УДК 621.783

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ПЕЧЕЙ-МИКСЕРОВ ДЛЯ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

*Дружинин Г.М.^{1,2}, д.т.н., зам. директора по науке, профессор кафедры «Теплофизика
и информатика в металлургии» (avto1943@gmail.com)*

*Ашихмин А.А.², к.т.н., зам. заведующего лабораторией теплотехники и систем
отопления нагревательных печей (gorelka.a@yandex.ru)*

*Лошкарев Н.Б.¹, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (gorelka.l@yandex.ru)*

Маслов П.В.², старший научный сотрудник (pavvmaslov@yandex.ru)

*Хамматов И.М.², к.т.н., ведущий инженер лаборатории теплотехники и систем
отопления нагревательных печей (hammatof@yandex.ru)*

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

² 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 изнутри 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 останова, 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 воздушного снабжения 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 железнодорожных шлаковозов.

Печь-миксер (рис. 1) представляет собой футерованную изнутри 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 днища печи-миксера. На монтажной плите также имеются закрытый кварцевым стеклом патрубок – гляделка 8 для визуального контроля пламени горелки и патрубок, 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 газозоо-душной 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 $80 - 360 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- 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 воздухообеспечения 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 $\text{м}^3/\text{ч}$;

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 ВН3Н-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

Рис. 5. Функциональная схема управления горелочным устройством печи-миксера

Fig. 5. Functional control diagram of the holding furnace burner device

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 KTP400 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 инжекционными 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 работо-

способности 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., Деньгуб 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., Мартемыанов 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^{1,2}, A.A. Ashikhmin², N.B. Loshkarev¹,
P.V. Maslov², I.M. Khammatov²**

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

² 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-UII, 2005, 700 p. (In Russ.).
6. Gusovskii V.L., Livshits A.E., Tymchak V.M. *Sozhigatel'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. *Intellectual'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. Lisienko 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 vzyryvobezopasnost'* [Fuel, its combustion and explosion safety]. Vintovkin A.A. ed. Ekaterinburg: Mezhtseleobrazovatel'skiy tsentr, 2015, 303 p. (In Russ.).
15. *Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo Soyuz 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 teplovyye agregaty. Provedeniye i kontrol' vy-polneniya puskonastroykiykh rabot. STO NOSTROY 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 programmirovannykh logicheskikh kontrollerov: Uchebnoye 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: Uchebnoye 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 komplekso i kontrolyery* [Technical means of automation. Software and hardware systems and controllers]. Moscow: izd-vo "Mashinostroyeniye", 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 (pavmaslov@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