

УДК 621.36

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-53-58

Анализ влияния углеродистых восстановителей на потребление энергии в электропечи для производства феррохрома

В.П. Рубцов, С.Ю. Колыванов, И.В. Хомяков

На основании мониторинга электрического режима работы рудовосстановительной электропечи для производства феррохрома были проведены экспериментальные исследования влияния состава восстановительной шихты на следующие технико-экономические показатели плавки: электрический КПД, выход годного металла, производительность печи, удельный расход электроэнергии. Разработан измерительно-вычислительный компьютеризированный комплекс, обеспечивающий измерение электрических, тепловых и массовых показателей работы печи и формирование исходного итогового файла работы печи за сутки; расчет материального и теплового баланса печи и электрических характеристик печи; формирование исходной таблицы в Excel с возможностью создания графиков и диаграмм измеряемых величин.

Установлено, что для рационального ведения плавки необходимо контролировать и поддерживать сопротивление ванны печи. Результаты исследования представлены в виде таблиц и графиков, показывающих влияние электросопротивления ванны печи для различных марок кокса и угля на удельный расход электроэнергии. Даны аппроксимирующие прямые указанных зависимостей, полученные методом наименьших квадратов, которые целесообразно использовать для настройки регуляторов режимов работы печи.

Ключевые слова: удельный расход электроэнергии, электрическое сопротивление ванны печи, углеродистые восстановители, рудовосстановительная электропечь.

Для цитирования: Рубцов В.П., Колыванов С.Ю., Хомяков И.В. Анализ влияния углеродистых восстановителей на потребление энергии в электропечи для производства феррохрома // Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 53—58. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-53-58.

Analyzing the Effect of Carbonaceous Reducing Agents on Energy Consumption in a Ferrochromium Producing Electric Furnace

B.P. Rubtsov, S.Yu. Kolyvanov, I.V. Khomyakov

The electrical operating mode of an electric ore-smelting furnace for producing ferrochromium was monitored for experimentally studying the effect the reducing charge composition has on the melting process technical and economic indicators, including the electrical efficiency, yield of commercial metal, furnace output, and specific energy consumption. A computerized measuring and computing complex was developed that provides measurement of electrical, thermal and mass performance of the furnace and the formation of the initial summary file of the furnace operation per day; calculation of the material and heat balance of the furnace and electrical characteristics of the furnace; creating a source table in Excel with the ability to create graphs and diagrams of measured values.

It is established that for the rational conduct of melting it is necessary to control and maintain the resistance of the furnace bath. The study results are presented in the form of tables and graphs illustrating the effect the bath furnace electrical resistance has on the specific consumption of electric energy for different grades of coke and coal. The article also presents straight lines (obtained using the least squares method) approximating the above-mentioned dependences, which can be used for adjusting the controllers of the furnace operation modes.

Key words: specific consumption of electric energy, bath furnace electrical resistance, carbonaceous reducing agents, electric ore-smelting furnace.

For citation: Rubtsov B.P., Kolyvanov S.Yu., Khomyakov I.V. Analyzing the Effect of Carbonaceous Reducing Agents on Energy Consumption in a Ferrochromium Producing Electric Furnace. MPEI Vestnik. 2018;1:53—58. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-53-58.

Введение

Производство высококачественных легированных сталей и сплавов невозможно без использования ферросплавов (ферросилиций, ферромарганец, феррохром и т. д.), которые получают в руднотермических или рудовосстановительных электропечах (РВП) путем восстановления природных руд, концентратов или технически чистых оксидов специальными восстано-

вителями (кокс, древесный и каменный уголь и т.д.) при высоких температурах, развиваемых в ванне печи. Рудовосстановительные электропечи — активные потребители электрической энергии, их установленные мощности достигают 250 МВА на одну установку, а расход электроэнергии на тонну выплавленного продукта превышает 10 000 [1 — 3]. Из-за высоких удельных концентраций энергии задачи повышения энергетической эффективности установок и рационального

расходования электроэнергии стоят для данного класса агрегатов наиболее остро.

