



УДК 669.71.8

Поступила 14.12.2015

РАБОТА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С ЖИДКИМ ОСТАТКОМ МЕТАЛЛА

OPERATION OF THE ELECTRIC ARC FURNACE WITH LIQUID RESIDUES METAL

А. В. СТЕБЛОВ, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: anver_Steblov@mail.ru.

A. V. STEBLOV, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: anver_Steblov@mail.ru.

Исследованиями установлено положительное влияние увеличения массы жидкого остатка (болота) в электродуговой печи ДСП-160 с 10 до 20–30 т на повышение выхода годного и снижения удельного расхода электроэнергии на 1 т жидкого металла.

Investigations have shown a positive impact of increasing the mass of the liquid residue (swamps) in an electric arc furnace EAF-160, from 10 to 20–30 tonnes on increasing of usable output and reducing the specific energy consumption per ton of liquid metal.

Ключевые слова. Электродуговая печь (ДСП), жидкий остаток «болота», выход годного, удельный расход электроэнергии на 1 т жидкого металла.

Keywords. Electric arc furnace (EAF), liquid residue «swamp», output of suitable, specific energy consumption per ton of liquid metal.

В технической литературе и отчетах по работе электродуговых сталеплавильных печей (ДСП) различных заводов приводятся данные о положительном влиянии массы жидкого остатка «болота» на энерготехнологические показатели ДСП и выгод годного [1–9]. Эти выводы основаны как на физических методах исследования и математическом моделировании процесса ведения плавки с жидким остатком, так и на статистических показателях работы электродуговых печей переменного тока различной мощности. Статистический подход имеет свои преимущества перед физическим методом выявления зависимостей между параметрами и функцией отклика. Это относительная простота использования и быстрое получение результата, точность прогнозирования и возможность использования полученных уравнений в автоматизированной системе управления. Недостатком является возможность использования полученных результатов только на конкретном производстве, где были получены данные для статистического анализа.

За последние 30 лет на металлургических предприятиях доля болота в ДСП с верхней загрузкой шихты увеличилась с 13,6 до 22%. Оптимальная масса болота для каждой конкретной печи определяется исходя из общего объема металла в плавке и геометрии ванны.

Данные по массе «болота» электродуговых плавильных печей переменного тока приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Предприятие | Емкость печи, т | Масса плавки, т | Масса болота, т | % к массе плавки |
|----------------------------------|--|-----------------|-----------------|------------------|
| ОАО «ММК», Россия | ЭДП переменного тока типа Данарк VAI FUCHS | 180 | 30 | 16,6 |
| НСМЗ, г. Ревда, Россия | VAI FUCHS EAF AC E | 120 | 15 | 12,5 |
| Gerdau Amensteel USA Джексонвилл | ДСП-100 Danieli | 100 | 18 | 18,0 |
| Nucor Jewett, Техас | Concast AG SMS Demag | 80 | 10 | 12,5 |
| | | 140 | 15 | 11,0 |
| | | 82 | 25–35 | 30–42 |

| Предприятие | Емкость печи, т | Масса плавки, т | Масса болота, т | % к массе плавки |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| ПФ ТОО Кастинг, Павлодар, Украина | ДСП-25 | 28 | 3 | 10,7 |
| ЗАО «ММЗ», Приднестровье | ДСП-120 | 110 | 10 | 10 |
| Истил, Украина | ДСП 136 | 120 | 16 | 13,3 |
| ОАО «БМЗ», Беларусь | ДСП-100 | 100 | 10–15 | 10–15 |
| ОАО «ОМК», г. Выкса, Россия | ДСП-160 | 160 | 30 | 18,75 |

