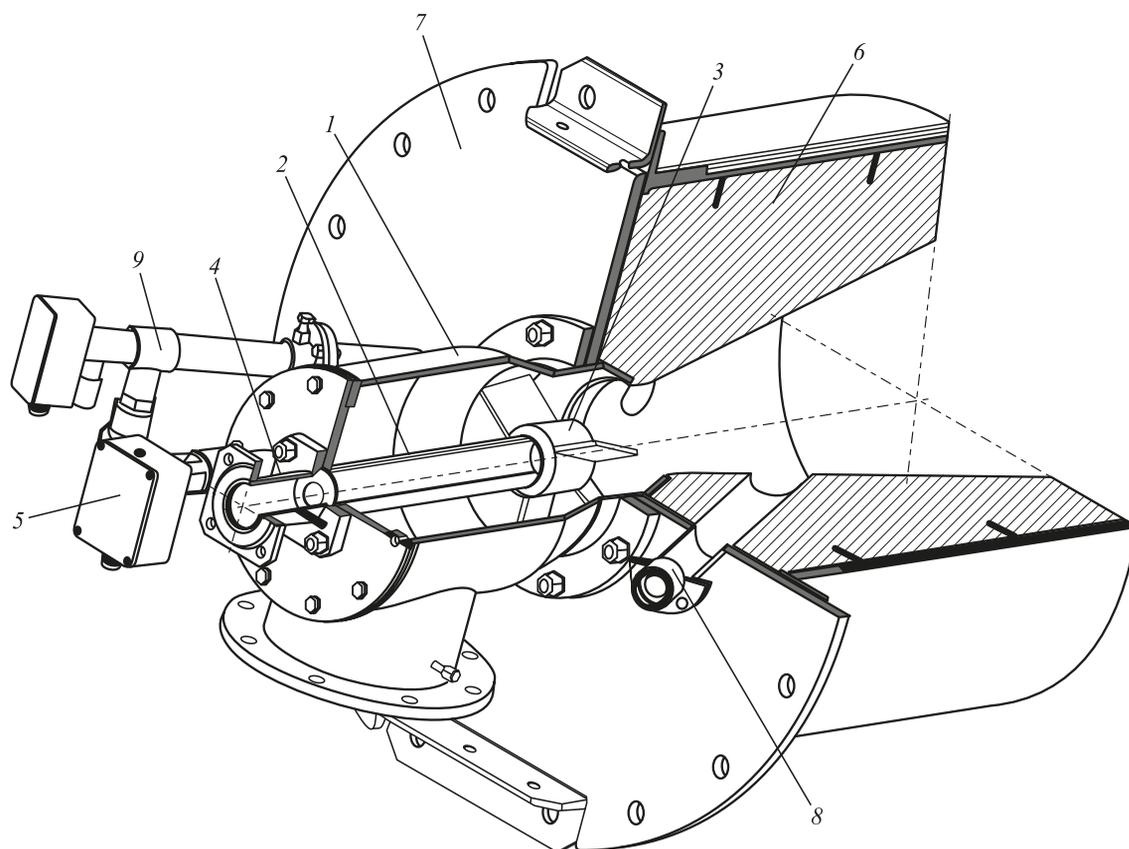


Рис. 2. Горелка ГПМ-3,6:  
 1 – корпус; 2 – газовая труба; 3 – газовое сопло; 4 – патрубок газовый подводящий; 5 – датчик контроля пламени;  
 6 – тоннель горелочный; 7 – плита монтажная; 8 – гляделка; 9 – горелка запальная

Fig. 2. Burner GPM-3,6:  
 1 – body; 2 – gas pipe; 3 – gas nozzle; 4 – gas supply branch; 5 – flame detector; 6 – burner duct; 7 – mounting plate;  
 8 – peephole; 9 – ignition burner

В состоянии поставки горелка комплектуется огнеупорным горелочным тоннелем 6 и монтажной плитой 7 для ее установки и крепления непосредственно на цилиндрическом патрубке дна печи-миксера. На монтажной плите также имеются закрытый кварцевым стеклом патрубок – гляделка 8 для визуального контроля пламени горелки и патрубков, в который установлена инжекционная запальная горелка 9.

Горелка работает следующим образом. Газ от газовой рампы через подводящий патрубок 4 поступает по газовой трубе 2 к соплу 3, истекает через систему газораздающих отверстий сопла и, перемешиваясь с потоком воздуха непосредственно в корпусе 1 на выходе из горелки, поступает в горелочный тоннель 6.

Воспламенение частично перемешанной газоздушной смеси в тоннеле осуществляется от факела запальной инжекционной горелки 9 с собственным ионизационным датчиком контроля пламени. Из-за недостаточно полного перемешивания газа и воздуха в горелке и далее, в плавно расширяющемся газовом тоннеле, горение газа происходит в режиме длинного растянутого факела [13, 14]. На этапе розжига горелки из холодного состояния и до выхода на режим устой-

чивого горения, во избежание отрыва пламени, запальная горелка работает постоянно в режиме запально-защитного устройства. После разогрева стенок тоннеля и стабилизации факела основной горелки, запальная горелка отключается.

Для газоснабжения горелочного устройства ГПМ-3,6 была спроектирована газовая рампа, представляющая собой готовый компактный участок газопровода с установленной на нем всей необходимой газовой арматурой для работы основного и запального горелочных устройств как в ручном режиме управления, так и в автоматическом (с местного или центрального пультов управления) по величине задаваемой тепловой нагрузки. Газовая рампа (рис. 3) выполнена на трех опорных стойках и является готовой сборочной единицей, предназначенной для установки на рабочей площадке вблизи печи-миксера.

В составе рампы предусмотрена отдельная ветка газопровода для подсоединения запальной горелки (Ду15), свеча безопасности (Ду20), продувочная свеча (Ду20).

Оборудование газовой рампы горелочного устройства обеспечивает:

- безопасную эксплуатацию горелочного устройства;
- плавное регулирование расхода газа в диапазоне 80 – 360 м<sup>3</sup>/ч;
- технологический учет расхода газа на горелочное устройство;
- редуцирование давления газа до параметров, необходимых для работы горелочного устройства.

Соединение горелочного устройства с газопроводами газовой рампы выполнено с помощью подвижных металлорукавов (Ду65, длина 4600 мм – на основную горелку и Ду16, длина 4800 мм – на запальную горелку). Компоновка металлорукавов исключает их скручи-

вание и перегиб сверх допустимых значений в процессе поворота печей-миксеров для слива расплавов шлака или штейна (рис. 4).

Для воздухоснабжения горелочного устройства была спроектирована и изготовлена воздушная рампа, представляющая собой компактный участок воздухопровода с установленной на нем необходимой арматурой:

- дисковым поворотным затвором Ду150 на подводе воздуха;
- регулирующей заслонкой ЗР-6 (Ду150) для плавного регулирования расхода воздуха на горелочное устройство ГПМ-3,6 в диапазоне от 800 до 3600 м<sup>3</sup>/ч;