Технико-экономические показатели работы РВП в значительной степени зависят от того, насколько рационально ведется в ней технологический процесс. Однако определение рационального электротехнологического режима в условиях нестабильности параметров шихты представляет собой сложную многофакторную задачу, аналитическое решение которой невозможно. Невозможно ее решить и на основе эксплуатационного опыта, который вырабатывается на базе интуитивных представлений плавильщика о влиянии тех или иных факторов на выходные показатели печи, поэтому даже опытный плавильщик не в состоянии постоянно поддерживать рациональный режим работы печи, особенно при частых изменениях условий плавки и параметров шихты.

Исследована зависимость энергоэффективности рудовосстановительной печи для производства углеродистого феррохрома от качества углеродистого восстановителя и его воздействия на величину удельного электрического сопротивления ванны печи, поскольку величина удельного электрического сопротивления ванны рудовосстановительной печи существенно влияет на распределение выделяемой в ней мощности и, следовательно, на энергоэффективность ее работы [4].

Постановка задачи и проведение исследований

Исследования проводились на действующей электропечи № 1 типа РКО-16,5ФХ-М Тихвинского ферросплавного завода (ООО «ТФЗ») с целью определения рациональных электрических режимов, обеспечивающих снижение удельного расхода электроэнергии и повышение производительности. Рудовосстановительная электропечь РКО-16,5ФХ-М оснащена тремя однофазными печными трансформаторами типа ЭОЦНР-12500/10 общей установленной мощностью 22,5 МВА.

Основные технические данные электропечи

Номинальная мощность печи, кВА	16500
Установленная мощность печных трансформаторов	22500
Пределы вторичного напряжения	137...204
Максимальный ток в электроде	60000
Диаметр электрода	1200
Диаметр распада электродов	3200...3400
Диаметр кожуха электропечи	10000
Размеры плавильного пространства:	
диаметр ванны, мм	6900
глубина ванны, мм	3000
Футеровка ванны	периклазовая (магнезитовая)

В работе использовался измерительный комплекс автоматической системы управления технологическим процессом, внедренный на ООО «ТФЗ», который ежедневно регистрирует:

- напряжение — линейное и фазное (пофазно);
- ток с высокой стороны;
- ток на электродах;
- активную и реактивную мощности (пофазно);
- полную мощность (на три фазы);
- коэффициент мощности (пофазно);
- съем активной и реактивной энергии (на три фазы);
- расход шихтовых материалов;
- положение и перепуск электродов;
- температуру систем охлаждения печи.

Измеренные величины поступали в контроллер фирмы Шнайдер и заносились в базу данных SQL. В процессе исследования оценивалось влияние расхода и состава рудосодержащих компонентов сырья и восстановителя на технологические (выход и состав целевого продукта) и электрические (ток электрода I_e , полезное напряжение на электроде U_e , расход электроэнергии) показатели процесса плавки.

В ходе эксперимента была использована хромовая руда однородного состава из одного месторождения, чтобы исключить влияние ее химического состава на выходные параметры. Плавка проводилась по технологической инструкции, утвержденной на ООО «ТФЗ», для выпуска феррохрома марки ФХ850.

Исследования проходили с апреля по июль 2015 г. в три этапа. На первом этапе эксперимента использовался кокс и уголь марки «ТОМ» в соотношении 55 % кокса на 45 % угля.

Качественные характеристики угля, %:

влага	4,8
зола	7,5
летучие	13,5
содержание углерода	79

На втором этапе использовался кокс и уголь марки «ТОМ» различных поставщиков в соотношении 3:1.

Качественные характеристики угля

второго поставщика, %:

влага	4,1
зола	8,6
летучие	14,9
содержание углерода	76,5

Результаты исследования приведены в таблице.

Обработка экспериментальных данных

Для обработки полученных данных была создана программа на базе методики инженерных и статистических расчетов, обеспечивающая необходимые расчеты и зависимости.

