

# РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 669.162.263

*Г.М. Дружинин<sup>1</sup>, Л.А. Зайнуллин<sup>1</sup>, М.Д. Казяев<sup>2</sup>,  
Н.А. Спири<sup>2</sup>, Ю.Г. Ярошенко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники  
<sup>2</sup> Уральский федеральный университет

## РЕСУРСОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ (В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ)

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы энергоэффективности и ресурсосбережения в черной металлургии. Основное внимание уделено резервам энергосбережения в доменном производстве и в нагревательных и термических печах металлургических предприятий.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, ресурсосбережение, черная металлургия.

*G.M. Druginin<sup>1</sup>, L.A. Zajnullin<sup>1</sup>, M.D. Kazyaev<sup>2</sup>,  
N.A. Spirin<sup>2</sup>, Yu.G. Yaroshenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Research and development Institute of metallurgical Thermo Technology  
<sup>2</sup> Ural Federal University

## RESOURCE AND ENERGY PROBLEMS OF FERROUS METALLURGY (IN ORDER OF DISCUSSION)

**Abstract.** The study describes the problems of energetic efficiency and resource conservation in ferrous metallurgy. Focus is made on energy conservation reserves in blast furnaces and heating and thermal furnaces of metallurgical enterprises.

**Keywords:** energy efficiency, resource conservation, ferrous metallurgy.

*E-MAIL:* n.a.spirin@ustu.ru

В последнее время проблемы энерго- и экологоэффективности приобретают не только национальный, но и глобальный характер. В этом плане большой интерес представляют формулировки принципов системы «Глобальной энергетической безопасности». Одним из ключевых принципов этой глобальной системы является следующий: «Сбережение энергоресурсов равносильно их производству и зачастую именно оно представляет собой более рентабельный и экологически ответственный способ обеспечения растущего спроса на энергию». Опыт освоения рыночных отношений в последние десятилетия показал, что Россия не полностью готова по своим показателям энергоэффективности достойно конкурировать в мировом экономическом пространстве. Нерациональное использование энергоресурсов оценивается экспертами в 500 млн т у.т. или примерно 60 % всего объема потребления первичных энергетических ресурсов.

Одной из серьезных проблем развития экономики России остается высокая энергоемкость валового внутреннего продукта (ВВП) по сравнению с другими индустриальными странами мира. Так, если принять энергоэффективность ВВП в Японии и Германии за 1,

то эта величина для других стран примет значения: Швеция – 1,31, США – 1,375, Финляндия – 1,625, Канада – 1,75, Россия – 3,06. В России в среднем коэффициент полезного действия тепловых агрегатов составляет 25 %, в США – 37 %, в Японии – 42 %.

Доля энергетических затрат в себестоимости продукции большинства производств является высокой, несмотря на значительно меньшую стоимость природного газа на отечественном рынке по сравнению с мировыми ценами. Проблема энергосбережения самым тесным образом связана с проблемой снижения вредных выбросов. Именно энергетика и энерготехнологии являются основными источниками вредных выбросов. Поэтому меры, принимаемые в плане энергосбережения, направленные на снижение расходов топлива, одновременно могут рассматриваться и как ресурсосберегающие, снижающие техногенное давление на окружающую среду.

Если же анализировать в этом аспекте состояние коммунального и сельского хозяйства, то ситуация еще более плачевная. Объясняется такое положение рядом обстоятельств, в том числе исторически сложившимися низкими ценами на энергоносители, отсутствием

систем учета и контроля за расходом энергии на каждом конкретном объекте и агрегате, слабой (особенно в последние 10 лет) технологической и трудовой дисциплиной. И если бы перечень причин высокой энергоемкости продукции нашей промышленности ограничивался вышеуказанными, то данную проблему можно было бы решить достаточно быстро путем политики цен, ужесточением работы надзорных органов и организационных мероприятий непосредственно на рабочих местах, что частично реализуется в последние годы исполнительной властью, однако без заметного в масштабах страны результата. Это вполне объяснимо, так как основными энергопотребляющими отраслями являются не коммунальное хозяйство, а энергетика, металлургия и химическая промышленность. Повышение цен на топливо, введение систем учета и контроля за расходом энергоресурсов, внедрение организационных мероприятий, направленных на соблюдение технологической дисциплины – необходимые в данный момент действия, которые, видимо, дадут определенный результат, но заметного снижения энергоемкости продукции не произойдет.