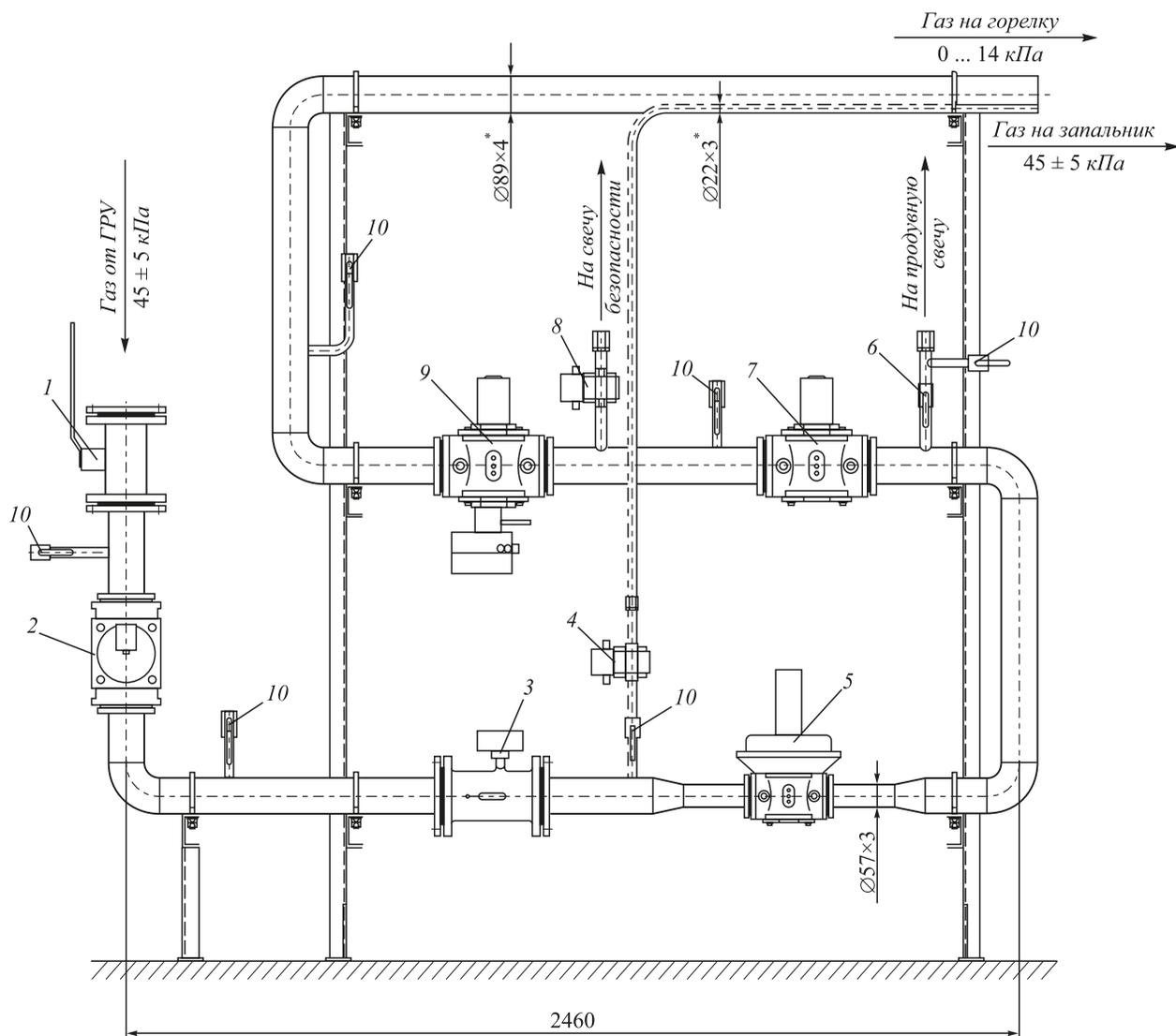


Рис. 3. Рампа газовая:

- 1 – кран шаровый Ду80; 2 – фильтр газовый ФНЗ-1; 3 – счетчик газа СТГ-80-400; 4 – электромагнитный клапан ВН1/2Н-4; 5 – регулятор-стабилизатор давления РС2-0,5-140-200; 6 – кран шаровый Ду20; 7 – электромагнитный клапан ВНЗН-1; 8 – нормально-открытый электромагнитный клапан ВФ3/4Н-4; 9 – электромагнитный клапан с электромеханическим регулятором расхода ВНЗМ-1К; 10 – кран шаровый Ду15

Fig. 3. Gas manifold:

- 1 – ball valve DN 80; 2 – gas filter FNZ-1; 3 – gas meter STG-80-400; 4 – electromagnetic valve VN1/2N-4; 5 – pressure regulator/stabilizer RS2-0,5-140-200; 6 – ball valve DN20; 7 – electromagnetic valve VN3N-1; 8 – normally electromagnetic valve VF3/4N-4; 9 – electromagnetic valve with electromechanical flow controller VN3M-1K; 10 – ball valve DN 15

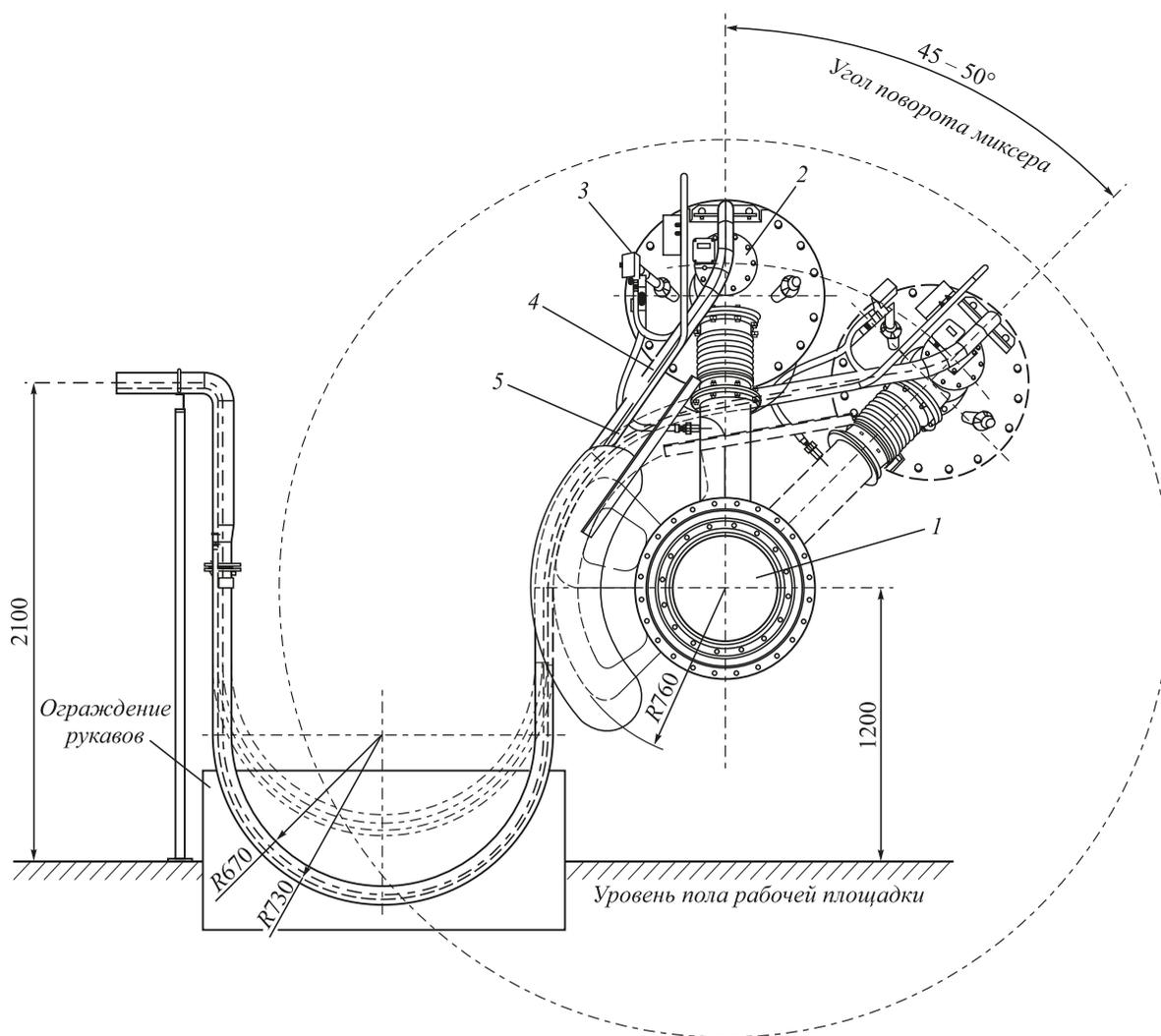


Рис. 4. Подводы газа и воздуха к основной и запальной горелкам:  
 1 – подвижный воздухопровод печи-миксера; 2 – основная горелка печи; 3 – запальная горелка;  
 4 – подводящий газопровод основной горелки; 5 – подводящий газопровод запальной горелки

Fig. 4. Gas and air supply pipes to the main and ignition burners:  
 1 – moveable air pipeline of the holding furnace; 2 – main burner of the furnace; 3 – ignition burner,  
 4 – gas supply pipeline of the main burner; 5 – gas supply pipeline of the ignition burner

– шаровыми кранами Ду15 для подключения датчиков давления.

На выходе воздухопровод имеет плавное расширение с Ду150 до Ду350 для обеспечения стыковки с узлом поворотного воздухопровода горелки, входящим в состав печи-миксера. Воздушная рампа размещена на трех опорных стойках и представляет собой готовую сборочную единицу для быстрого монтажа на рабочей площадке вблизи печи-миксера.

Система управления горелочными устройствами предназначена для управления работой технологическими горелками печей-миксеров в ручном или автоматическом режиме. Функциональная схема системы управления приведена на рис. 5. Система обеспечивает выполнение следующих функций:

– контроль герметичности газовых электромагнитных клапанов перед розжигом горелки;

– включение – отключение запальной горелки;

– зажигание факела основной технологической горелки;

– отключение подачи газа на основную технологическую горелку при выходе технологических параметров из диапазонов автоматики безопасности или при нажатии кнопки на экране визуализации на операторской панели;

– аварийную сигнализацию и отображение на панели оператора причин аварийного отключения газа;

– отображение давлений газа и воздуха, состояния запорной арматуры, трансформатора, датчиков контроля пламени на операторской панели;

– отображение на операторской панели текущего состояния системы в режиме розжига;

– управление воздушной и газовой регулируемыми заслонками согласно заданию нагрузки (локально, на



операторской панели шкафа контроля, или удаленно, от центрального контроллера АСУ печи Ванюкова);

– обмен с центральным контроллером АСУ печи посредством интерфейса Profibus DP.

