

С. Ф. АРТЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
А. Л. КУХАРЕВ, канд. техн. наук, доц., СУНИГОТ УИПА,
 Стаханов

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ УСТАНОВОК

На основе анализа современного состояния технологических и конструктивных особенностей мощных дуговых сталеплавильных и руднотермических печей выделены наиболее перспективные направления по совершенствованию их систем электропитания и средств автоматизации, намечены актуальные задачи исследований. Намечены основные мероприятия для повышения пропускной способности и снижения потерь в СЭП, основанные на применении источников напряжения пониженной частоты, а также на совершенствовании электрооборудования компенсации реактивной мощности

Ключевые слова: дуговые сталеплавильные печи, руднотермические печи, система электропитания.

Постановка проблемы. В современной электрометаллургии наиболее мощными электропечными установками являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП), руднотермические печи (РТП), а также агрегаты внепечной обработки стали (АВОС), также называемые установками «печь-ковш». По нашим данным максимальная единичная установленная мощность ДСП составляет 300 МВА, РТП – 120 МВА, АВОС – 50 МВА [1, 2]. В таких установках одной из главнейших задач является повышение их энергоэффективности, направленное на снижение электрических, тепловых и технологических потерь.

Анализ последних исследований и публикаций. Рассматриваемые электропечные установки представляют собой сложные электро-технологические комплексы, в которых одновременно протекают множество физико-химических процессов. Среди них можно выделить пять основных процессов – технологический (термодинамика и кинетика химических реакций), энергетический (выделение тепловой энергии от горения различных видов топлива и преобразование электрической энергии в тепловую), теплообменный (распределение теплового потока в виде теплопроводности, конвективное перемещение газообразных и жидких масс, волновые процессы радиационного теплообме-

© С. Ф. Артюх, А. Л. Кухарев, 2014

на), гидрогазодинамический (явления механики газов и жидкостей) и механический (механика твердых тел) [3]. При этом взаимосвязи между этими процессами к настоящему времени изучены не полностью.

Проблемам повышения эффективности электропечных установок посвящено достаточное количество работ, некоторые из последних приведены в [1-16]. Однако большая часть работ посвящена усовершенствованию технологических режимов или отдельных параметров и узлов электропечных установок, при этом системологические требования для повышения эффективности их работы не всегда учитываются.

Целью данной статьи является анализ состояния проблемы повышения эффективности мощных электропечных установок.

Материалы и результаты исследований. Традиционно ДСП и РТП проектировались как различные электрометаллургические агрегаты и имели много технологических и конструктивных отличий. Как правило, ДСП работали в периодическом режиме (с остановкой на слив металла и загрузку новой шихты) и в большей степени с использованием открытых дуг. В большей части мощных РТП выплавка сплавов велась, и до настоящего времени ведется непрерывным способом с постоянной загрузкой шихты и периодическими выпусками сплава с глубоко погруженными в шихту электродами и закрытыми короткими дугами. Однако за последние годы в технологии выплавки стали в ДСП и технологии рудного переplava в РТП появилось много общих подходов. Например, некоторые современные ДСП могут работать в непрерывном режиме подобно РТП [4]. Также в мощных ДСП дуги экранируют вспененным шлаком, который образуется путем вдувания в печь кислорода и углеродсодержащих материалов, таким образом, происходит некоторое «закрытие» дуги, по подобию с РТП. В свою очередь, в некоторых РТП используется режим с длинными дугами [2], при котором торцы электродов подымаются на уровень насыпного слоя шихты для нагрева верхних слоев шихтовых материалов, что подобно режимам работы ДСП.

Нагрев металла в АВОС осуществляется практически также, как и в ДСП, при этом электрические параметры и длины электродуг адекватны электродугам процесса доводки металла в традиционных ДСП [5], но мощность таких печей несколько меньше. Это объясняется отсутствием такой энергозатратной стадии, как расплавление шихты, при этом тепло затрачивается только на расплавление вводимых материалов и поддержание необходимой температуры металла [5]. Из выше изложенного следует, что ДСП, РТП и АВОС можно рассматривать как

подобные электротехнологические агрегаты дугового нагрева. Обобщенная схема энергетических и материальных потоков в электропечных установках представлена на рис. 1.

В комплекс печного оборудования входит непосредственно сама электропечь, содержащая электроды и ванну, а также система электропитания (СЭП), содержащая электропечные трансформаторы, короткую сеть, коммутационную и защитную аппаратуру. Также используется другое вспомогательное оборудование, обеспечивающее подачу шихты и электродов, выпуск сплава и т.п.