Программа состоит из трех частей:

- сбора данных из различных источников и баз данных и формирования исходного итогового файла работы печи за сутки;
- расчета материального и теплового балансов и электрических характеристик печи;

Электротехнологические показатели производства феррохрома

Наименование	апрель	май	июль
Фактическое время работы, сут.	31	24	31
Расход хромовой руды, т	6280,36	4902,38	6711,14
Содержание Cr ₂ O ₃ , %	45,64	45,96	45,31
Расход металлоконцентрата, т	149,06	114,13	201,68
Содержание Cr, %	39,34	43,48	42,62
Расход кокса сухого, т	680,29	568,52	643,08
Содержание углерода, %	87,90	88,10	88,00
Расход угля сухого, т	575,93	453,96	620,13
Содержание углерода, %	79,00	76,13	83,30
Отношение угля к коксу	0,46	0,44	0,49
Расход электродной массы, т	67,76	57,25	70,26
Мощность, МВт	14,72	14,23	14,28
Кратность шлака	1,38	1,37	1,39
Удельный расход электрической энергии, кВт·ч/т Cr	5816,03	5934,23	6074,53
Отношение Cr/C	1,86	1,82	1,92
Выплавлено ФХ по маркам, %:			
ФХ800	5,86	30,76	17,62
ФХ850	49,60	46,34	39,81
ФХ900	44,54	21,72	38,52
ФХ с C > 9,0 %	0,00	1,18	4,05
Посадка электродов, см:			
Фаза А	45,83	52,15	62,01
Фаза В	49,10	49,40	48,69
Фаза С	45,90	50,53	52,72
Ток на низкой стороне фазы:			
А, А	55,60	43,35	55,70
В, А	57,12	42,10	54,17
С, А	56,44	42,73	54,40
Напряжение на низкой стороне фазы:			
А, В	86,74	66,99	82,83
В, В	86,43	69,11	86,63
С, В	87,23	65,80	82,85
Мощность реактивная на низкой стороне фазы, Мвар:			
А	2,17	1,50	4,13
В	2,23	1,56	4,17
С	2,09	1,69	3,88

• формирования исходной таблицы в «EXSEL» с возможностью создания графиков и диаграмм требуемых параметров.

Расчет электрических характеристик печи проводился по известным зависимостям, приведенным в [3, 4].

Анализ результатов исследований

В результате исследований был получен обширный материал, характеризующий электрические, тепловые, технологические и технико-экономические показатели работы. Поскольку провести анализ полученных материалов по всем показателям работы печи в рамках одной статьи не представляется возможным, то рассмотрим влияние всего лишь двух показателей: коэффициента избытка углерода и электросопротивления ванны печи.

Коэффициент избытка углерода рассчитывался как отношение количества твердого углерода, введенного в печь, к его необходимому количеству по условиям стехиометрии. Данный показатель, характеризующий состав шихты, крайне важен для нормального хода плавки. Количество восстановителя в шихте должно полностью обеспечивать протекание восстановительных процессов, избыток восстановителя и его недостаток приводят к нарушению нормального хода плавки.

При недостатке восстановителя в шихте в горне печи образуются большие массы расплавленного шлака с высоким содержанием хрома. Нижняя часть электрода при этом находится в этой массе, что приводит к шлакованию печи, неустойчивой посадке электродов и колебаниям потребляемой мощности. Вязкость шлака увеличивается, рабочие концы электродов становятся тоньше и быстро укорачиваются, вызывая перерасход электродной массы. При таком нарушении необходимо увеличивать количество восстановителя в шихте.

При избытке восстановителя не полностью расходуется на процессы восстановления, что приводит к росту содержания углерода в феррохроме, восстановлению вредных примесей, высокой посадке электродов и, соответственно, к увеличению расхода электроэнергии. Такая ситуация возникла на третьем этапе исследования при замене кокса антрацитом.

На рис. 1 — 3 сплошными линиями показаны зависимости влияния активного сопротивления ванны печи на удельный расход электроэнергии. Каждая точка на диаграммах соответствует 10 — 12 выпускам феррохрома в сутки.