Система управления строится на базе контроллера S7-1200 (Siemens), отображение текущих технологических параметров и оперативное управление производится с панели оператора Basic Panel КТР400 Basic 4,3" шкафа контроля. Визуализация параметров автоматики безопасности обеспечена также на автоматизированном рабочем месте (АРМ) технолога всего комплекса печи Ванюкова в помещении КИП.

Программа управления может находиться в четырех состояниях: ожидание розжига, розжиг, рабочий режим и аварийное отключение. После подачи напряжения на контроллер, программа находится в состоянии ожидания розжига. При нажатии кнопки «Пуск» начинается процедура розжига, если розжиг прошел успешно, то программа переходит в рабочий режим. В любой момент при розжиге или в рабочем режиме при выходе технологических параметров из диапазонов автоматики безопасности или при нажатии оператором кнопки «Аварийный останов» на лицевой панели шкафа контроля программа переходит в аварийное состояние. При этом на экране визуализации появляется сообщение о причине аварийного останова, включается световая и звуковая сигнализация. После планового отключения горелочного устройства (при нажатии кнопки «Стоп» или от команды центрального контроллера АСУ печи Ванюкова) программа переходит в состояние ожидания розжига.

В соответствии с разработанной рабочей документацией было изготовлено два комплекта горелочных устройств в составе собственно горелок ГПМ-3,6 и горелочных тоннелей, которые были укомплектованы датчиками контроля пламени ФДС-03-220 и инъекционными газовыми запальниками ЗСУ-ПИ-38-70.

Кроме того, были изготовлены газовые и воздушные рампы, специальные монтажные приспособления для установки горелочных тоннелей и самих горелок на печи-миксеры.

Одна из горелок была подвергнута испытаниям на огневом стенде с целью подтверждения соответствия требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования» [15]. По результатам испытаний было установлено, что горелка ГПМ-3,6 обеспечивает полное сгорание природного газа и соответствует требованиям ТР ТС 010/2011. На горелку оформлена декларация соответствия, паспорт и руководство по эксплуатации.

Горелочные устройства, тоннели, газовые и воздушные рампы, а также оборудование системы автоматизации управления работой горелок были смонтированы на печах-миксерах и проведены пусконаладочные работы [16]. Кроме проверки и подтверждения работоспособности отдельных элементов всей системы отопления миксеров, была проведена тарировка датчиков давления и расходомеров воздуха с помощью пневмометрической трубки ВТИ и дифманометра Testo510. Подтверждена адекватность измерения расхода воздуха установленными диафрагмами. Проведена проверка розжига запальных горелок в ручном и автоматическом режимах, определено оптимальное положение запальника в горелочном тоннеле. Установлено, что запальник надежно охлаждается при работе основной горелки предусмотренным специальным отбором воздуха и при этом не наблюдаются какие-либо негативные явления в факеле основной горелки.

Выполнено программирование контроллеров, реализующее все намеченные алгоритмы управления работой горелочных устройств, а также произведена отладка всей программы [17, 18]. Так же проверен и отлажен взаимный командообмен контроллеров с центральным процессором АСУ печи Ванюкова для удаленного управления горелочными устройствами печей-миксеров в соответствии с программой работы плавильной печи [19].

При достижении температуры футеровки миксера 600 °С во время сушки и разогрева, дальнейший подъем температуры осуществлялся горелками ГПМ-3,6. На этих режимах была проверена и подтверждена возможность регулирования тепловой мощности горелок в ручном и автоматическом вариантах, зафиксированы необходимые параметры топлива и воздуха на запальных и основных горелках, составлена режимная карта работы.

**Выводы.** Разработанная система отопления печей-миксеров полностью удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям и обеспечивает безопасную и стабильную работу агрегатов в автоматическом режиме в соответствии с технологическим режимом работы плавильной печи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ванюков А.В. Перспективы развития плавки в жидкой ванне различного сырья // Цветные металлы. 1985. № 9. С. 7 – 12.
2. Плавка в жидкой ванне / А.В. Ванюков и др. / Под ред. А.В. Ванюкова. – М.: Металлургия, 1988. – 260 с.
3. Ванюков А.В., Уткин Н.И. Комплексная переработка медного и никелевого сырья: Учебник для вузов / Под ред. А.В. Ванюкова. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 432 с.
4. Кривандин В.А. Теплотехника металлургического производства. Т. 2. Конструкция и работа печей: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.А. Кривандина. – М.: МИСИС, 2001. – 736 с.
5. Процессы и аппараты цветной металлургии: Учебник для вузов / С.С. Набойченко и др. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 700 с.
6. Гусовский В.Л., Лившиц А.Е., Тымчак В.М. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей: Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – 272 с.
7. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справ. издание / А.А. Винтовкин и др. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 496 с.

8. Корнеев С.В. Особенности выбора горелочных устройств для нагревательных печей машиностроительного и металлургического производств // *Литье и металлургия*. 2010. № 3 (57). С. 162 – 168.
9. ГОСТ 21204-97. Горелки газовые промышленные. Классификация. Общие технические требования, маркировка и хранение.
10. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
11. Костин Е.В. Алгоритмическое обеспечение управления качеством продуктов плавки в печах Ванюкова // *Вестник СибГАУ*. 2013. № 2 (48). С. 192 – 198.
12. Britz H., Kneip M., Poppenhager J. Новая концепция автоматизации для нагревательных печей, работающих на газе // *Stahl und Eisen*. 1988. № 108. С. 655 – 666.
13. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 2. Кн. 1. Новые способы, модельные и экспериментальные исследования. – Екатеринбург: УРФУ, 2013. – 592 с.
14. Винтовкин А.А., Денгуб В.В., Воронов Г.В. Топливо, его сжигание и взрывобезопасность / Под ред. А.А. Винтовкина. – Екатеринбург: Межрегиональный издательский центр. 2015. – 303 с.
15. Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования».
16. Промышленные печи и тепловые агрегаты. Проведение и контроль выполнения пуско-наладочных работ. СТО НОСТРОЙ 2.31.12-2011. – М.: ООО Изд-во «БСТ», 2011. – 41 с.
17. Митин Г.П., Хазанова О.В. Системы автоматизации с использованием программируемых логических контроллеров: Учеб. пособие. – М.: ИЦ МГТУ «Станкин», 2005. – 185 с.
18. Деменков Н.П. Языки программирования промышленных контроллеров: Учеб. пособие / Под ред. К.А. Пункова. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 95 с.
19. Елизаров Н.А., Мартемьянов Ю.Ф. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2004. – 352 с.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 8, pp. 670–678.

## DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AUTOMATED HEATING SYSTEM FOR HOLDING FURNACES IN NON-FERROUS METALLURGY

*G.M. Druzhinin<sup>1,2</sup>, A.A. Ashikhmin<sup>2</sup>, N.B. Loshkarev<sup>1</sup>, P.V. Maslov<sup>2</sup>, I.M. Khammatov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”), Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** A feature of the smelting of copper-bearing ores in the Vanyukov furnace is the formation of liquid products in the form of slag and matte melts, which, as a rule, merge into separate containers (mixer furnaces), where it is necessary to maintain the desired temperature. The mixer oven is a cylindrical container lined inside, closed from both sides by end bottoms, on the one hand a burner is installed to heat and maintain the temperature inside the container, on the other hand, a filler neck is placed. Automated burner devices GPM-3,6 were developed, manufactured and put into operation in slag and matte holding furnaces at the copper-smelting plant of Almalyk Mining and Metallurgical Complex (Republic of Uzbekistan). The burner devices are designed for heating holding furnaces up to the operating temperatures of 1250 – 1275 °C and 1110 – 1150 °C respectively and maintaining the temperature of liquid melt poured in the mixer at the preset level at any technological operations. The automated system provides reliable and safe operation of the burner devices, including cold ignition, operation within the preset temperature ranges by regulation of heat loads and shutoffs, among other things in case of emergency. Simultaneously, full information is transferred and exchanged with the central controller of the Automated Control System of Vanyukov Furnace through Profibus DP. The developed burner devices fully comply with the requirements of the Technical Regulations of the Customs Union TR TC 010/2011 On Safety of Machines and Equipment and with the norms and rules of metallurgical production. For the gas supply of burners, a special gas ramp was developed, which is a compact (separate) section of the gas pipeline with all the necessary gas equipment for operation of the main and pilot burners, both in manual control mode and in automatic mode. The gas train includes a gas safety system. The presence of such a ramp ensures regulation of the gas pressure to the parameters required for the operation of the main burner, smooth regulation of fuel consumption within the stable operation of the burner, technological

accounting of gas consumption for mixer heating and safe operation of the pilot and main burners. For air supply of the burner device, an air ramp was also designed, which is a compact section of the air pipe with shut-off and control valves installed on it. The composition of the air ramp includes a swivel assembly that allows the mixer to rotate to a certain angle for draining the melt without disconnecting the burner air duct.