Процессы передачи и потребления электроэнергии при некоторых допущениях [6] целесообразно рассматривать с помощью однофазной схемы замещения, приведенной на рис. 2.

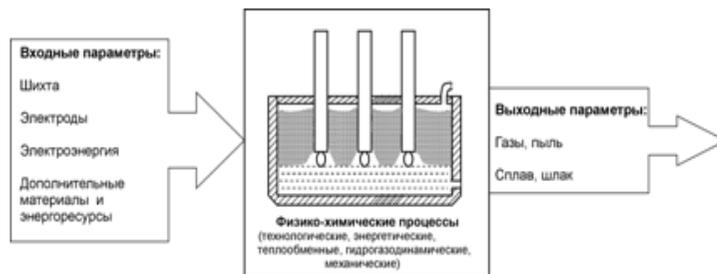


Рис. 1 – Обобщенная схема энергетических и материальных потоков в электропечных установках

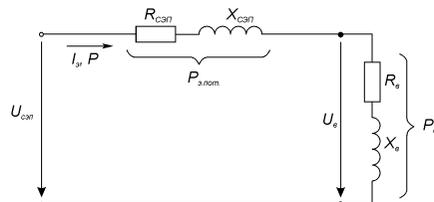


Рис. 2 – Однофазная схема замещения печного контура

На схеме: $R_{сэп}$, $X_{сэп}$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления системы электропитания, $R_в$, $X_в$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления ванны печи, $U_{сэп}$, $U_в$ – соответственно напряжения системы электропитания и ванны печи.

Одним из основных показателей энергоэффективности данных электропечных установок является удельный расход электроэнергии, определяемый отношением количества электрической энергии, затра-

ченной на 1 т выплавляемого продукта, при обеспечении его необходимого химического состава и требуемой производительности печи. Затраты электрической энергии, потребляемой печью, можно представить суммой активной мощности потерь в элементах системы электропитания $P_{э.пот.}$ и мощности, вводимой в ванну печи $P_в$:

$$P = P_{э.пот.} + P_в, \quad (1)$$

Причем мощность электрических потерь относительно активной $P_в$ и реактивной $Q_в$ мощностей ванны печи можно выразить следующей формулой:

$$P_{э.пот.} = \frac{P_в^2 + Q_в^2}{U_в^2} R_{сэп}, \quad (2)$$

а пропускную способность СЭП можно оценить известной в теории электропередач формулой:

$$P = \frac{U_{сэп} \cdot U_в \sin \delta}{X_{сэп}}, \quad (3)$$

где δ – угол между векторами $\vec{U}_{сэп}$ и $\vec{U}_в$.

Из выражений (2-3) видно, что эффективность печей существенно зависит от значений активного и реактивного сопротивлений СЭП, типовые значения которых для мощных печей приведены в табл. 1 [6, 7].

Таблица 1 – Типовые сопротивления и мощности потерь СЭП печей

| Наименование печи | Установленная мощность S , МВА | Ток электрода $I_э$, кА | Сопротивления короткой сети | | Мощность потерь $P_{э.пот.}$, МВт |
|---------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------------------------|
| | | | $R_{сэп}$, мОм | $X_{сэп}$, мОм | |
| ДСП | 50-80 | 44-61 | 0,3-0,63 | 3,5-4,5 | 3-4,7 |
| АВОС | 50 | 64-70 | 0,431 | 1,963 | 1,77 |
| РТП: | | | | | |
| для ферросплавов | 40-80 | 89-171 | 0,097-0,109 | 0,814-1,238 | 4,5-6,8 |
| для карбида кальция | 40-80 | 86-160 | 0,044-0,088 | 0,383-0,558 | 2,6-5,99 |
| для фосфора | 50-80 | 58-78 | 0,072-0,082 | 0,647-0,93 | 1,3-1,97 |

Из табл. 1 видно, что данные сопротивления при значениях токов, составляющих десятки килоампер, обуславливают достаточно большие потери активной мощности, достигающие нескольких мегаватт, при этом также снижается коэффициент мощности печной установки (до 0,65 – 0,75) и, в целом, полезная мощность и КПД.

Среди последних научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на снижение потерь и повышение пропускной способности СЭП печей, можно выделить следующие основные направления:

1. Улучшение конструктивных показателей коротких сетей.
2. Применение источников постоянного напряжения или напряжения пониженной частоты.
3. Усовершенствование способов и средств компенсации реактивной мощности.