В процессе исследования было выявлено, что показатели плавки характеризуются большим разбросом даже при плавке шихты с одинаковым фракционным составом. Полученный массив данных не позволил в явной форме определить рациональные режимы работы печи при изменении фракционного состава шихты, поэтому была сделана попытка поиска рационального режима работы печи для каждого из фракционных составов углеродистого восстановителя. При этом под рациональным режимом работы печи для каждого фракционного состава шихты понимался режим, при котором обеспечивался максимальный выход годного металла при максимальной производительности печи и минимальном расходе электроэнергии.

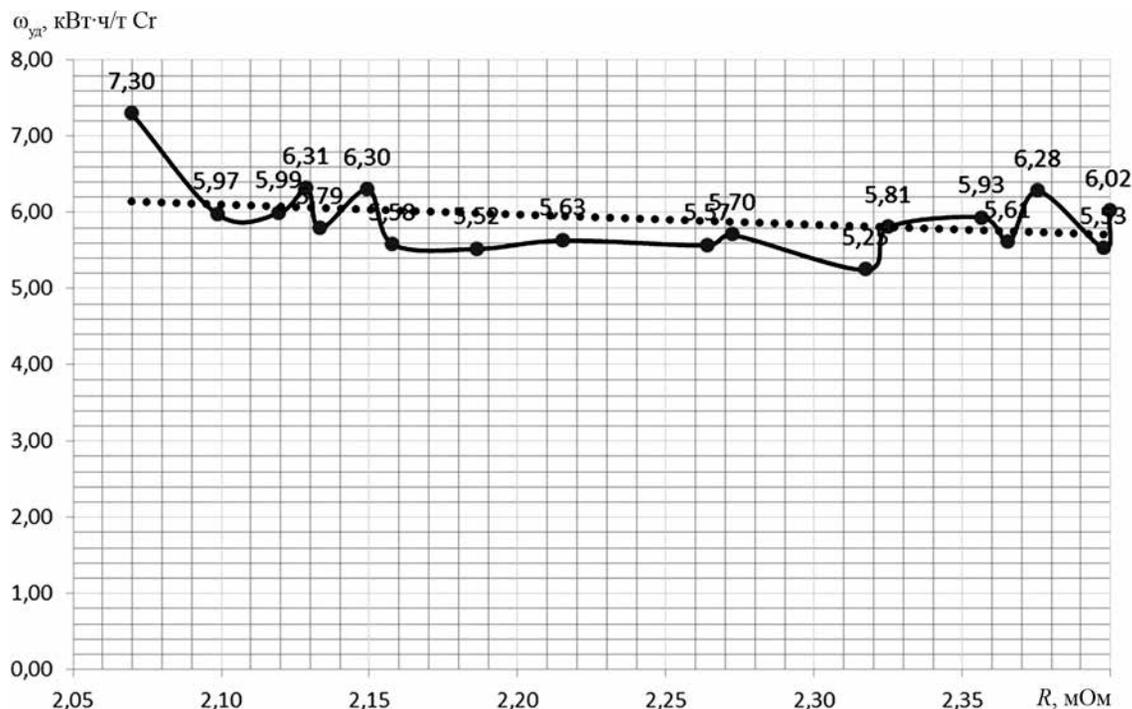


Рис. 1. Влияние активного сопротивления ванны печи на удельный расход электроэнергии