**Keywords:** holding furnace, matte, slag, burner device, ignition burner, natural gas, gas manifold, air manifold, melt temperature, automation system.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-670-678

### REFERENCES

1. Vanyukov A.B. Prospects for development of melting of various raw materials in a liquid bath. *Tsvetnye metally*. 1985, no. 9, pp. 7–12. (In Russ.).
2. Vanyukov A.V. etc. *Plavka v zhidkoi vanne* [Melting in a liquid bath]. Vanyukov A.V. ed. Moscow: Metallurgiya, 1988, 260 p. (In Russ.).
3. Vanyukov A.V., Utkin N.I. *Kompleksnaya pererabotka mednogo i nikelovogo syr'ya: uchebnik dlya vuzov* [Complex processing of copper and nickel raw materials: Textbook for universities]. Vanyukov A.V. ed. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1988, 432 p. (In Russ.).
4. Krivandin V.A. *Teplotekhnika metallurgicheskogo proizvodstva. T. 2. Konstruktsiya i rabota pechei: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Heat engineering of metallurgical production. Vol. 2. Design and operation of furnaces]. Moscow: MISIS, 2001, 736 p. (In Russ.).
5. Naboichenko S.S. etc. *Protsessy i apparaty tsvetnoi metallurgii: Uchebnik dlya vuzov* [Processes and apparatuses of non-ferrous metallurgy: Textbook for universities]. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2005, 700 p. (In Russ.).
6. Gusovskii V.L., Livshits A.E., Tymchak V.M. *Sozhitatel'nye ustroystva nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei. Spravochnik* [Intermediary devices of heating and thermal furnaces. Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 272 p. (In Russ.).
7. Vintovkin A.A. etc. *Sovremennye gorelochnye ustroystva (konstruktsii i tekhnicheski kharakteristiki). Spravochnoe izdanie* [Modern burner devices (designs and technical characteristics). Reference edition]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2001, 496 p. (In Russ.).

8. Korneev S.V. Features of the choice of burner devices for heating furnaces of machine-building and metallurgical industries. *Lit'e i metallurgiya*. 2010, no. 3 (57), pp. 162–168. (In Russ.).
9. GOST 21204-97. *Gorelki gazovye promyshlennye. Klassifikatsiya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya, markirovka i khranenie* [Industrial gas burners. Classification. General technical requirements, marking and storage]. (In Russ.).
10. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoi dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov* [Intellectual technologies for monitoring and managing the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow: Nauka, 2006, 410 p. (In Russ.).
11. Kostin E.V. Algorithmic management of the quality of smelting products in Vanyukov furnaces. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 2 (48), pp. 192–198. (In Russ.).
12. Britz H., Kneip M., Poppenhager J. New concept of automation for heating furnaces operating on gas. *Stahl und Eisen*. 1988, no. 108. S. 655–666.
13. Lisenko V.G. *Sovershenstvovanie i povyshenie effektivnosti energotekhnologii i proizvodstv. T. 2. Kn. 1 Novye sposoby, model'nye i eksperimental'nye issledovaniya: Monografiya* [Perfection and increase of efficiency of energy technologies and productions. Vol. 2. Book 1. New methods, model and experimental studies: Monograph]. Ekaterinburg: URFU, 2013, 592 p. (In Russ.).
14. Vintovkin A.A., Den'gub V.V., Voronov G.V. *Toplivo, ego szhiganiye i vzyvobezopasnost'* [Fuel, its combustion and explosion safety]. Vintovkin A.A. ed. Ekaterinburg: Mezhhregional'nyi izdatel'skii tsentr, 2015, 303 p. (In Russ.).
15. *Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo Soyuzha TR TS 010/2011 "O bezopasnosti mashin i oborudovaniya"* [Technical regulations of the Customs Union TR 010/2011 "Safety of machinery and equipment"]. (In Russ.).
16. *Promyshlennyye pechi i teplovye agregaty. Provedeniye i kontrol' vypolneniya puskonalyadochnykh rabot. STO NOSTROI 2.31.12-2011* [Industrial furnaces and heat units. Carrying out and control of the implementation of commissioning. STO NOSTROY 2.31.12.2011]. Moscow: BST, 2011, 41 p. (In Russ.).
17. Mitin G.P., Khazanova O.V. *Sistemy avtomatizatsii s ispol'zovaniem programmiruemykh logicheskikh kontrollerov: Uchebnoe posobie* [Automation systems using programmable logic controllers: Manual]. Moscow: ITs MGTU "Stankin", 2005, 185 p. (In Russ.).
18. Demenkov N.P. *Yazyki programmirovaniya promyshlennykh kontrollerov: Uchebnoe posobie* [Programming languages of industrial controllers: Manual]. Punkov K.A. Moscow: izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2004, 95 p. (In Russ.).
19. Elizarov N.A., Martem'yanov Yu.F. *Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii. Programmno-tekhnicheskie komplekсы i kontrolyery* [Technical means of automation. Software and hardware systems and controllers]. Moscow: izd-vo "Mashinostroeniye", 2004, 352 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

- G.M. Druzhynin**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Science, Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (avto1943@gmail.com)
- A.A. Ashikhmin**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Laboratory "Thermal engineering and heating systems for heating furnaces" (gorelka.a@yandex.ru)
- N.B. Loshkarev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (gorelka.l@yandex.ru)
- P.V. Maslov**, Senior Researcher (pavvmaslov@yandex.ru)
- I.M. Khammatov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Engineer of the Laboratory "Thermal engineering and heating systems for heating furnaces" (hammatof@yandex.ru)

Received April 12, 2017

669.1.022; 622.7:669.1

## СОВРЕМЕННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ (на примере доменного производства)

*Лавров В.В.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (v.v.lavrov@urfu.ru)*

*Спириин Н.А.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» (n.a.spirin@urfu.ru)*

*Гуриин И.А.<sup>1</sup>, аспирант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (ivan.gurin@urfu.ru)*

*Рыболовлев В.Ю.<sup>2</sup>, к.т.н., начальник проектного офиса (rybolovlev.vy@mmk.ru)*

*Краснобаев А.В.<sup>2</sup>, к.т.н., менеджер проектного офиса (krasnobaev.av@mmk.ru)*

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»  
(455000, Россия, Магнитогорск, Челябинская обл., ул. Кирова, 70)

**Аннотация.** Как показывает опыт, создание и успешное внедрение в практику работы металлургических предприятий современных автоматизированных информационных систем во многом зависит от используемых технологий разработки и выбора инструментальных средств их программной реализации. В работе кратко отражены основные технологии и программные средства, используемые для создания программного обеспечения модулей автоматизированных информационных систем – информационно-моделирующих систем решения технологических задач в металлургии. Основой является применение гибкой методологии разработки – Agile-метода, ориентированного на использование итеративной разработки, динамического формирования требований пользователей и обеспечение их реализации в результате постоянного взаимодействия внутри рабочих групп, состоящих из специалистов различного профиля (пользователей, аналитиков, программистов, тестировщиков). Итерация представляет собой относительно короткий промежуток времени разработки (как правило, месяц), после окончания которого пользователям предоставляется очередная протестированная версия программного продукта с новыми функциональными свойствами. Перечень реализованных функциональных свойств является для пользователей приоритетным и формируется из общего списка требований перед началом каждой итерации. В течение каждой итерации последовательно выполняются следующие процессы: проверка корректности алгоритма расчета (при необходимости ввода новых расчетных показателей); функциональное моделирование системы; совершенствование структуры подсистемы; концептуальное моделирование базы данных, генерация даталогической модели базы данных; загрузка тестовых данных в базу данных; создание функциональных диаграмм математической библиотеки; реализация клиентского программного обеспечения подсистемы; тестирование и отладка программного обеспечения; разработка справочной документации. Управление отдельными задачами и контроль за ходом их реализации в процессе коллективной программной разработки осуществляется на основе системы Atlassian JIRA. Хранение кода и управление версиями программного обеспечения осуществляется в удаленном репозитории на платформе Atlassian Bitbucket. Применение современных технологий, средств и методик разработки программных продуктов позволяет создавать функциональные, надежные, удобные в применении, сопровождаемые, интегрируемые системы с минимальными рисками и в приемлемые сроки.