К первому направлению относятся работы по оптимизации схемы и геометрии коротких сетей, симметрированию сопротивлений по фазам, электромагнитному экранированию отдельных участков короткой сети, усовершенствованию конструкции электрододержателей, в том числе контактных систем «короткая сеть-электрод» и др. Однако резервы повышения эффективности печей в этом направлении во многом уже исчерпаны.

По второму направлению следует отметить, что СЭП постоянным током достаточно давно применяются для ДСП, и максимальная их единичная мощность составляет 256 МВА [8]. Что касается РТП, то по данным компании Siemens [9] в настоящее время постоянный ток выгодно применять при выплавке только некоторых сплавов (феррохрома, ферроникеля, титановых шлаков). Компанией разработан ряд печей постоянного тока для данных сплавов мощностью от 1 до 70 МВт. Для выплавки остальных продуктов применение постоянного тока может быть неэкономичным или вообще неприемлемым в связи с возможностью развития побочных физико-химических процессов [9, 10].

Применение напряжения пониженной частоты в диапазоне 0,1-10 Гц представляется более целесообразным для РТП и для некоторых ДСП. Важным достоинством такого решения является возможность работы печи без малоресурсных подовых электродов. Кроме того, изменением частоты можно влиять на тепломассообменные процессы в печи, при этом также будет изменяться скорость протекания некоторых химических реакций [11]. При этом процессы, протекающие в печах при изменении частоты питающего напряжения исследованы недостаточно.

Что касается третьего направления, то здесь наиболее эффективным подходом является применение технологии FASTs (flexible alternating current transmission - управляемые (гибкие) системы передачи). Данные системы позволяют существенно повысить пропускную способность СЭП и эффективно регулировать напряжение для технологических нужд печи.

Однако, как и в случае преобразователей частоты, так и в случае оборудования FASTs, их применение в СЭП электропечей требует решения ряда вопросов, связанных с проработкой наиболее эффективных схемотехнических и алгоритмических решений.

Рассмотрим теперь вторую составляющую энергопотребления печи из выражения (1). Если пренебречь влиянием экзотермических реакций, то электрическая мощность в ванне печи расходуется на проведение технологических процессов $P_{техн.}$ и компенсацию тепловых потерь через футеровку и свод печи $P_{т.ном.}$:

$$P_{г} = P_{техн.} + P_{т.ном.}, \quad (4)$$

Однако, как отмечено в начале статьи, мощность, в ванне печи распределяется с учетом всех протекающих процессов и зависит от физико-химических характеристик находящихся в печи материалов, а также параметров подводимого к электродам напряжения и конструктивных особенностей печи.

Традиционно рабочее пространство печи разделяют на три основные зоны, отличающиеся характером происходящих в них энергетических процессов [12]. Это зона материалов, имеющая относительно низкую электропроводность, зона дугового разряда и зона, в которой расположены твердые и жидкие материалы с высокой электропроводностью. Распределение энергии между этими зонами характеризует специфику конкретного технологического процесса и конкретной печи. Исследованиям процессов, протекающих в рабочем пространстве ДСП, РТП и АВОС, посвящено достаточно большое количество публикаций. Одной из основных проблем, снижающих эффективность работы печей, является тепловая неоднородность нижнего пояса ванн печей [13]. При этом зоны высоких температур формируются электрическими дугами в небольших областях, расположенных вокруг электродов (так называемые «горячие» зоны). В этих областях и протекают основные химические реакции, формирующие конечный состав выплавляемого продукта. В свою очередь в пространствах между электродами и футеровкой печи образуются так называемые «холодные» зоны, в которых

основные химические реакции значительно замедляются, и в них могут развиваться побочные реакции с образованием шлаков.

Для повышения интенсивности массо- и теплообмена в современных печах (в большей части в ДСП) применяются различные способы внешних воздействий на ванну печи, способствующие интенсификации процесса плавления [14, 15]:

- дополнительный подогрев шихты в «холодных» зонах топливными горелками (плазмотронами);
- ввод в печь дополнительных источников экзотермических реакций (углерод, природный газ и т.п.);
- продувка расплава инертными газами;
- электромагнитное перемешивание расплава;
- электромагнитное управление направлением горения дугового разряда.

Однако параметры применяемых внешних воздействий сложнейшим образом влияют на физико-химические процессы, происходящие в печах, поэтому перспективным направлением исследований является оптимизация данных процессов [16].