Основной причиной высокой энергоемкости (по сравнению с зарубежными странами) промышленной продукции являются энергоемкие и, по современным стандартам, устаревшие технологии и, соответственно, технологические и тепловые агрегаты, в том числе и для получения электроэнергии и тепла. Сам вывод является не новым, но при этом, по различным причинам, все кампании по энергосбережению направлены почему-то на решение только вышеуказанных организационно-правовых вопросов. Видимо, в этой связи и термин «энергосбережение» стал обозначать с некоторых пор самостоятельное научно-техническое направление вне всякой связи с технологией, процессом, агрегатом. А такого в природе не бывает, если не иметь в виду утечки энергоносителей и потери тепла через краны, плохо теплоизолированные трубы, открытые форточки и другие проявления бесхозяйственности.

Энергосбережение в промышленном производстве всегда связано с технологией процесса и заниматься энергосбережением – значит заниматься снижением затрат энергии любого вида на осуществление конкретного технологического процесса в конкретном технологическом или тепловом агрегате.

Это совсем не значит, что стоит сбрасывать со счета организационно-хозяйственные мероприятия. Во-первых, потому, что они, как правило, малозатратны, а во-вторых, «лежат на поверхности». Опыт проведения таких работ показывает, что для разработки плана мероприятий необходимо проведение обследований тепловых агрегатов, т.е. энергоаудита с последующим анализом и составлением рекомендаций. Наибольший эффект достигается при наличии современной системы измерений (контроля) параметров энергоносителей, а также разработке обоснованных норм их расхода для

конкретных условий работы агрегатов. Реализация предложенных при этом мероприятий позволяет сократить удельные расходы топлива на 5 – 12 %.

Значительное же сокращение энергоемкости металлопродукции может быть достигнуто только за счет внедрения передовых малоэнергоемких металлургических технологий. В силу различных субъективных и объективных причин металлургическая промышленность развитых стран еще в 50 – 60 годы прошлого столетия пошла по пути интенсивного снижения энергоемкости продукции за счет применения современных малоэнергоемких технологий, в том числе созданных в нашей стране (непрерывная разливка стали, испарительное охлаждение и т.д.).

Сегодня металлургический комплекс России потребляет 30 % производимой электроэнергии, 25 % добываемого природного газа, 10 % нефти и нефтепродуктов. Удельный расход топлива на 1 т проката в России выше на 25,0 % , чем в Японии и на 37,5 %, чем в странах ЕС. Это связано как с использованием морально устаревших технологий и физически изношенной, выработавшей свой ресурс техники, так и с низким уровнем внедрения научных достижений в области энергосбережения и использования внутренних вторичных ресурсов.

Главная цель развития металлургической промышленности России – преобразование ее в динамично развивающуюся, высокотехнологичную и конкурентоспособную отрасль, интегрированную в мировую металлургию в рамках международного разделения труда [1]. Для достижения указанной цели главными задачами являются:

- техническое перевооружение действующего производства;
- внедрение современных энерго- и ресурсосберегающих экологически безопасных технологий.

Развитие отечественной металлургии в XXI в. происходит в новых условиях [2].

- Практически сформировались рынки сырья и топлива. Импорт сырья для производства металлов и экспорт продукции стали повсеместным явлением отечественной металлургии.

- В мире наблюдается сокращение, а для некоторых регионов исчезновение месторождений чистых по примесям руд.

- Изменения экологических систем в стране, которые неизбежно приведут к смене приоритетов в технологической деятельности. Производительность, как главный приоритет в плановой экономике, уступит свое место ресурсо- и энергосбережению. Возрастут требования к экологической чистоте металлургического производства.

- В ближайшие годы следует ожидать сокращения использования в металлургии природного газа.

- В XXI в. вряд ли можно прогнозировать рост масштабов производства черных металлов альтернативны-

ми способами. На протяжении последних 20 лет доля черных металлов, производимых внедоменным путем в мире, не превышала 5 – 6 %.

Факторами, лимитирующими развитие черной металлургии в большинстве стран, в том числе и России, в настоящее время являются дефицит природных и энергетических ресурсов и загрязнение окружающей среды [3, 4].