**Ключевые слова:** автоматизированная информационная система, информационно-моделирующая система, программное обеспечение, этапы разработки, гибкая методология разработки, CASE средства, система управления версиями, доменное производство.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-679-685

Создание и успешное внедрение в практику работы металлургических предприятий современных автоматизированных информационных систем во многом зависит от используемых технологий разработки и выбора инструментальных средств их программной реализации. В большинстве случаев процесс эксплуатации на металлургических предприятиях программного обеспечения автоматизированных информационных систем, в частности, информацион-

но-моделирующих систем, связан с необходимостью их непрерывного развития и совершенствования заложенных в них функций (добавление новых расчетных показателей, возможность их сопоставления в различные периоды, уточнение математических моделей и настройка их параметров на условия работы топливно-сырьевой базы комбината и пр.). Поэтому разработку системы необходимо производить на основе принципов модульного программирования

с учетом современных технологий и средств программной реализации [1 – 16].

В основу технологического подхода к разработке программного обеспечения автоматизированных информационных систем в металлургии положена, как правило, итерационная (спиральная) модель [3 – 6], ориентированная на большие и функционально сложные проекты с возможностью появления новых и корректировки существующих требований пользователей. Авторами используется Agile-метод [5, 6], гибкая методология разработки программного обеспечения, ориентированная на использование итеративной разработки, динамическое формирование требований и обеспечение их реализации в результате постоянного взаимодействия внутри рабочих групп, состоящих из специалистов различного профиля (пользователей, аналитиков, программистов, тестировщиков) (рис. 1).

Итерация представляет собой относительно короткий промежуток времени разработки (как правило, месяц), после окончания которого пользователям предоставляется очередная протестированная версия программного продукта с новыми функциональными свойствами. Перечень реализованных функциональных свойств является для пользователей приоритетным и формируется из общего списка требований перед началом каждой итерации. Для управления отдельными задачами (подзадачами) в ходе коллективной программной разработки использована система Atlassian JIRA. После каждой итерации программный продукт совершенствуется, в него добавляются новые функции, и новая версия демонстрируется пользователям. Главная задача – как можно быстрее показать пользователям системы работоспособный продукт, тем самым активизируя процесс уточнения и дополнения требований.

В течение каждой итерации выполняется следующая последовательность технологических процессов разработки:

- проверка корректности алгоритма расчета (при необходимости ввода новых расчетных показателей);
- функциональное моделирование системы [7 – 9];
- совершенствование структуры подсистемы;
- концептуальное моделирование базы данных, генерация даталогической модели базы данных [9 – 11];
- загрузка тестовых данных в базу данных;
- создание функциональных диаграмм математической библиотеки;
- реализация клиентского программного обеспечения подсистемы [12 – 14];
- формирование графических и табличных интерактивных web-отчетов [15, 16];
- тестирование и отладка программного обеспечения;
- разработка справочной документации.

*Проверка корректности алгоритма расчета.* Средство реализации – Microsoft Excel. С использованием Excel проверяется методика расчета на основе фактических исходных данных, корректируется численный алгоритм, строятся диаграммы и графики, готовятся количественные данные для тестовых вариантов расчета.

*Функциональное моделирование системы.* Средство реализации – AllFusion Process Modeler (BPwin) [7 – 9]. С помощью этого пакета разрабатывается функциональная модель информационно-моделирующей системы для графического представления в ней процессов расчета, обмена информацией, подготовки отчетов и пр. Функциональная модель помогает четко документировать действия, которые необходимо предпринять в системе, способы их осуществления и контроля, требующиеся для этого ресурсы, а также визуализировать получаемые от этих действий результаты. В основу All Fusion Process Modeler заложены общепризнанные методологии моделирования, например, методология IDEF0 рекомендована к использованию Госстандартом РФ и является федеральным стандартом США. Простота и наглядность моделей Process Modeler упрощает взаимопонимание между разработчиками и заказчиками программной системы.

*Архитектура и структура подсистемы.* Средство реализации – Microsoft Visio. Это мощный графический редактор, удобное средство построения диаграмм и блок-схем. Благодаря современным встроенным фигурам, интеллектуальным шаблонам и образцам документов в Visio имеется широкий спектр возможностей создания архитектурных и структурных схем компьютерных подсистем.

*Концептуальное моделирование базы данных, генерация даталогической модели базы данных.* Средство реализации – AllFusion ERwin Data Modeler (ERwin) [9]. Это CASE-средство для проектирования и документирования баз данных, которое позволяет создавать, документировать и сопровождать базы данных.

Модели данных помогают визуализировать структуру данных, обеспечивая эффективный процесс ее орга-

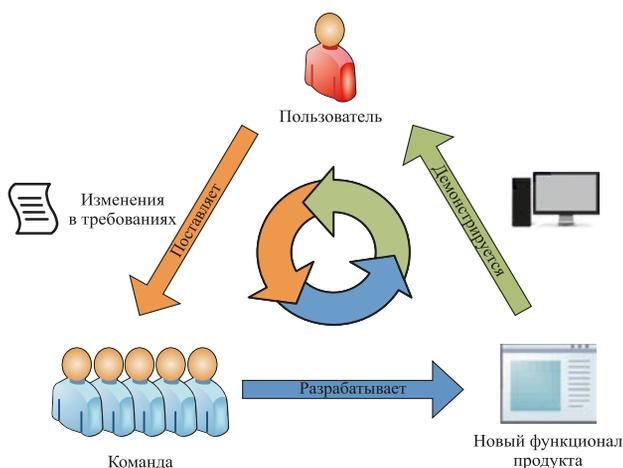


Рис. 1. Гибкая технология разработки программного обеспечения системы

Fig. 1. Flexible technology of software development system

низации, управления и администрирования. AllFusion ERwin Data Modeler (ERwin) позволяет:

- получить точную и наглядную информацию, где хранятся данные и как получить к ним доступ;
- используя визуальные средства, описать структуру базы данных, а затем автоматически сгенерировать файлы данных для любого типа системы управления базами данных;
- тщательно задокументировать структуру базы данных.

Удобная в использовании графическая среда AllFusion ERwin Data Modeler упрощает разработку базы данных и автоматизирует множество трудоемких задач, уменьшая сроки создания высококачественных и высокопроизводительных баз данных. С помощью этого средства обеспечивается совместная работа администраторов и разработчиков баз данных, многократное использование модели, понимание данных и их обслуживание.

*Загрузка тестовых данных в базу данных.* Средство реализации – служба интеграции данных SQL Server Integration Services (SSIS), входящая в состав Microsoft SQL Server. Пакет службы SSIS описывает процесс получения, преобразования и загрузки/извлечения данных в базу данных. В качестве источников и получателей данных могут выступать книги Microsoft Excel, текстовые и XML-файлы, а также различные базы данных. При разработке это средство используется для автоматизации первоначальной загрузки данных в базу данных. Среда SQL Server Data Tools (SSDT) представляет собой графический инструмент разработки пакетов служб SQL Server.

*Функциональные диаграммы математической библиотеки.* На основе анализа требований технологического персонала, нормативно-справочной информации доменного производства, функционального моделирования создается математическое и алгоритмическое

обеспечение, которое будет положено в основу программной реализации новой функции подсистемы. Структурный системный анализ и проектирование блоков математических моделей выполнены на основе процедурно-ориентированного подхода. Основой данного подхода является использование диаграмм потоков данных (DFD, Data Flow Diagrams) – информационной модели, основными компонентами которой являются потоки данных, переносящие информацию от одного модуля к другому [3]. Нотация метода DFD предполагает разбиение математической модели на отдельные функциональные компоненты (процессы) и представление их в виде сети, связанной потоками данных.

Средство реализации диаграмм – Microsoft Visio, спецификации к ним разработаны в Microsoft Word. Функциональные спецификации нужны программистам для наглядного отображения методики расчета, а также ее документирования. Каждая расчетная формула (параметр) иллюстрируется на диаграмме пронумерованным прямоугольником с отображением в виде входных стрелок всех данных для вычисления параметра. Выходная стрелка показывает, для вычисления каких параметров далее используется эта величина. Саму формулу можно посмотреть в спецификации.