Одним из наиболее важных показателей, определяющих эффективность печных установок, является уровень применяемых систем автоматического управления. Современные системы управления ДСП и РТП направлены на минимизацию потерь электроэнергии и других энергоресурсов и основаны на комбинации математических моделей физико-химических процессов, теории преобразования сигналов и идентификации, методов адаптивного управления и оптимизации (рис. 3) [16, 17].



Рис. 3 – Математический базис систем автоматического управления электропечными установками

Следует отметить, что непосредственный прямой контроль ряда показателей физико-химических процессов в ванне печи весьма сложен в связи с наличием высоких температур, значительных электромагнитных полей и запыленности среды, поэтому в последнее время широко применяются косвенные методы оценки, основанные на анализе электротехнических параметров, температурных измерений, состава отходящих газов и др [10, 12, 16].

Важными элементами анализа работы печей являются расчеты энергетического и материального балансов, анализ параметров распределения энергий в ванне печи, получаемые на основе данных измерений, реализуемых современными системами управления (см. табл. 2).

Таким образом, чтобы получить наиболее полную модель печи и эффективно управлять технологическим процессом необходимо задействовать большое количество измерений, в том числе физико-химических, а также значительные математические и программные ресурсы. Поэтому работы по усовершенствованию систем управления электропечами с использованием надежных критериев оптимизации к настоящему времени далеки от своего завершения.

Таблица 2 – Некоторые идентифицируемые параметры электропечей

| Показатели энергоэффективности | Основные измеряемые величины для идентификации процесса | Идентифицируемые параметры |
|--|---|--|
| Электротехнические показатели | | |
| Распределение электрической мощности в подэлектродных зонах печи | активное и индуктивное сопротивление ванны печи | интегральное представление о распределении электроэнергии в пространстве печи, длина (положение торцов) электродов |
| | параметры электромагнитного поля электродов печи | |
| | физические уровни расплава, шлака | мощность дугового разряда, устойчивость горения дуг, параметры зоны, шунтирующей дугу и зоны расплава |
| | высшие гармоники и постоянные составляющие токов и напряжений | |
| | вибрация конструктивных элементов печи | |
| | акустические сигналы из ванны печи | |
| динамические параметры вольтамперной характеристики печи | | |
| Физико-химические показатели | | |

Продолжение таблицы 1

| | | |
|--|---|---|
| Интенсивность процессов тепло- массопереноса, обеспечение однородности температуры и химического состава расплава, направленность и скорость протекания химических реакций | температура конструктивных элементов печи (ванны, короткой сети, охлаждаемой жидкости и т.д.) | стадийность технологического процесса, тепловой режим печи, составляющие материального баланса (баланса углерода), составляющие энергобаланса, параметры околоэлектродных зон |
| | физико-химические параметры выплавляемого продукта в различных участках ванны печи | |
| | физико-химические параметры отходящих газов | |
| | скорость схода шихты | |

Выводы.

1. В результате анализа технологических и конструктивных особенностей мощных электропечных установок, показаны причины, ухудшающие технико-экономические показатели работы печей, в том числе значительные потери активной мощности, достигающие нескольких мегаватт, обусловленные достаточно большими активными и индуктивными сопротивлениями СЭП.

2. Намечены основные мероприятия для повышения пропускной способности и снижения потерь в СЭП, основанные на применении источников напряжения пониженной частоты, а также на совершенствовании электрооборудования компенсации реактивной мощности и способов управления электрическими и технологическими режимами печей.

3. Показана необходимость дальнейшего изучения взаимосвязей между параметрами СЭП и физико-химическими процессами, протекающими в печи при различных внешних воздействиях, с целью повышения эффективности энергетических и тепломассообменных процессов.