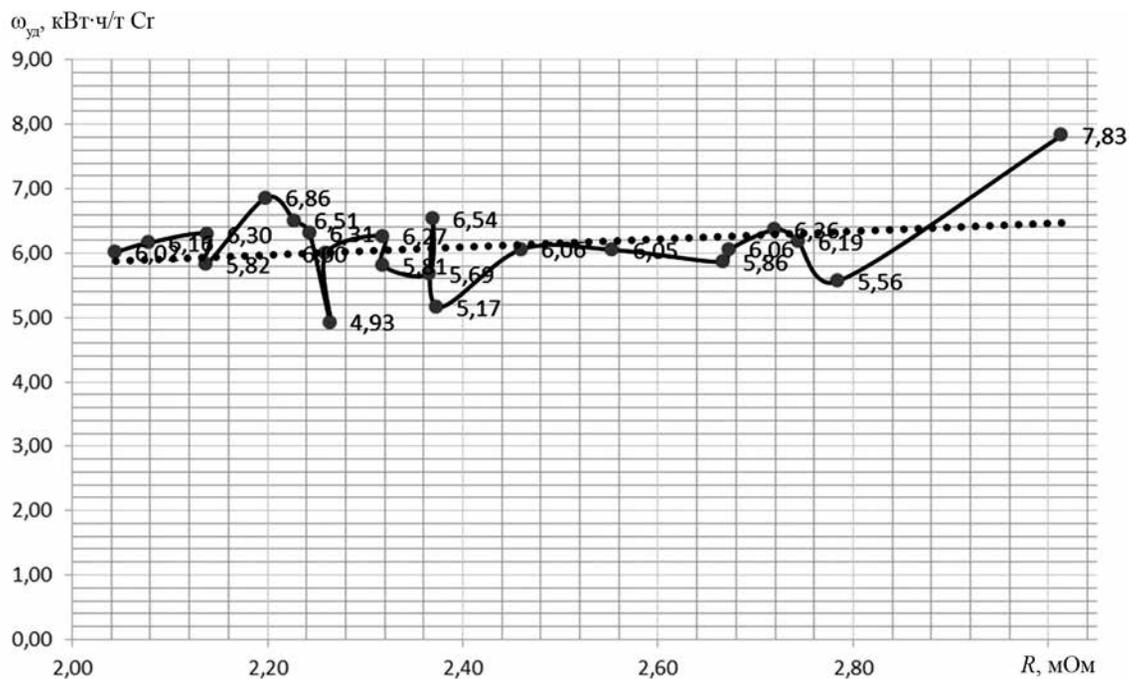


Рис. 2. Влияние активного сопротивления ванны печи на удельный расход электроэнергии

Важными показателями эффективности плавки феррохрома являются: потребляемая за плавку электроэнергия, количество и качество загружаемых компонентов шихты, значение и точность поддержания тока, напряжения и коэффициента мощности электропечи. Не менее важным критерием выбора рационального режима плавки можно считать производительность печи, определяемую выпуском феррохрома в тоннах в час. Полученные данные позволяют дать не

только качественную, но и количественную оценку эффективности плавки феррохрома с различным фракционным составом добавки углеродистого восстановителя и определить рациональные электротехнологические режимы работы электропечи.

Зависимости на рис. 1 — 3 иллюстрируют влияние электросопротивления ванны печи на удельный расход электроэнергии. На графиках отражены зависимости $R_{уд} = f(R_v)$ для различных режимов, изображенные