*Реализация клиентского программного обеспечения подсистемы.* Средство реализации – Microsoft Visual Studio (язык программирования C#) [13, 14]. С помощью нее разрабатываются математические библиотеки в виде dll-файлов и клиентские приложения с оконным интерфейсом в стиле Windows. Согласно подходу Agile-метода [5, 6], реализация функциональных возможностей системы проводилась постепенно, в различных версиях программного обеспечения и в соответствии с приоритетными требованиями пользователей. Контроль и управление версиями осуществлялись на платформе Atlassian Bitbucket (рис. 2). Atlassian Bitbucket –

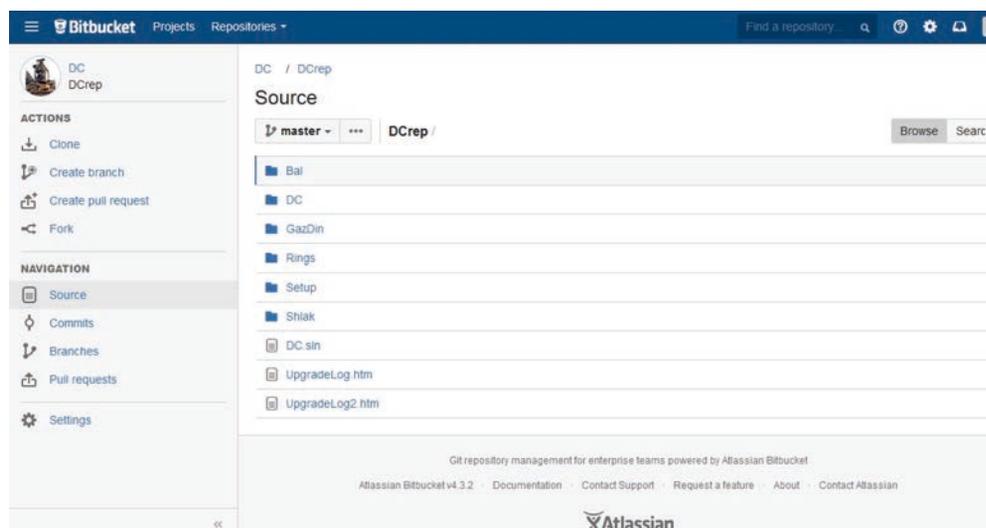


Рис. 2. Система управления версиями программного продукта Atlassian Bitbucket

Fig. 2. Version control system for the Atlassian Bitbucket Software

это система, регистрирующая изменения в одном или нескольких файлах с тем, чтобы в дальнейшем была возможность вернуться к определенным старым версиям этих файлов, возвратиться к прежнему состоянию весь проект, просматривать происходящие со временем изменения, определять, кто последним вносил изменения во внезапно переставший работать модуль, кто и когда внес в код какую-то ошибку и многое другое.

*Тестирование и отладка программного обеспечения.* Средство реализации – Microsoft Visual Studio. Модуль тестирования используется для проверки

корректности работы математических dll-библиотек, реализующих алгоритмы расчета всех подсистем. Процедура тестирования проводится по фактическим исходным данным, взятым из производственной базы данных. Правильные, «эталонные» значения расчетных показателей взяты из файла с методикой расчета в Microsoft Excel. Схематично процесс автоматизированного тестирования представлен на рис. 3.

*Формирование графических и табличных интерактивных web-отчетов.* Средство реализации – служба SQL Server Reporting Services, которая входит в состав

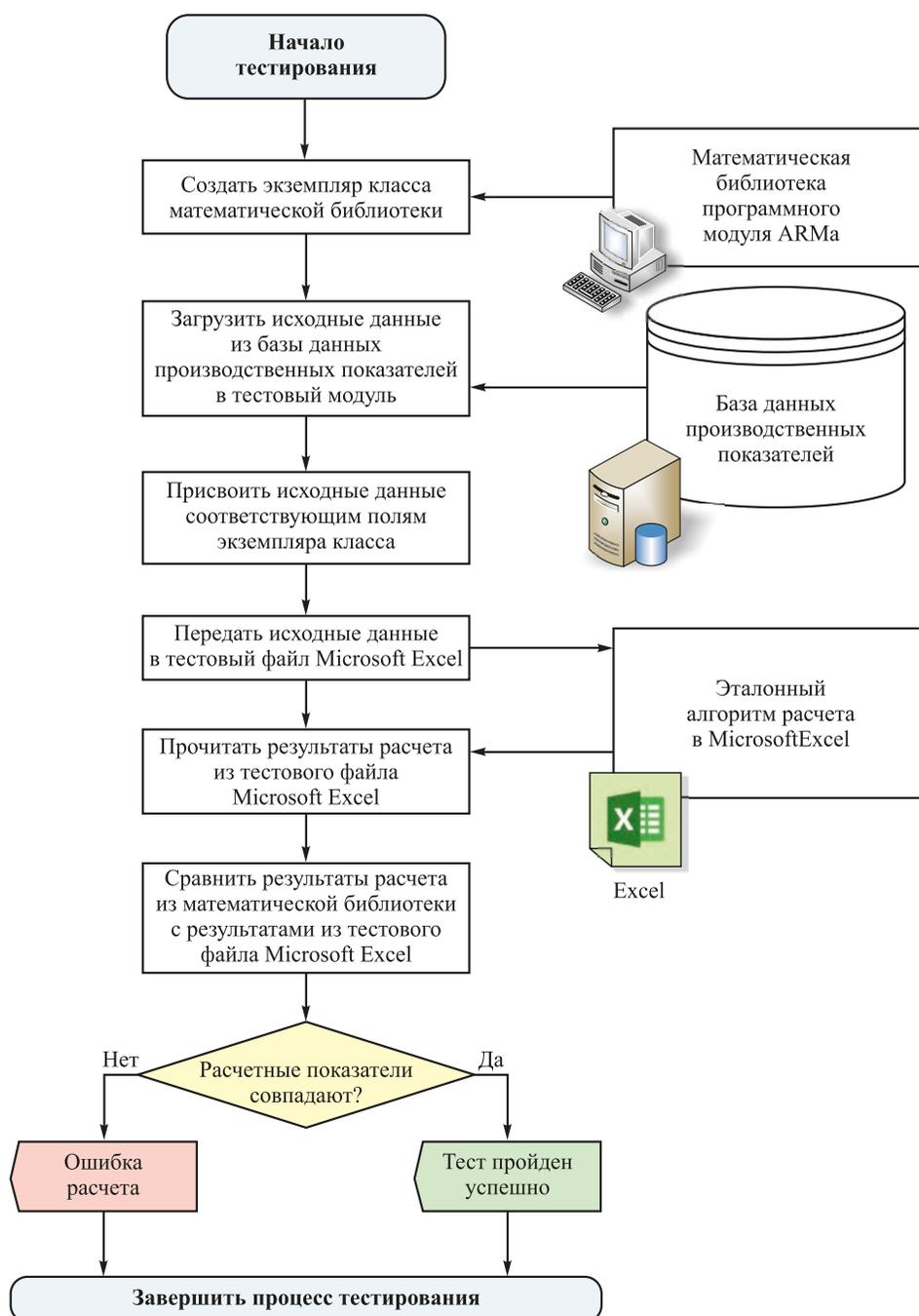


Рис. 3. Последовательность автоматизированного тестирования расчетных модулей системы

Fig. 3. Sequence of automated testing of system calculation modules

Microsoft SQL Server [15, 16]. Это программная серверная система использована для подготовки множества интерактивных и печатных web-отчетов, развертывания их в корпоративной сети предприятия.

Разработчик создает схему отчета в виде шаблона и развертывает ее на сервере отчетности. Пользователь через web-страницу может выбирать нужные поля/данные и создавать отчеты в соответствии со своими нуждами. Потом пользователи могут загружать отчеты локально, сохранять и экспортировать в популярные форматы офисных документов.

*Разработка справочной документации.* Средство реализации – Help&Manual. Главным преимуществом программы является ее универсальность: можно разработать файл справочной информации в любом из наиболее распространенных на сегодняшний день форматов. Интуитивно понятный интерфейс делает программу простой в освоении. Основной блок программы составляет текстовый редактор, мало отличимый от Microsoft Word как по интерфейсу, так и по количеству возможностей.

Использование гибкой методологии разработки и вышеописанных инструментальных программных средств позволило создать и внедрить в доменном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

автоматизированную информационную систему анализа и прогнозирования производственных ситуаций (АРМ технолога доменного цеха), которая помогает инженерно-технологическому персоналу решать комплекс технологических задач, направленных, в конечном итоге, на повышение эффективности доменной плавки [17 – 21].

Система позволяет решать комплекс взаимосвязанных технологических задач, в частности производить:

- расчет материальных и тепловых балансов доменной плавки;
- моделирование теплового, шлакового и газодинамического режимов работы доменных печей;
- оптимальный выбор состава доменной шихты;
- расчет зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов;
- прогнозирование технологических ситуаций.