Для нахождения оптимума по массе болота необходимо учитывать, что с ростом массы болота производительность ДСП снижается (в ковш сливается меньше металла). При увеличенном болоте больше накопленного тепла в печи, следовательно, выше конвективный теплообмен в жидком металле, однако происходит снижение КПД за счет преимущественно открытого горения дуг, поэтому следует учитывать и корректировать технологический режим плавки в зависимости от фактической массы жидкого остатка от предыдущей плавки. Болото от предыдущей плавки позволяет быстрее плавить шихту. Обеспечивается стабильный электрический режим, позволяющий вводить в рабочее пространство печи максимально возможный уровень активной мощности. Тепло жидкого остатка металла при завалке шихты на отдельных плавках может достигать 30% от теоретически необходимого тепла. Остатки жидкого металла позволяют при интенсивном введении кислорода за более короткое время получить быстро реагирующие шлаки для дефосфорации. Также сохраняется энергия оставшихся в печи шлаков, что способствует десульфурации. При работе с болотом более эффективно используются фурмы для продувки металла кислородом и углеродсодержащими порошками; ранний процесс шлакообразования способствует образованию жидкого и однородного шлакового покрова; активнее протекают реакции на границе шлак-металл, обеспечивая оптимальное содержание в шлаковом расплаве оксидов железа. Концентрация газов в металле снижается, сталь меньше окисляется.

В данной работе приведены результаты исследований по влиянию массы болота на выход годного ($PK_{ДСП}$) и энерготехнологические показатели работы ДСП-160 Выксунского металлургического завода. $PK_{ДСП}$ – расходный коэффициент на электродуговой печи, вычисляемый как отношение массы шихты к массе жидкого металла на выпуске из печи:

$$PK_{ДСП} = \frac{\sum_{\text{всей шихты}} t}{\text{масса металла на выпуске из ДСП, т}}$$

В соответствии с контрактом на поставку ДСП-160 фирмой Danieli рекомендуемая масса болота – 30 т, однако фактически завод работал со средней массой болота около 10 т. Металл из печи полностью сливался в среднем после 170 плавков. Масса болота фиксируется в автоматизированной системе контроля технологических параметров «СПЛАВ» как разница между массой загруженной шихты и слитой жидкой стали в сталеразливочный ковш до подачи в него ферросплавов. Также на каждой плавке осуществляется визуальный контроль глубины ванны щупом через завалочное окно печи.

На рис. 1 показано изменение $PK_{ДСП}$ от массы болота, которое построено по выборке из 9252 плавков. Каждая точка на рисунке представляет собой совокупность идентичных данных, поэтому после обработки выборки по стандартной программе в EXCEL таких плавков осталось $n = 604$. Получено корреляционное уравнение для прогнозирования $PK_{ДСП}$ в зависимости от изменения массы болота от 0 до 30 т:

$$PK_{ДСП} = 1,2337 - 0,00003X^3 + 0,0016X^2 - 0,0269X, \quad (1)$$

где X – масса болота в интервале 0–26 т.

Множественный коэффициент корреляции $R = 0,67$. Стандартная ошибка $\sigma_{\text{ош}} = 0,027$.

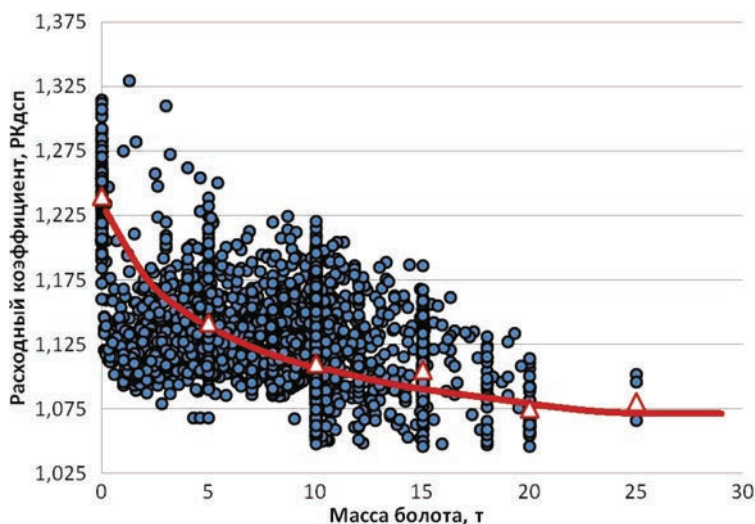


Рис. 1. Изменение $PK_{ДСП}$ в зависимости от массы «болота»

Разброс значений (среднеквадратичное отклонение) по выборке вокруг среднего значения составляет довольно большую величину $\sigma = 0,07$. Это видно и на рисунке: $PK_{ДСП} = 1,1$ присутствует и на массе болота, равной 0,1 т и при 26 т. Всего в выборке присутствовало 1724 плавки с массой болота до 5 т, в том числе 58 плавков после слива жидкого остатка полностью и ремонта подины.