Список літератури: 1. Sellan R. The 300-Ton “Jumbo-Size” FastArc EAF at MMK Iskenderun new Danieli Minimill Complex (Turkey) / R. Sellan, M. Fabbro // AISTech 2009 Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference (St. Louis, Missouri, May 4 - 7, 2009). – 2009. – pp. 657–666. 2. Walker C. High power, shield-arc FeNi furnace operation – challenges and solutions / C. Walker, T. Koehler, N. Voermann // The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future (INFACON XII) (Helsinki, Finland, June 6 – 9, 2010). – 2010. – pp. 681–696. 3. Педро А.А., Модульная технология – один из путей развития рудной электротермии / А.А. Педро, М.П. Арлиевский, В.В. Дрессен // Руднотермические печи (конструкции, исследование и оптимизация технологических процессов, моделирование): сб. тр. Всероссийской научно-технической конференции «ЭЛЕКТРО-

ТЕРМИЯ-2006» (С.Петербург, 6–8 июня 2006 года) / под ред. Ю.П. Удалова. – С.Петербург, изд. «Перспектив Науки». – 2006. – С. 8–13. 4. Загерман Т. Новая электродуговая печь S/EAF для работы в непрерывном режиме: экономичность при большой производительности / Т. Загерман // Черные металлы. – 2013. – № 2. – С. 33–35. 5. Кузьменко А. Г. Перспективы развития электросталеплавильного комплекса — электропечей и ковшевых печей для производства стали / А. Г. Кузьменко, Ю. Ф. Фролов, Поздняков М. А. и др. // Электрометаллургия. – 2012. – № 11. – С. 2–10. 6. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей. Справ. изд. / Данцис Я. Б., Кацевич Л. С., Жиллов Г. М. и др. / 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Metallurgia, 1987. – 320 с. 7. Фролов Ю. Ф. Устройство для подвода электроэнергии к металлургическим и руднотермическим плавильным агрегатам. / Ю. Ф. Фролов, В. А. Лебедев // Научно-практическая конференция ОАО «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ» - 60 лет. Новосибирск. – 2004. – Электронный сборник докладов. – 29. – 8 с. 8. Адати Т. Сверхмощная 420-тонная электродуговая печь компании Tokyo Steel, Япония / Т. Адати, Р. Селлан // Металлургическое производство и технология. – 2012. – № 2. – С. 8–17. 9. Kleinschmidt G. AC- and DC- smelter technology for ferrous metal production / G. Kleinschmidt, R. Degel, M. Koneke, H. Oterdoom // The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future (INFACON XII) (Helsinki, Finland, June 6–9). – 2010. – pp. 828–838. 10. Педро А. А. Особенности существования электрохимических процессов в ванне руднотермической печи / А. А. Педро, М. П. Арлиевский, Р. В. Куртенков // Электрометаллургия. – 2010. – № 11. – С. 19–24. 11. Козлов К. Б. Химические реакции в гетерогенной системе твердое-жидкость-газ при протекании переменного электрического тока / К. Б. Козлов, Б. А. Лавров, С. В. Чижов, К. В. Голованов, Д. А. Яворская // Актуальные проблемы рудной и химической электротермии: сб. тр. Всероссийской научно-технической конференции «ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ-2012» (С.Петербург, 5–7 июня 2012 года) / под ред. Ю. П. Удалова. – С.Петербург, изд. «Перспектив Науки». – 2012. – С. 287–303. 12. Нехамин С. М. Управление энергетической структурой рабочего пространства дуговых сталеплавильных и руднотермических печей – механизм повышения эффективности их работы / С. М. Нехамин // Электрометаллургия. – 2013. – № 11. – С. 9–16. 13. Yang Y. Analysis of transport phenomena in submerged arc furnace for ferrochrome production / Y. Yang, Y. Xiao, M. A. Reuter // The Tenth International Ferroalloys Congress (INFACON X) (Cape Town, South Africa, 1–4 February 2004). – 2004. – pp. 15–25. 14. Гудым Ю. А. Рациональные способы идентификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах / Ю. А. Гудым, И. Ю. Зиннуров, А. Д. Киселев, А. М. Шумаков // Вестник Южноуральского государственного университета. – 2008. – С. 10–13. 15. Корытчинков Д. Е. Методы и алгоритмы математического моделирования процессов электромагнитного управления направлением горения дугового разряда в электродуговых печах постоянного тока: дис...кандидата техн. наук: 05.13.18 / Корытчинков Дмитрий Евгеньевич. – Рязань, 2011. – 167 с. 16. Белковский А. Г. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций / А. Г. Белковский, Я. Л. Кац, М. В. Краснянский // Черная металлургия. – 2013. – № 3. – С. 72–88. 17. Петергеря Ю. С. Теория та засоби побудови енергоефективних систем керування електроживленням локальних об'єктів / Ю. С. Петергеря, Т. А. Хижняк, І. В. Блінов, В. В. Чопик // Технічна електродинаміка. – Тематичний випуск „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2010. – Ч.1. – С. 43–48.