В основу реализации модельных подсистем положены алгоритмы расчета с использованием математических моделей доменного процесса для выбранного пользователем периода работы отдельных печей или цеха в целом, подробно описанные ранее [17 – 21]. Каждая из этих подсистем взаимодействует с другими блоками параметров, подсистемами и внешней средой (рис. 4). Представленная структура обеспечивает за-

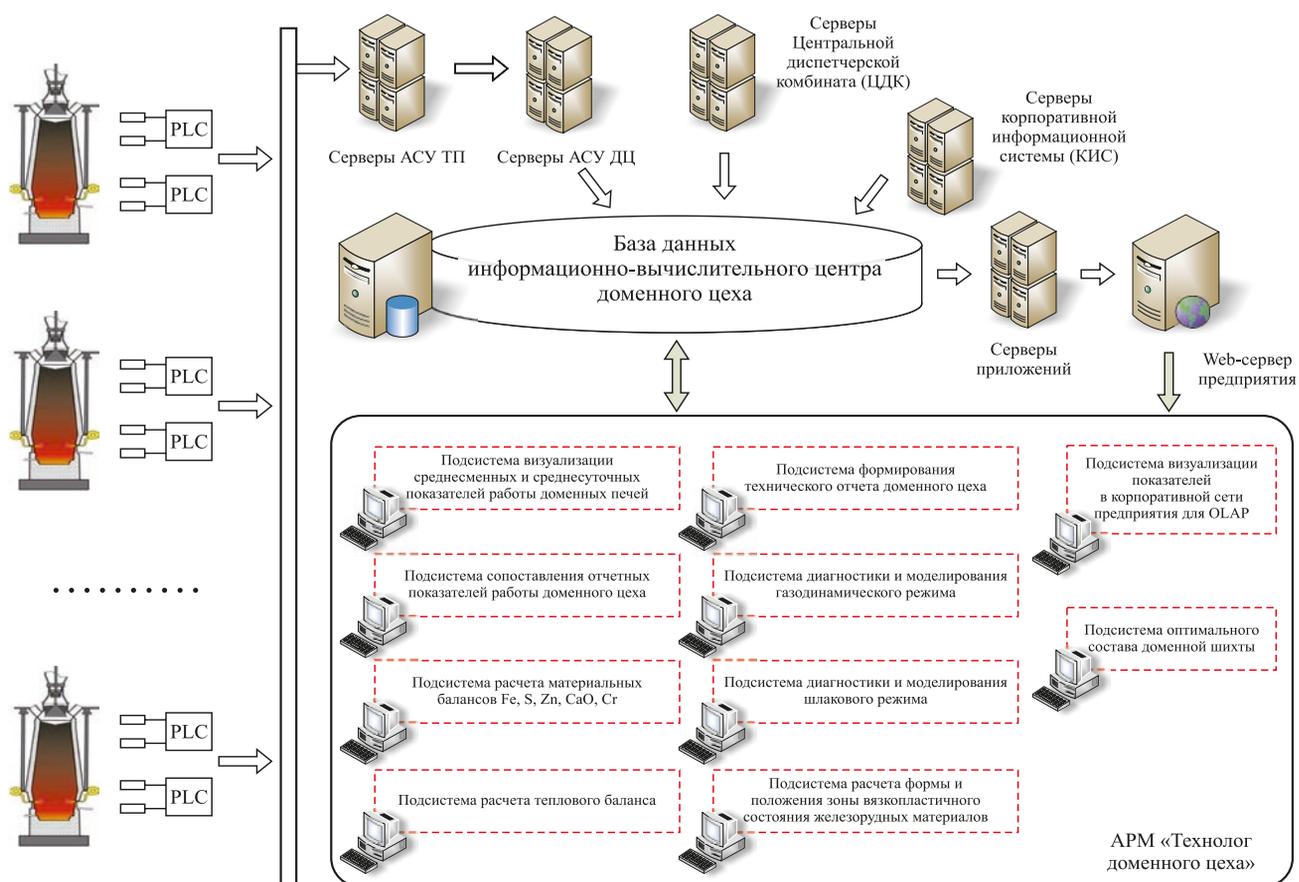


Рис. 4. Структура программного комплекса «АРМ технолога доменного цеха»

Fig. 4. Structure of the software complex “ARM Technologist Blast Furnace Shop”

данную функциональность, выполнение требований предметной области, относительно простое расширение и изменение системы, возможность автономной реализации отдельных программных модулей и их независимость от структуры хранения данных.

**Выводы.** Таким образом, гибкая методология разработки с использованием современных компьютерных инструментальных средств позволяет создавать функциональные, надежные, сопровождаемые, интегрируемые модельные системы для решения технологических задач в металлургии. Итерационный способ разработки в проектных командах, состоящих из специалистов различного профиля (пользователей, аналитиков, программистов, тестировщиков), позволяет в относительно короткие сроки создавать новые версии программного продукта с дополнительными функциональными свойствами. Перечень дополнительных функциональных свойств каждой новой версии является для пользователей приоритетным и формируется из общего списка требований перед началом каждой итерации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vyatkin V. Software engineering in industrial automation: state-of-the-art review // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013. Vol. 9. No. 3. P. 1234 – 1249.
2. Dimitrov B.H., Nenov H.B., Marinov A.S. Comparative analysis between methodologies and their software realizations applied to modeling and simulation of industrial thermal processes // 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2013; Opatija; Croatia; 20 – 24, May 2013. Article No. 6596383. P. 891 – 895.
3. Одинцов И.О. Профессиональное программирование. Системный подход. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 624 с.
4. Макконнелл С. Совершенный код. Мастер-класс: Пер. с англ. – СПб.: Питер, 2007. – 896 с.
5. Кон М. Scrum: гибкая разработка ПО: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 576 с.
6. Мейер Б. Agile! Прекрасный, ужасный, шумный: Пер. с англ. / Под ред. В. Биллига. – Москва, Тверь: НАУ «ИНТУИТ» – ЗАО НИИ ЦПС, 2015. – 248 с.
7. Маклаков С.В. Моделирование бизнес-процессов с AllFusion Process Modeler (BPwin 4.1). – М.: Диалог–МИФИ, 2004. – 220 с.
8. Дубейковский В.И. Эффективное моделирование с CA Erwin Process Modeler (BPwin; AllFusion Process Modeler). – М.: Диалог–МИФИ, 2009. – 384 с.
9. Маклаков С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite. – М.: Диалог–МИФИ, 2003. – 432 с.
10. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных: Пер. с англ. – 8-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1328 с.
11. Маклаков С.В., Туманов В.Е. Проектирование реляционных хранилищ данных. – М.: Диалог–МИФИ, 2007. – 336 с.
12. Гамильтон Б. ADO.NET. Сборник рецептов. – СПб.: Питер, 2005. – 576 с.
13. Трелсен Э. Язык программирования C# 5.0 и платформа .NET 4.5. – 6-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2015. – 1312 с.
14. Фленов М.Е. Библия C#. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 560 с.
15. Ларсон Б. Разработка бизнес-аналитики в Microsoft SQL Server 2005. – СПб.: Питер, 2008. – 684 с.
16. Ларсон Б. Microsoft SQL Server 2005 Reporting Services. Традиционные и интерактивные отчеты. Создание, редактирование и управление. – М.: ИТ Пресс, 2008. – 608 с.
17. Спиринов Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю. и др. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
18. Онорин О.П., Спиринов Н.А., Терентьев В.Л. и др. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
19. Спиринов Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю. и др. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП: Учебное пособие / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 558 с.
20. Спиринов Н.А., Ипатов Ю.В., Лобанов В.И. и др. Информационные системы в металлургии: Учебник для вузов / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.
21. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Y. etc. Use of contemporary information technology for analyzing the blast furnace process // Metallurgist. Issue 5 – 6. 2016. P. 1 – 7.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 8, PP. 679–685.