В табл. 2 приведены данные (средние значения по выборке) по некоторым технологическим факторам плавки (всего исследовалось 58 факторов), статистически значимо влияющие на $PK_{ДСП}$ в интервалах изменения жидкого остатка «болото».

Таблица 2

| Параметр (среднее значение) | Масса болота, т | | | |
|--|-----------------|-------|-------|----------|
| | 0 | 5 | 15 | более 20 |
| $PK_{ДСП}$ | 1,227 | 1,12 | 1,107 | 1,088 |
| Масса болота, т | 0 | 5,7 | 10,4 | 20,4 |
| Сумма металлошихты, т | 193,3 | 175,6 | 175,1 | 175,9 |
| Масса металла на выпуске, т | 158,2 | 156,0 | 158,2 | 161,7 |
| Количество корзин | 2,8 | 2,3 | 2,3 | 2,2 |
| Суммарная длительность плавки, мин | 79,2 | 63,1 | 62,8 | 62,2 |
| Суммарная длительность плавки без простоев, мин | 57,9 | 55,4 | 55,3 | 55,1 |
| Время под током, мин | 53,4 | 41,4 | 41,4 | 41,0 |
| Длительность работы без тока, мин | 15,4 | 12,6 | 12,4 | 12,4 |
| Рафинирование, мин | 21,4 | 15,9 | 15,9 | 14,4 |
| Длительность технологических простоев, мин | 21,28 | 7,73 | 7,44 | 7,18 |
| Удельный расход электроэнергии на тонну, кВт·ч/т | 465,1 | 405,8 | 401,1 | 400,4 |
| Суммарная электроэнергия на плавку, МВт | 75,4 | 64,6 | 64,8 | 65,9 |
| Удельный расход газа, м ³ /т | 7,2 | 5,6 | 5,7 | 5,2 |
| Удельный расход графита, кг/т | 11,5 | 9,3 | 9,0 | 8,9 |
| Удельный расход кислорода O ₂ , м ³ /т | 39,3 | 35,2 | 33,6 | 31,4 |
| Удельный расход извести, кг/т | 58,3 | 51,5 | 50,1 | 46,7 |
| Удельный расход угля, кг/т | 2,8 | 1,6 | 1,03 | 1,06 |
| Последний замер С, % | 0,088 | 0,103 | 0,11 | 0,106 |
| Последний замер Р, % | 0,008 | 0,006 | 0,006 | 0,006 |
| Последний замер Оррт | 639,5 | 716,6 | 696,9 | 685,5 |
| Последний замер Сррт | 0,089 | 0,083 | 0,088 | 0,085 |
| Содержание FeO в шлаке, % | 31,3 | 33,2 | 32,2 | 33,2 |

Из таблицы видно, что худшие показатели по $PK_{ДСП} = 1,227$ и основным технологическим параметрам относятся к плавкам без болота.

В процессе работы статистически подтверждена гипотеза по влиянию массы болота на энергетические показатели работы ДСП и, как следствие, на $PK_{ДСП}$. Вопреки мнению о снижении производительности печи при увеличении массы жидкого остатка на плавках с увеличенным болотом ≥ 20 т масса слитого металла увеличилась в среднем на 2,5 т.

Полученное выражение позволяет сделать прогнозный расчет выхода годного ($PK_{ДСП}$) по жидкой стали, слитой из ДСП:

$$PK_{ДСП} = X_0 + X_1 + X_2 - X_3 - X_4 - X_5 + X_6 + X_7 + X_8 - X_9. \quad (2)$$

Ниже приведены коэффициенты регрессии для членов уравнения, по которому выполняется расчет.