Сложные, энергоемкие, высокотемпературные, зачастую быстропротекающие процессы, повышенные требования к экологической безопасности технологий и агрегатов требуют проведения детального предпроектного математического моделирования этих процессов и создания математических моделей реального времени для автоматизированных систем управления. Разработка новых технологий, математическое моделирование процессов возможны лишь на основе дальнейшего развития теории тепломассообменных процессов с учетом специфики пирометаллургических технологий.

Остановимся более подробно на двух основных потребителях топлива и энергии в черной металлургии: доменном производстве и печном хозяйстве прокатных и термических цехов, потребляющих до 80 % топлива в черной металлургии России.

### Резервы отечественного доменного производства

Среди переделов современной черной металлургии доменное производство остается самым энергоемким, на его долю приходится 50 % используемого в черной металлургии топлива. Одна из главных задач совершенствования доменного производства – сокращение расхода кокса как основного энергоносителя [5 – 9].

Основными направлениями развития мирового доменного производства в XXI в. являются минимизация расхода природных ресурсов и негативного влияния на окружающую среду за счет [5 – 9] следующих факторов.

- *Технического оснащения доменных печей.* Новыми высокоэффективными российскими техническими разработками, превышающими мировой уровень, являются воздухонагреватели Калугина и загрузочное устройство с роторным распределителем шихты. Отечественные доменные печи оснащены в основном устаревшими двухконусными загрузочными устройствами. Замена их на безконусные лотковые и роторные загрузочные устройства обеспечивает рост производства и экономию кокса 5 – 6 %.

- *Снижения энергозатрат на выплавку чугуна.* Температура дутья находится на уровне 1100 – 1150 °С. При применении воздухонагревателей конструкции Калугина температура дутья может быть увеличена до 1400 °С, что позволит сократить расход кокса и повысить производительность печей на 5 – 8 %. Отечественный воздухонагреватель Калугина, по сравнению с лучшими зарубежными воздухонагревателями, имеет меньшую материалоемкость, в десятки раз меньшее

содержание СО в отходящих газах. В настоящее время в мире эксплуатируется 109 таких воздухонагревателей и 45 проектируется и строится. Как правило, не используются [за исключением ОАО «Северсталь» и ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» (НТМК)] энергия сжатого доменного газа для выработки электроэнергии, теплота дымовых газов воздухонагревателей, система испарительного охлаждения с выработкой пара технологических параметров, современная сухая очистка от пыли доменного газа и аспирационных отсосов.

- *Разработки инновационных технологий, расширяющих использование низкосортных руд, некоксуемых и слабококсуемых углей и отходов.* Основным энергоносителем, замещающим 15 – 20 % кокса в России, является природный газ, цена которого непрерывно увеличивается и может достичь критического значения 0,7 – 0,8 от цены кокса за 1000 м<sup>3</sup>. В этих условиях использовать природный газ становится экономически невыгодным. Снижение стоимости чугуна может быть достигнуто за счет использования более дешевых энергоносителей и, в частности, за счет подачи в доменные печи пылеугольного топлива. Большинство доменных печей за рубежом работает с вдуванием пылеугольного топлива (в среднем 150 кг/т чугуна, а на лучших заводах до 240 кг/т чугуна), в первую очередь это – Япония и Западная Европа. Как свидетельствует мировой опыт, при использовании пылеугольного топлива уже в настоящее время достигается экономия топлива 20 – 30 %, а в перспективе эта экономия может достичь 40 – 50 %. Не осуществляется в полной мере рециклинг железосодержащих отходов и др. Объективными факторами более высоких энергетических затрат в черной металлургии России являются низкое содержание железа в руде, повышенные затраты на ее обогащение и получение товарного концентрата. Так, среднее содержание железа в добываемой руде в России составляет 36 %, Бразилии – 58, Индии – 61, ЮАР – 62, Австралии – 64. В связи с этим особое внимание следует уделять утилизации отходов на предприятиях черной металлургии: окалины, сухой пыли и шлама газоочисток технологических газов, аспирационного воздуха. Полной переработке подлежат все текущие шлаки доменного, сталеплавильного и ферросплавного производств, выход которых составляет более 30 млн т/год. Все текущие и отвальные железосодержащие отходы следует полностью использовать в производстве, при этом мощности по переработке отходов должны быть рассчитаны на ликвидацию отвалов в течение 15 лет, что исключит загрязнение почвы и бассейнов рек тяжелыми металлами. Использование всех текущих и отвальных железо-углеродсодержащих отходов позволит сократить затраты на добычу, обогащение и транспортировку первородного железорудного сырья, исключить загрязнение почвы и бассейнов рек оксидами тяжелых металлов и другими вредными веществами.