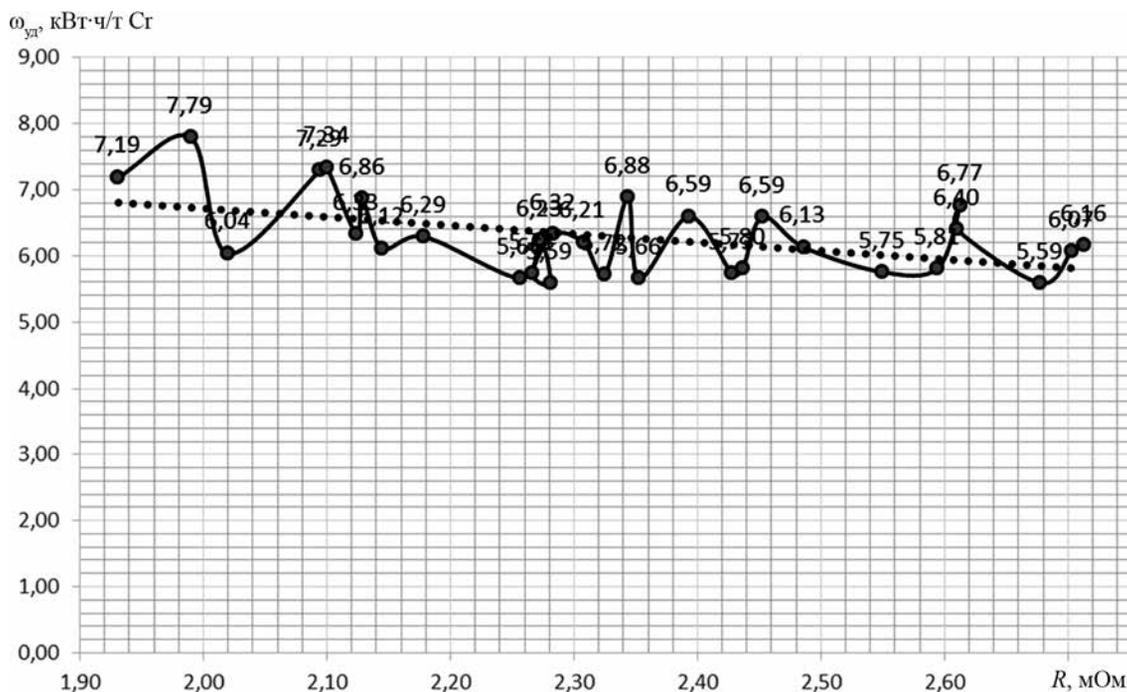


Рис. 3. Влияние удельного электросопротивления антрацита, расположенного в нижних горизонтах печи, на удельный расход электроэнергии

сплошными линиями. Там же показаны аппроксимирующие прямые указанных зависимостей, полученные методом наименьших квадратов. Последние целесообразно использовать для настройки регуляторов режимов работы печи.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что чем выше сопротивление ванны печи, тем меньше мощность, выделяемая в шихте за счет протекающего по ней тока, и тем больше мощность, выделяемая дугой [5].

Высокое электросопротивление ванны печи оказывает положительное влияние на работу рудотермической печи, так как энергия, создаваемая дугой, выделяется в околодуговом пространстве, обеспечивая более полный прогрев шихты и уменьшая дополнительные потери тепла через колошник. Управлять сопротивлением печи можно путем применения при плавке различных углеродистых восстановителей, удельное электросопротивление которых изменяется в широких диапазонах.

Из анализа зависимостей следует, что на величину удельного электросопротивления шихты оказывает влияние природное качество углей (электросопротивление), применяемых для частичной замены кокса. На рис. 3 показано влияние удельного электросопротивления антрацита, расположенного в нижних горизонтах печи. При повышении температуры удельное сопротивление различных углеродистых восстановителей снижается на порядок. Было выявлено, что частичная замена кокса антрацитом приводит к увеличению удельного электросопротивления шихты, улучшая тем самым технологические показатели работы печи. В то же время на экономические показатели производства феррохрома может влиять стоимость углеро-

дистого восстановителя и содержание в нем вредных примесей [6, 7].

Следует отметить неоднозначное влияние электросопротивления ванны печи на удельный расход электроэнергии (см. рис. 2), в котором удельный расход электроэнергии увеличивается при увеличении электросопротивления ванны печи, что противоречит выявленной закономерности. Причина этого противоречия связана с тем обстоятельством, что зависимость была получена в процессе подготовки печи к профилактическому ремонту [8 — 10].

Выводы

Установлено, что важным показателем работы печи, влияющим на удельный расход электроэнергии, является электрическое сопротивление ванны печи, которое может быть использовано для построения автоматического регулятора режима плавки. Среди использованных видов углеродистого восстановителя наилучшие показатели по электросопротивлению ванны печи обеспечивает кокс в сочетании с антрацитом.

Литература

1. **Электрооборудование** и автоматика электротермических установок / под ред. А.П. Альтгаузена и др. М.: Энергия, 1978.
2. **Струнский Б.М.** Руднотермические плавильные печи. М.: Металлургия, 1972.
3. **Кондрашев В.П. и др.** Определение рациональных режимов эксплуатации руднотермических печей // Сталь. 2010. № 2. С. 32—38.

4. **Живилюк И.Г.** Экспериментальное определение электрических параметров и электрического поля мощной руднотермической печи // *Электротермия*. 1962. Вып. 6. С. 8—9.

5. **Степанянц С.Л.** Автоматизация технологических процессов ферросплавного производства. М.: *Металлургия*, 1982.