| Номер фактора | Параметры | Коэффициенты | Стандартная ошибка |
|---------------|--|--------------|--------------------|
| X_0 | Свободный член | 0,95 | 0,0048 |
| X_1 | Количество корзин | +0,0027 | 0,0007 |
| X_2 | Удельный расход O ₂ , м ³ /т | +0,0033 | 0,00008 |
| X_3 | Лом 2АШ, шредированный лом, т | -0,00018 | 0,00002 |
| X_4 | Масса болота, т | -0,0021 | 0,000098 |
| X_5 | $\Sigma_{\text{чугун}}$, т | -0,0008 | 0,00007 |
| X_6 | Длительность простоев, мин | +0,0002 | 0,00005 |
| X_7 | $\Sigma_{\text{время под током}}$, мин | +0,002 | 0,00011 |
| X_8 | Удельный расход графита, кг/т | +0,0015 | 0,00016 |
| X_9 | Последний замер $C_{\text{ррт}}$ | -0,037 | 0,0094 |

$$R = 0,82, \sigma_{\text{оцн}} = 0,022$$

В табл. 3 даны расчетные значения $PK_{ДСП}$ для различных вариантов распределения факторов X_1-X_9 действующей технологии: параметры на минимальном, среднем и максимальном уровнях. Для обеспечения достоверности статистических выводов рассматривали однородные совокупности данных, объединенных в генеральную совокупность из выборок со статистически равными по средним значениям и дисперсиям исследуемых факторов. Для получения уравнения (2) были использованы данные плавки с однородной по составу шихтой в завалке и технологией выплавки. Тем не менее, установлено, что при всех равных условиях на плавках с минимальным жидким остатком или его отсутствие усредненное значение загружаемых корзин по выборке данных возрастает. Также на этих плавках увеличиваются общая длительность плавки, удельные расходы потребления электроэнергии и вводимых энергетических составляющих в виде углерода, кислорода и газа.

Таблица 3

| Номер фактора | Параметры | Значение параметра технологии | | | |
|--|--|-------------------------------|---------|--------------|-------------|
| | | минимальное | среднее | максимальное | оптимальное |
| + X_1 | Количество корзин | 2 | 2,31 | 4 | 2 |
| + X_2 | Удельный расход O_2 , м ³ /т | 31,8 | 34,1 | 35,9 | 35 |
| - X_3 | Лом 2АШ, т | 0 | 21,7 | 91 | 60 |
| - X_4 | Масса болота, т | 0 | 9,12 | 33,5 | 25 |
| - X_5 | $\Sigma_{\text{чугуна}}$, т | 0 | 20,1 | 41,2 | 20 |
| + X_6 | Длительность простоев, мин | 0 | 7,7 | 29,6 | 0 |
| + X_7 | $\Sigma_{\text{длительность под током}}$, мин | 32,2 | 41,5 | 61,2 | 36 |
| + X_8 | Удельный расход графита, кг/т | 4,2 | 9,1 | 20,2 | 10 |
| - X_9 | Последний замер S_{ppm} | 0 | 0,09 | 0,8 | 0,12 |
| Значение расчетного $PK_{ДСП}$ при выбранных параметрах технологии | | | | | |
| | $PK_{ДСП}$ | 1,045 | 1,113 | 1,329 | 1,063 |

Оптимальное значение $PK_{ДСП} = 1,063$ соответствует средним значениям статистически значимо влияющих факторов при количестве завалочных корзин 2, массе «болота» 25 т, несколько повышенных расходах кислорода (35,0 м³/т), графита (10 кг/т), длительности работы печи под током 36 мин, длительности простоев 0 мин.

Наряду с полученными уравнениями для расчета $PK_{ДСП}$ были установлены зависимости влияния массы болота на энерготехнологические параметры плавки: удельный расход электроэнергии на 1 т и длительность работы ДСП под током (рис. 2).

В исследуемую базу данных включены плавки, назначаемые на стали марок 09Г2С-2, 22ГЮ-7, 17Г1С, 2пс. Количество плавки после отсева ошибочных измерений составило $n = 2641$.

Из рисунка видно, что масса болота более 15 т существенно влияет на исследуемые факторы. На плавках с болотом около 20 т эти показатели снижены в среднем на 15% в сравнении при загрузке шихты на сухую подину. Технологические параметры выплавки полупродукта в ДСП-160 приведены в табл. 4.