• *Внедрения современных информационно-моделирующих систем, максимального приближения управления доменным производством к автоматизированному.* Отечественный и зарубежный опыт убедительно доказывает, что развитие предприятий металлургического комплекса, его техническое перевооружение, решение проблем качества и конкурентоспособности металлопродукции на мировом рынке требуют коренного совершенствования систем сбора, хранения, обработки, передачи и использования информации, применяемых как для управления технологическими процессами, так и управления производством в целом. Период экономического финансового кризиса характеризуется нестабильным спросом на металлопродукцию, изменением условий снабжения предприятий железорудными материалами и коксом, а также изменением цен на сырье и железнодорожные тарифы. В период кризиса условия работы доменных цехов существенно изменились. Эти изменения приводят к необходимости частых перешихтовок и периодической остановке и переводу печей на тихий ход. Следует отметить, что анализ в целом состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике технологии ведения доменной плавки показывает, что в настоящее время разрыв между потенциальными возможностями средств автоматизации и реальными возможностями используемого программного обеспечения огромен. В связи с этим следует выделить научные и технические проблемы, первостепенными из которых являются [10]:

– использование современных достижений в области математического моделирования, моделирования знаний, распознавания образов, теории и практики доменной плавки, теории управления при разработке автоматизированных систем управления;

– разработка на основе современных принципов соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения;

– создание интегрированных интеллектуальных компьютерных систем поддержки принятия решений для управления как доменной печью, так и комплексом доменных печей цеха в целом.

Решение этих проблем возможно только при наличии финансовых средств, интеграции интеллектуальных ресурсов вузов, научно-исследовательских и проектных институтов, металлургических предприятий.

### **Резервы энергосбережения в печном хозяйстве**

В настоящее время в России наблюдается «революционный бум» по переводу сталеплавильного комплекса на новые технологии. Получение новых профилей литых заготовок в машинах непрерывного литья большой производительности требует совершенствования технологии нагрева металла и коренного технического перевооружения нагревательных и термических печей, парк которых исчисляется тысячами единиц на заводах

России. Для примера укажем количество нагревательных и термических печей только некоторых предприятий: НТМК ~20; УралВагонЗавод ~400, Уральский завод тяжелого машиностроения ~150, ВСМПО ~200, Челябинский металлургический комбинат (ЧМК) ~350, Синарский трубный завод ~300, Каменск-Уральский металлургический завод (КУМЗ) ~100. Нагревательные и термические печи Уральского региона обеспечивают работу прокатного и прессового комплексов заводов, а также выполняют функцию так называемого четвертого передела – термическую обработку готовой продукции, от которой зависит качество выпускаемых металлических изделий. В XXI в. российская промышленность вошла с парком печей, спроектированных и построенных в 40 – 60-х годах прошлого столетия. В настоящее время конструкции этих печей физически и морально устарели. На ежегодные капитальные ремонты требуются огромные затраты. К примеру, на капитальный ремонт только одной роликовой печи для нагрева листа перед прокаткой стана 1700 Челябинского металлургического комбината необходимо примерно 21 млн руб.

Проблемы, требующие решений при модернизации печей, приведены ниже [11–13].

• Большинство печей выполнены по старой «кирпичной» технологии. Это означает, что огнеупорная кладка представляет огромный массив, требующий больших затрат тепла на ее нагрев, для чего расходуются значительное количество топлива и электроэнергии.

• Использование на печах устаревших топливосжигающих устройств, не имеющих индивидуальных автоматических систем, обеспечивающих гибкое управление процессом сжигания газа. Некачественное сжигание топлива приводит к его перерасходу и к загрязнению вредными выбросами окружающей среды.

• Высокотемпературные печи зачастую не имеют аппаратов для подогрева воздуха, подаваемого для горения топлива, а если и имеют, то использование тепла уходящих из печи продуктов горения находится на низком уровне, обеспечивающем подогрев воздуха только до 200 – 300 °С.