## MODERN METHODOLOGY AND COMPUTER TECHNOLOGIES FOR CREATING SOFTWARE OF MODEL SYSTEMS SUPPORTING DECISION-MAKING IN METALLURGY (on the example of blast-furnace production)

V.V. Lavrov<sup>1</sup>, N.A. Spirin<sup>1</sup>, I.A. Gurin<sup>1</sup>, V.Yu. Rybolovlev<sup>2</sup>,  
A.V. Krasnobaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>JSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** Experience shows that the creation and successful introduction of modern automated information systems into the practice of metallurgical enterprises largely depends on the technologies used to develop and to select the tools for their software implementation. The article briefly reflects the main technologies and software used to create software for information modeling systems to solve technological problems in metallurgy. The basis is the use of a flexible development methodology – the Agile method, which focuses on the use of iterative develop-

ment, the dynamic formation of user requirements, and the provision of their implementation as a result of constant interaction within working groups consisting of specialists of various profiles (users, analysts, programmers, testers). Iteration is a relatively short development time (usually a month), after which the users are provided with the next tested version of the software product with new functional properties. The list of realized functional properties is priority for users and is formed from the general list of requirements before the beginning of each iteration. During each iteration, the following processes are sequentially performed: checking the correctness of the calculation algorithm (if necessary, entering new calculated indicators); functional modeling of the system; improvement of the structure of the subsystem; conceptual modeling of the database, generation of the database model; loading test data into the database; creation of functional diagrams of mathematical library; implementation of client software subsystems;

testing and debugging of software; development of reference documentation. Managing individual tasks and monitoring the progress of their implementation in the course of collective software development are carried out on the basis of the Atlassian JIRA system. Code storage and versioning of software are performed in a remote repository on the Atlassian Bitbucket platform. The use of modern technologies, tools and techniques for developing software products makes it possible to create functional, reliable, easy-to-use, followed, integrated systems with minimal risks and at acceptable times.

**Keywords:** automated information system, information-modeling system, software, development stages, flexible development methodology, CASE tools, version control system, blast-furnace production.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-679-685

## REFERENCES

1. Vyatkin V. Software engineering in industrial automation: state-of-the-art review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013, vol. 9, no. 3, pp. 1234–1249.
2. Dimitrov B.H., Nenov H.B., Marinov A.S. Comparative analysis between methodologies and their software realizations applied to modeling and simulation of industrial thermal processes. *36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2013; Opatija; Croatia; 20-24, May 2013*. Article no. 6596383, pp. 891–895.
3. Odintsov I.O. *Professional'noe programmirovaniye. Sistemyi podkhod* [Professional programming. Systems approach]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2004, 624 p. (In Russ.).
4. McConnell S. *Code complete*. Microsoft Press, 2004, 960 p. (Russ. ed.: McConnell S. *Sovershennyi kod. Master-klass*. St. Petersburg: Piter, 2007, 896 p.).
5. Cohn M. *Succeeding with agile: Software Development Using Scrum*. Addison-Wesley Professional, 2009. (Russ.ed.: Cohn M. *Scrum: gibkaya razrabotka PO*. Moscow: ID Vil'yams, 2011, 576 p.).
6. Meyer B. *Agile! The Good, the Hype and the Ugly*. Springer, 2014. (Russ.ed.: Meyer B. *Agile! Prekrasnyi, uzhasnyi, shumnyi*. Moscow, Tver: NAU "INTUIT" – ZAO NII TsPS, 2015, 248 p.).
7. Maklakov S.V. *Modelirovaniye biznes-protsessov s AllFusion Process Modeler (BPwin 4.1)* [Modeling of business processes with AllFusion Process Modeler (BPwin 4.1)]. Moscow: Dialog–MIFI, 2004, 220 p. (In Russ.).
8. Dubeikovskii V.I. *Effektivnoye modelirovaniye s CA ERwin Process Modeler (BPwin; AllFusion Process Modeler)* [Effective modeling with CA ERwin Process Modeler (BPwin; AllFusion Process Modeler)]. Moscow: Dialog–MIFI, 2009, 384 p. (In Russ.).
9. Maklakov S.V. *Sozdaniye informatsionnykh sistem s AllFusion Modeling Suite* [Creation of information systems with AllFusion Modeling Suite]. Moscow: DIALOG-MIFI, 2003, 432 p. (In Russ.).
10. Date C.J. *An introduction to database systems*. 8th Edition. Pearson, 2003. (Russ.ed.: Date C.J. *Vvedeniye v sistemy baz dannykh*. Moscow: ID Vil'yams, 2006, 1328 p.).
11. Maklakov S.V., Tumanov V.E. *Proektirovaniye relyatsionnykh khranilishch dannykh* [Designing Relational Data Warehousing]. Moscow: Dialog–MIFI, 2007, 336 p. (In Russ.).
12. Hamilton B. *Ado. Net. Cookbook*. Beijing: O'Reilly Media, 2003. (Russ.ed.: Hamilton B. *ADO.NET. Sbornik retseptov*. St. Petersburg: Piter, 2005, 576 p.).
13. Troelsen A. *Pro C# 5.0 and the .NET 4.5 framework*. Apress, 2012. (Russ.ed.: Troelsen A. *Yazyk programmirovaniya C# 5.0 i platforma .NET 4.5*. Moscow: OOO ID Vil'yams, 2015, 1312 p.).
14. Flenov M.E. *Bibliya C#* [Bible C#]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 560 p. (In Russ.).
15. Larson B. *Delivering business intelligence with Microsoft® SQL Server™ 2005*. Mcgraw-Hill, 2008. (Russ.ed.: Larson B. *Razrabotka biznes-analitiki v Microsoft SQL Server 2005*. St. Petersburg: Piter, 2008, 684 p.).
16. Larson B. *Microsoft SQL Server™ 2005 Reporting Services. Essential Skills for Database Professionals*. Arden Hills, MN. (Russ.ed.: Larson B. *Microsoft SQL Server 2005 Reporting Services. Traditsionnyye i interaktivnyye otchety. Sozdaniye, redaktirovaniye i upravleniye*. Moscow: NT Press, 2008, 608 p.).
17. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Model'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenii v ASU TP domennoi plavki metallurgii* [Model decision support systems in the automated process control system of blast furnace smelting in metallurgy]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).
18. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L. etc. *Komp'yuternyye metody modelirovaniya domennogo protsesssa* [Computer methods for modeling the domain process]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
19. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Matematicheskoye modelirovaniye metallurgicheskikh protsessov v ASU TP: uchebnoye posobie* [Mathematical modeling of metallurgical processes in the automated process control system: Manual]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UrFU, 2014, 558 p. (In Russ.).
20. Spirin N.A., Ipatov Yu.V., Lobanov V.I. etc. *Informatsionnyye sistemy v metallurgii: uchebnyk dlya vuzov* [Information systems in metallurgy]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2001, 617 p. (In Russ.).
21. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Y., Krasnobaev A.V., Pavlov A.V. Use of contemporary information technology for analyzing the blast furnace process. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 5-6. pp. 471–477.

## Information about the authors:

**V.V. Lavrov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (v.v.lavrov@urfu.ru)

**N.A. Spirin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (n.a.spirin@urfu.ru)

**I.A. Gurin**, Postgraduate of the Chair "Thermophysics and Informatics in metallurgy" (ivan.gurin@urfu.ru)

**V.Yu. Rybolovlev**, Cand. Sci. (Eng.), Chief of Design office (rybolovlev.vy@mmk.ru)

**A.V. Krasnobaev**, Cand. Sci. (Eng.), Manager of Design office (krasnobaev.av@mmk.ru)

Received April 12, 2017

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Полулях Л.А., *ответственный секретарь*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

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

Долицкая О.А., *научный редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

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

---

Подписано в печать 24.08.2017. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бум. офсетная № 1.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,25. Заказ 5839. Цена свободная.

---

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

# IZVESTIYA

## FERROUS METALLURGY

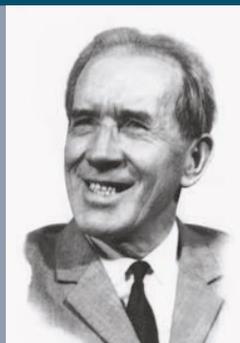


**Глишков  
Марк Алексеевич**

заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1967 г.), профессор (1939 г.), доктор технических наук (1941 г.), зав. кафедрой (1930–1946 гг.)

декан металлургического факультета (1941–1943 гг.), зам. директора Уральского индустриального института по учебной и научной работе (1943–1946 гг.)

**Работал на кафедре с 1927 г. по 1946 г.**



**Китаев  
Борис Иванович**

профессор (1946 г.), доктор технических наук (1944 г.), зав. кафедрой (1946 – 1957 гг.; 1959 – 1979 гг.).

**Работал на кафедре с 1936 г. по 1983 г.**



**Тройб  
Самуил Григорьевич**

профессор (1958 г.), доктор технических наук (1956 г.), зав. кафедрой (1957 – 1959 гг.).

**Работал на кафедре с 1938 г. по 1966 г.**



**Ярошенко  
Юрий Гаврилович**

заслуженный деятель науки и техники РФ (1992 г.), профессор (1970 г.), доктор технических наук (1968 г.), зав. кафедрой (1979–1988 гг.)

Почетный профессор» Уральского государственного технического университета – УПИ (1999 г.)

**Работает на кафедре с 1952 г.**