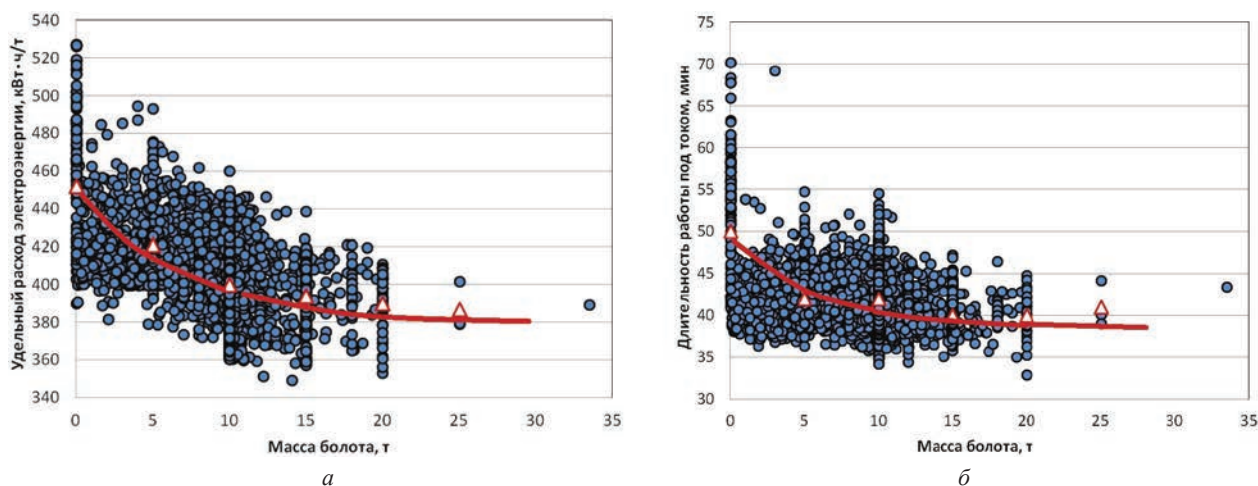


Рис. 2. Влияние массы жидкого остатка в печи «болото» на удельный расход электроэнергии (а) и длительность работы под током (б)

Таблица 4

| Фактор | Параметр технологии | Среднее | Максимум | Минимум |
|--------|--|---------|----------|---------|
| Y | Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т | 404,71 | 527,4 | 349,3 |
| $+X_1$ | Σ масса металлошихты, т | 175,62 | 209,9 | 148,2 |
| $-X_2$ | Масса болота, т | 9,26 | 33,5 | 0 |
| $+X_3$ | Σ длительность работы под током, МИН | 41,72 | 70,2 | 32,9 |
| $+X_4$ | Рафинирование, мин | 16,23 | 35,9 | 7,8 |
| $+X_5$ | Σ длительность плавки без простоев, МИН | 55,45 | 76 | 52,1 |
| $+X_6$ | Σ длительность простоев, МИН | 7,88 | 29,5 | 0 |
| $+X_7$ | Удельный расход извести, кг/т | 51,29 | 93,6 | 35,1 |

Было получено регрессионное уравнение для расчета суммарного количества электроэнергии на плавку:

$$Y(\text{кВт}\cdot\text{ч/т}) = 145,06 + 20,92X_1 - 1,83X_2 + 1,31X_3 + 0,3X_4 + 0,033X_5 + 0,216X_6 + 0,7X_7, \quad (3)$$

$$R = 0,79, \sigma_{\text{ош}} = 15,9, n = 6204.$$

В табл. 5 приведены расчетные значения удельного расхода электроэнергии на 1 т по уравнению (3) в зависимости от вариантов распределения значимых параметров: все факторы на среднем уровне; все факторы имеют максимальные значения; все факторы имеют минимальные значения.

Таблица 5

| Варианты | Y , кВт·ч/т | $+X_1$, т | $-X_2$, т | $+X_3$, мин | $+X_4$, мин | $+X_5$, мин | $+X_6$, мин | $+X_7$, кг/т |
|----------|---------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Среднее | 404,7 | 175,6 | 9,26 | 41,7 | 16,23 | 55,45 | 7,88 | 51,3 |
| Оптимум | 371,2 | 195 | 30 | 37 | 15 | 50 | 3 | 45 |

Анализ уравнения (3) показывает, что расчетное значение $Y(\Sigma\text{кВт}\cdot\text{ч/т})$ при оптимальных параметрах ниже на 33,5 кВт·ч/т в сравнении с распределением параметров на среднем уровне.