• Большинство печей не имеют комплексной автоматизации управления тепловым режимом, который ведется вручную и полностью зависит от так называемого «человеческого фактора». На тех тепловых агрегатах, где существует система автоматического управления, она оснащена аппаратурой, разработанной в 50 – 70-х годах прошлого века.

Отмеченное выше приводит к тому, что отечественные тепловые агрегаты на сегодняшний день работают с большими удельными расходами топлива. Для примера, методические нагревательные печи, осуществляющие нагрев слябов и блюмов перед прокаткой, работают с удельным расходом топлива в пределах 80 – 100 кг у.т./т проката, в то же время работа зарубежных аналогичных печей осуществляется с удельными расходами 40 – 50 кг у.т./т проката.

Отдельные направления модернизации печей приведены ниже.

- Замена кирпичной кладки на футеровку из современных теплоизоляционных и огнеупорных керамволокнистых материалов. Основное их преимущество проявляется через хорошие теплоизоляционные свойства. Плотность стандартных кирпичных огнеупоров составляет  $1300 - 2100 \text{ кг/м}^3$ , а плотность волокнистых материалов –  $120 - 200 \text{ кг/м}^3$ . Применение этих материалов позволяет снизить потери тепла теплопроводностью через футеровку и с аккумуляцией на  $25 - 30 \%$ , что обеспечивает экономию топлива до  $15 \%$ .

- Увеличение степени использования тепла уходящих газов непосредственно в агрегате, применение современных топливосжигающих устройств. Качественное сжигание газа при интенсификации теплообмена в рабочем пространстве печей способно повысить производительность и равномерность нагрева металла. Интенсификация теплообмена возможна, прежде всего, за счет увеличения скорости движения газов в рабочем пространстве печей. Существующие устаревшие горелки обеспечивают скорости факелов  $20 - 40 \text{ м/с}$ . Новые конструкции скоростных горелок создают скорости порядка  $150 - 200 \text{ м/с}$ . Особые конструктивные особенности этих горелок обеспечивают сжигание газа по ступенчатому принципу, что позволяет резко увеличить скорости истечения продуктов горения из горелок и снизить вредные выбросы  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$ . Современные скоростные горелки являются автоматизированными конструкциями с индивидуальным управлением розжигом, контролем пламени и расходом газа и воздуха. Эти конструкции горелок могут оснащаться теплообменными аппаратами, встроенными непосредственно в корпус горелки, что позволяет поднять температуру подогрева воздуха горения до  $600 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Практика применения таких горелок показала возможность экономии топлива от  $30$  до  $50 \%$  с одновременным увеличением производительности печей на  $20 \%$  и снижением вредных выбросов ниже самых жестких норм предельно-допустимых концентраций.

- Внедрение комплексной многоуровневой системы автоматического управления тепловыми режимами печей с использованием логических контроллеров обеспечивает полное устранение «человеческого фактора» в управлении тепловым агрегатом. Это позволяет дополнительно экономить до  $10 - 15 \%$  топлива.

- Замена дорогостоящих видов топлива (кокса, мазута, пропан-бутана, электроэнергии) на более дешевые в России природный газ, каменный уголь, а также сбросные газы, сжигаемые в настоящее время на «свечах».

Актуальная проблема – замена устаревшего оборудования может быть комплексно и эффективно решена при модернизации существующих нагревательных печей и при строительстве новых тепловых агрегатов. Ряд заводов уже приступили к комплексной модернизации печ-

ного парка, это, прежде всего, НТМК, ЧМК, ВСМПО, КУМЗ.

**Выводы.** Все энергетические программы должны быть направлены, в первую очередь, не на обеспечение роста производства энергоресурсов, а на их экономное и рациональное использование. Для этого должны быть созданы соответствующие механизмы и условия, которые в настоящее время отсутствуют или практически не работают.

Опыт последних 20 лет показал, что ежегодный рост тарифов на первичные энергоносители (природный газ, уголь, нефтепродукты, электроэнергию из системы РАО «ЕЭС России») и транспорт, увеличение налогов на выбросы и складирование вредных отходов приводят только к соответствующему росту цен на металлопродукцию, не побуждают вести модернизацию производства и внедрять мероприятия по использованию вторичных ресурсов и энергосбережению.