6. **Mraz J.** The Interpretation of Electrical Measurements of Submerged Arc-resistance Furnace // Proc. 10 Intern. Conf. Advanced Methods in the Theory of Electrical Eng. Pilsen: University of West Bohemia, 2011. Pp. VI-5—VI-6.

7. **Machulec B.** Equilibrium Model of the Ferrosilicon Melting Process in the Submerged Arc-resistance Furnace // Ibid. Pp. VIII-3—VIII-4.

8. **Kondrashov V., Pogrebisskiy M., Salmanova E.** Development of Ways of Increase of Ore-heating Electric Furnaces for Production of Ferroalloys Efficiency // Proc. Advanced Methods of the Theory of Electrical Eng. Pilsen: University of West Bohemia, 2015. P. I-3.

9. **Кулинич В.И. и др.** Репродукция электрического режима выплавки углеродистого феррохрома по составу активному сопротивлению ванны // *Сталь*. 2006. № 7. С. 41—46.

10. **Кулинич В.И. и др.** Влияние массовых и пространственных параметров шихты на активное сопротивление ванны // *Сталь*. 1998. № 5. С. 35—40.

References

1. **Elektrooborudovanie i Avtomatika Elektrotermicheskikh Ustanovok / Pod Red. A.P. Al'tgauzena i dr.** М.: *Энергия*, 1978. (in Russian).

2. **Strunskiy V.M.** Rudnotermicheskie Plavil'nye Pechi. М.: *Металлургия*, 1972. (in Russian).

3. **Kondrashev V.P. i dr.** Opredelenie Ratsional'nyh Rezhimov Ekspluatatsii Rudnotermicheskikh Pechey. *Stal'*. 2010;2:32—38. (in Russian).

4. **Zhivilyuk I.G.** Eksperimental'noe Opredelenie Elektricheskikh Parametrov i Elektricheskogo Polya Moshchnoy Rudnotermicheskoy Pechi. *Elektrotermiya*. 1962;6:8—9. (in Russian).

5. **Stepanyants S.L.** Avtomatizatsiya Tekhnologicheskikh Protseessov Ferrosplavnogo Proizvodstva. М.: *Металлургия*, 1982. (in Russian).

6. **Mraz J.** The Interpretation of Electrical Measurements of Submerged Arc-resistance Furnace. Proc. 10 Intern. Conf. Advanced Methods in the Theory of Electrical Eng. Pilsen: University of West Bohemia, 2011:VI-5—VI-6.

7. **Machulec B.** Equilibrium Model of the Ferrosilicon Melting Process in the Submerged Arc-resistance Furnace. Ibid:VIII-3—VIII-4.

8. **Kondrashov V., Pogrebisskiy M., Salmanova E.** Development of Ways of Increase of Ore-heating Electric Furnaces for Production of Ferroalloys Efficiency. Proc. Advanced Methods of the Theory of Electrical Eng. Pilsen: University of West Bohemia, 2015:R. I-3.

9. **Kulinich V.I. i dr.** Reproduktsiya Elektricheskogo Rezhima Vyplavki Uglerodistogo Ferrohroma po Sostavlyayushchim Aktivnogo Soprotivleniya Vanny. *Stal'*. 2006;7:41—46. (in Russian).

10. **Kulinich V.I. i dr.** Vliyaniye Massovykh i Prostranstvennykh Parametrov Shihity na Aktivnoye Soprotivlenie Vanny. *Stal'*. 1998;5:35—40. (in Russian).

Сведения об авторах

Рубцов Виктор Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: rubtsovvp@mpei.ru

Колыванов Сергей Юрьевич — управляющий директор ООО «ТФЗ»

Хомяков Илья Владимирович — аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: Iliazz@rambler.ru

Information about authors

Rubtsov Viktor P. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises Dept., NRU MPEI, e-mail: rubtsovvp@mpei.ru

Kolyvanov Sergey Yu. — Managing Director of Open Company «TFP»

Khomyakov Ilya V. — Ph.D.-student of Electric Supply of Industrial Enterprises Dept., NRU MPEI, e-mail: Iliazz@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 21.02.2017