В данном уравнении максимальное влияние среди исследуемых факторов имеет масса шихты. Влияние массы всей шихты X_1 на искомую функцию составляет 6%. Другие факторы оказывают меньшее влияние. Например, влияние болота составляет 4% на каждые 10 т шихты. В целом в зависимости от технологии расход электроэнергии можно существенно снизить не менее чем на 30%. В уравнение не включены кислород, уголь, газ, которые снижают потребление электроэнергии на 1 т металла, но в данной выборке они имеют не высокую статистическую значимость.

По удельному расходу электроэнергии $X(\text{кВт}\cdot\text{ч/т})$ можно рассчитать суммарное количество поданной электроэнергии на плавку $Y(\Sigma\text{МВт})$:

$$Y(\Sigma\text{МВт}) = 0,175X(\text{кВт}\cdot\text{ч/т}) - 4,623, R = 0,92, \sigma_{\text{ош}} = 10,4. \quad (4)$$

Таким образом, среднему значению удельного расхода электроэнергии на 1 т жидкой стали 404,7 кВт·ч/т соответствует суммарное значение мощности электроэнергии на всю плавку 66,20 МВт.

Используя результаты исследований, ОАО «ОМК» во втором полугодии 2015 г. увеличил массу болота до 20 т и более, что положительно сказалось на экономических показателях работы цеха и снижении фосфора в металле на сливе в ковш. Если на плавках с болотом до 5 т содержание фосфора было в конце плавки 0,0066%, то на плавках с болотом более 20 т он снижается до 0,0058%. Содержание P_2O_5 в шлаке не изменилось и составляет 0,522%.

В данной статье не приводятся подробные сведения по влиянию энерготехнологических режимов на окисленность шлака FeO и $PK_{\text{ДСП}}$. Следует отметить, что изменение заводской технологии коснулось не только увеличения массы болота (M_B) в среднем от 9,3 до 22,4 т, но также уменьшен объем подаваемого в печь кислорода в среднем с 47,6 до 34,12 м³/т. Это привело к снижению FeO в шлаке в среднем с 37,7 до 27,4%, соответственно снизился и расходный коэффициент на плавку.

Получено уравнение, позволяющее рассчитать влияние массы болота и FeO на $PK_{\text{ДСП}}$:

$$PK_{\text{ДСП}} = 1,09 - 0,004(M_B) + 0,002 FeO, R = 0,92, \sigma_{\text{ош}} = 10,4. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что увеличение массы болота (M_B) с 9,12 до 22,4 т в среднем за период исследования и снижение FeO в шлаке на 10% уменьшает расчетное $PK_{\text{ДСП}}$ с 1,128 до 1,0552, что дает экономию шихты 6,4 кг/т.

Выводы

Проведенные статистические исследования данных по 58 технологическим факторам выплавки жидкого полупродукта в ДСП-160 ОАО «ОМК» свидетельствуют о положительном влиянии увеличения массы болота (жидкого остатка) в печи. В среднем увеличение от 9,12 до 22,4 т снизило расходный коэффициент при выплавке с 1,113 до 1,063, удельный расход электроэнергии на 1 т жидкой стали снизился с 404,7 до 371,2 кВт·ч/т, длительность работы печи под током уменьшилась с 41,7 до 37 мин.