На внедрение мероприятий по использованию внутренних ресурсо-экологических резервов и по энергосбережению требуются крупные финансовые затраты, и их реализацию следовало бы проводить при активном осуществлении государством стимулирующих и контрольных функций.

На государственном уровне следует обязать компании (ООО, ОАО, АК, холдинги и пр.):

- разработать на период до 2020 г. план технического перевооружения предприятий;
- выполнить мониторинг источников выбросов вредных и парниковых газов, накопленных и текущих техногенных отходов производства и вторичных энергетических ресурсов;
- определить потребность в сырье и энергетических ресурсах, исходя из условий использования техногенных отходов и вторичных ресурсов;
- разработать планы мероприятий по максимально возможному снижению выбросов до 2020 г.;
- определить потребность в инвестициях на эти цели и сроки реализации инновационных проектов и ресурсосберегающих мероприятий;
- установить госконтроль за осуществлением плановых мероприятий в согласованные сроки и целевым расходованием средств.

Проведение энергосберегающей политики в области пирометаллургии, разработка и реализация энерго-экологосберегающих технологий и агрегатов возможны только на основе теоретических представлений, базирующихся на фундаментальных науках, таких как математика, теплофизика, термодинамика и гидродинамика. В связи с этим одной из важнейших задач, решаемых научной школой металлургов-теплотехников, является развитие теплофизики процессов, теории тепломассообмена применительно к металлургическим технологиям. На государственном уровне заинтересовать компании в реальной поддержке отечественных ведущих научных школ в области ресурсо-энергосбережения в

промышленности (в частности, в металлургии). В противном случае не только развитие, но и сохранение отечественных ведущих научных школ, а также подготовка необходимого квалифицированного научного, инженерно-технического и производственного персонала, способного решать проблемы ресурсо-энергосбережения в России, станет проблематичным.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2020 г. Приказ Министра промышленности и энергетики Российской Федерации № 150 от 18.03.2009 г.
2. Л и с и н В.С. Стратегические ориентиры экономического развития черной металлургии в современных условиях. – М.: Экономика, 2005. – 404 с.
3. Ю з о в О.В., С е д ы х А.М., А ф о н и н С.З. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2005. № 4. С.3 – 11.
4. Ю з о в О.В., С е д ы х А.М., А ф о н и н С.З. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2008. № 2. С. 67 – 73.
5. Ю с ф и н Ю.С. //Сталь. 2010. № 4. С.12 – 13.
6. Ю с ф и н Ю.С. Металлургия чугуна. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
7. С а в ч у к Н.А, К у р у н о в И.Ф. Доменное производство на рубеже XXI века. – М.: ОАО «Черметинформация», 2000. – 42 с.
8. К у р у н о в И.Ф //Металлург. 2010. № 2. С. 69 – 77.
9. Я р о ш е н к о Ю.Г., Г о р д о н Я.М., Х о д о р о в с к а я И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии. – Екатеринбург: ОАО «УИПЦ», 2012. – 670 с.
10. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. – Екатеринбург : УрФУ, 2011. – 462 с.
11. К а з я е в М.Д., К а з я е в Д.М., В о х м я к о в А.М. Современные направления энергосбережения в нагревательных печах. // Тр. IV Междунар. конгресса «Новые направления в области теплотехнического строительства. Конструкции, технологии, материалы. Энергосбережение, экология и промышленная безопасность». – М.: 2013. С. 40 – 60.
12. Д р у ж и н и н Г.М., Л о ш к а р е в Н.Б., А ш и х м и н А.А. и др. // Сталь. 2010. № 3. С. 71 – 74.
13. Д р у ж и н и Г.М., Б а р т а ш М.Р., Л е о н т ь е в В.А., М а р т ы н о в А.П. Основы методологии модернизации конструкций режимов работы нагревательных и термических печей. // Сб. докладов научно-технической конференции. – Екатеринбург: ОАО «ВНИИМТ», 2010. – 366 с.

© 2014 г. Г.М. Дружинин, Л.А. Зайнуллин, М.Д. Казяев,  
Н.А. Спирин, Ю.Г. Ярошенко  
Поступила 25 сентября 2013 г.