Bibliography (transliterated): 3. Pedro A.A., Arlievskij M.P. Dressen V.V. Modul'naja tehnologija – odin iz putej razvitija rudnoj jelektrotermii, Rudnotermicheskie pechi (konstrukcii, issledovanie i optimizacija tehnologicheskikh processov, modelirovanie): sb. tr. Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «JeLEKTROTERTMIJA-2006» (S.Peterburg, 6–8 ijunja 2006 goda). S.Peterburg, izd. «Prospekt Nauki», 2006. 8–13. Print. 4. Zagerman T. Novaja jelektro-

dugovaja pech' S/EAF dlja raboty v nepreryvnom rezhime: jekonomichnost' pri bol'shej proizvoditel'nosti. *Chernye metally*. No 2. 2013. 33–35 Print. **5**. Kuz'menko A. G., Frolov Ju. F., Pozdnjakov M. A. Perspektivy razvitiya elektrostaleplavil'nogo kompleksa — jelektropechej i kovshevyh pechej dlja proizvodstva stali. *Jelektrometallurgija*. No. 11. 2012. 2–10. Print. **6**. Dancis Ja. B., Kacevich L. S., Zhilov G. M. *Korotkie seti i jelektricheskie parametry dugovyh jelektropechej*. Moscow. : Metallurgija, 1987. **8**. Adati T. Sellan R. Sverhmoshhnaja 420-tonnaja jelektrodugovaja pech' kompanii Tokyo Steel, Japonija *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tehnologija*. No. 2. 2012. 8–17. Print **9**. Kleinschmidt G. AC- and DC- smelter technology for ferrous metal production / G. Kleinschmidt, R. Degel, M. Köneke, H. Oterdoom // The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future (INFACON XII) (Helsinki, Finland, June 6–9).— 2010.— rr. 828–838. **10**. Pedro A. A. M. P. Arlievskij, R. V. Kurtenkov Osobnosti sushhestvovaniya jelektrohimicheskikh processov v vanne rudnotermicheskoj pechi *Jelektrometallurgija*. No 11. 2010. 19–24. Print. **11**. Kozlov K. B. B. A. Lavrov, S. V. Chizhov, K. V. Golovanov, D. A. Javorskaja Himicheskie reakcii v geterogennoj sisteme tverdoe-zhidkost'-gaz pri protekanii peremennogo jelektricheskogo toka. *Aktual'nye problemy rudnoj i himicheskoj jelektrotermii: sb. tr. Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii «JeLEK-TROTERMIJa-2012»* S.Peterburg, izd. «Prospekt Nauki». 2012. 287–303. Print **12**. Nehamin S. M. Upravlenie jenergeticheskoi strukturoj rabocheho prostranstva dugovyh staleplavil'nyh i rudnotermicheskikh pechej — mehanizm povysheniya jeffektivnosti ih raboty. *Jelektrometallurgija*. No. 11. 2013. 9–16. Print. **13**. Yang Y. Y. Xiao, M. A. Reuter Analysis of transport phenomena in submerged arc furnace for ferrochrome production *The Tenth International Ferroalloys Congress*. 2004. . 15–25. Print **14**. Gudym Ju. A. Zinnurov I. Ju. Kiselev A. D. A. M. Shumakov Racional'nye sposoby identifikacii plavki v sovremennyh dugovyh staleplavil'nyh pechah.. *Vestnik Juzhnoural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2008. 10–13. Print. **15**. Korytchinkov D. E. *Metody i algoritmy matematicheskogo modelirovaniya processov jelektromagnitnogo upravlenija napravleniem gorenija dugovogo razrjada v jelektrodugovyh pechah postojannogo toka: dis...kandidata tehn. nauk: 05.13.18* Korytchinkov Dmitrij Evgen'evich.— Rjazan', 2011. **16**. Belkovskij A. G. Kac Ja. L., Krasnjanskij M. V. Sovremennoe sostojanie i tendencii razvitiya tehnologii proizvodstva stali v DSP i ih konstrukcij *Chernaja metallurgija*. 2013. No 3. 72–88. Print **17**. Petergerja Ju. S. Hizhnjak T. A. Blinov I. V Chopik V. V. Teorija ta zasobi pobudovi energoefektivnih sistem keruvannja elektrozhivlennjam lokal'nih ob'ektiv. *Tehnichna elektrodinamika.— Tematicnij vipusk „Problemi suchasnoi elektrotehniki”*. No.1. 2010. 43–48. Print.

Поступила (received) 16.10.2014