Литература

1. Adams W., Alameddine S., Bowman B., Lugo N., Palge S., Stafford P. Total energy consumption in arc furnaces // *MPT Int.* 2002. Vol. 25. no. 6. pp. 44–46. 48–50 (англ.).
2. Опферман А., Гроссе А., Баумгартнер С., Райдингер Д. Повышение эффективности использования энергии // *Черные металлы.* 2010. Февраль. С. 57–62.
3. Гудим Ю. А., Зинуров И. Ю., Киселев А. Д., Шумаков А. М. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах // *Электрометаллургия.* 2005. № 9. С. 2–6.
4. Козырев Н. А., Годик Л. А., Дементьев В. П., Обшаров М. В., Шуклин А. В. Отработка технологии выплавки «на болоте» рельсовой стали в дуговых электропечах // *Черная металлургия.* 2003. № 10. С. 45–47.
5. Кривченко Ю. С., Малик А. А., Уголков В. А., Попов В. П. Строительство литейно-прокатного комплекса ООО «ОМК-Сталь» в Выксе. Сталеплавильное производство // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2009. № 1. С. 12–20.
6. Страшнов М. М., Кац Я. Л. Методика расчета оптимальных параметров работы в ДСП-60 для снижения расхода электроэнергии и увеличения выхода годного // *Черные металлы.* 2006. Сентябрь. С. 21–25.
7. Белковский А. Г., Краснянский М. В., Кац Я. Л. Повышение эффективности производства стали на электрометаллургических заводах малой производительности // *Бюлл. Черная металлургия.* 2015. № 2. С. 40–48.
8. Белковский А. Г., Кац Я. Л., Сивак Б. А., Пасечник Н. В. Будущее дуговых сталеплавильных печей в специализации их конструкции // *Черные металлы.* 2013. Март. С. 14–19.
9. Храпко С. А., Старосоцкий А. В., Зайцев М. В., Онищук С. В., Тищенко И. П. Расчет температуры металла в дуговой печи с учетом массы «болота» // *Системные технологии.* 2010. № 2(67). С. 81–87.

References

1. Adams W., Alameddine S., Bowman B., Lugo N., Palge S., Stafford P. Total energy consumption in arc furnaces. *MRT Int.* 2002. Vol. 25, no. 6. 44–46, 48–50 pp. (ingl.).
2. Opferman A., Grosse A., Baumgartner S., Raidinger D. Povyshenie effektivnosti ispolzovaniy energii [Improving the efficiency of energy use]. *Chernie metally = Ferrous metals*, 2010. February, pp. 57–62.
3. Gudim Y., Zinurov I., Kiselyov A., Shumakov A. Razionalnie sposoby intesificasii plavki v sovremennyh dugovyih staleplavilnih pechah [Rational ways of intensification of melting in modern electric arc furnaces]. *Electrometallurgiya = Electrometallurgy*, 2005, no. 9, pp. 2–6.
4. Kozыrev N., Godik L., Dement'ev V. Otrabotka technologii vyplavki «na bolote» relsovoj stali v dugovyih pechah [Testing technology of smelting «the swamp» of rail steel in electric arc furnaces]. *Chernaya metallurgiya = Ferrous Metallurgy*, 2003, no. 10, pp. 45–47.
5. Krivchenko Y., Malik A., Ugolkov V., Popov V. Stroitelstvo litejno-prokatnogo kompleksa ООО «ОМК-СТАЛЬ» v Vyксе [Construction foundry-rolling complex LLC «ОМК-Steel» Vyкса. Steelmaking]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' = Metallurgical and mining industry*, 2009, no. 1, pp. 12–20.
6. Strashnov M., Katz Y. Metodika pascheta optimalnyh parametrov raboty v DSP-60 dlya snizheniy rashoda elektroenergii i uvelicheniy vyhoda godnogo [The methodology for calculating the optimal parameters of the DSP-60 in order to reduce power consumption and increase the yield of usable]. *Chernie metally = Ferrous metals*. September, 2006, pp. 21–25.
7. Belkovsky A., Krasnyansky M., Katz Y. Povyshenie effektivnosti proizvodstva stali na elektrometallurgicheskikh zavodah maloy proizvoditelnosti [Increasing the efficiency of production of steel on steel plant with low productivity]. *Chernie metallurgiya = Ferrous metallurgy*, 2015, no. 2, pp. 40–48.
8. Belkovsky A., Katz J., Sivak B., Paseshnik N. Budushee dugovyih staleplavilnyh pechey v spetsializatsii ih konstruksii [The future of electric arc pechey- specialization in their design]. *Chernie metally = Ferrous metals*, march, 2013, pp. 14–19.
9. Храпко S., Starosotsky A., Zaitsev M., Onischuk S., Tishchenko I. Raschet temperature metalla v dugovoy pechi s uchedom massy «bolota» [Calculation of metal temperature in arc furnaces taking into account the mass of «Swamp»]. *Sistemnye tehnologii = System technologies*, 2010, no. 2 (67), pp. 81–87.