ВЫПЛАВКА ФЕРРОСИЛИЦИЯ С ПОЗИЦИИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ РАБОТЫ ФЕРРОСПЛАВНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

*А. П. ШКИРМОНТОВ, канд. техн. наук, aps-panor@yandex.ru
(ИД “Панорама”, Россия, г. Москва)*

Аннотация. Для оценки эффективности работы ферросплавной электропечи предложен энерготехнологический критерий. Его физический смысл состоит в том, что он определяет долю энергии от источника тока, а именно ее полезную часть, пошедшую на рудовосстановительный углеродотермический процесс получения ферросплава (ферросилиция, феррохрома, ферромарганца), с учетом тепловых потерь и степени извлечения ведущего элемента в сплав.

Представлены результаты анализа параметров выплавки ферросплавов в электропечах углеродотермическим процессом с использованием энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи на примере получения различных марок ферросилиция. Показано, что с увеличением значений энерготехнологического критерия ферросплавной печи снижается удельный расход электроэнергии на 1 баз. т сплава. Для электропечей средней мощности, которые выплавляют 75 %-ный ферросилиций, значения энерготехнологического критерия ферросплавной печи соответствуют диапазону от 0,300 до 0,314. При этом удельный расход электроэнергии составляет от 9,0 до 8,6 МВт·ч/т сплава. Удовлетворительным, но менее эффективным вариантом работы печи является диапазон значений энерготехнологического критерия от 0,272 до 0,293, при котором удельный расход электроэнергии изменяется от 9,8 до 9,2 МВт·ч/т сплава. Такая комплексная величина, как энерготехнологический критерий, может рассматриваться как основной элемент энергетического и технологического аудита ферросплавного печного агрегата, а также использоваться для выявления эффективных режимов работы печей, анализа применения различных видов шихтовых материалов (рудного сырья, углеродистых восстановителей) и инновационных технологий выплавки.

Ключевые слова: ферросплавное производство; ферросплавная электропечь; углеродотермический процесс; извлечение кремния; тепловой КПД; активная мощность; энергетический и технологический аудит.

Ссылка для цитирования. Шкирмонтов А.П. Выплавка ферросилиция с позиции энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 8. С. 43–49.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-43-49

По объемам производства кремнистые ферросплавы занимают первое место в России. В основном, несмотря на широкий сортамент ферросилиция марок ФС20–ФС90, значительную долю объемов выплавки в электропечах составляют сплавы ФС45–ФС75. Ферросилиций ФС75 наиболее востребован не только для внутреннего рынка потребления, но и для экспортных операций.

Для выплавки ферросилиция применяют шихтовые материалы из отечественного сырья. Углеродотермический процесс выплавки в электропечах является весьма материалоемким и энергоемким. В зависимости от выплавляемого сплава удельный расход основных компонентов кусковой шихты составляет: кварцита — от 950–1050 до 2250 кг/т, углеродистого восстановителя (коксик, полукокс, уголь и др.) — от 440–490 до 980 кг/т и более. Соответственно, удельный рас-

ход электроэнергии на выплавку ферросилиция ФС45–ФС75 находится в пределах от 4650–4900 до 8600–9000 кВт·ч/т и более, что почти в 10–20 раз выше, чем при выплавке 1 т стали в дуговой печи. Структура затрат на выплавку 1 т ферросилиция следующая: рудное сырье — 5–15 %, электроэнергия — 43–55 %, углеродистый восстановитель — 20–25 % и остальное — прочие затраты.

Теоретический расход энергии на основе химических реакций в расчете на получение 1 т сплава, по данным работы [1], составляет: для 45 %-ного ферросилиция — 2520 кВт·ч/т и для 75 %-ного ферросилиция — 4210 кВт·ч/т. Фактические удельные расходы электроэнергии на выплавку ферросилиция углеродотермическим процессом в низкошахтной электропечи практически в 2 раза выше.

Энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи

Рассмотрим углеродотермический процесс выплавки ферросилиция с позиции энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи [2, 3] в соответствии со следующим выражением:

$$Sh = K_{\text{ит}} \cos \varphi \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{т}} \eta_{\text{изв}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ит}}$ — коэффициент загрузки трансформатора; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности печи; $\eta_{\text{эл}}$ — электрический КПД; $\eta_{\text{т}}$ — тепловой КПД; $\eta_{\text{изв}}$ — извлечение ведущего элемента в сплав.

Физический смысл энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи состоит в том, что он определяет долю энергии от источника тока, а именно ее полезную часть, пошедшую на рудовосстановительный углеродотермический процесс получения ферросплава (ферросилиция, феррохрома, ферромарганца), с учетом тепловых потерь и степени извлечения ведущего элемента в сплав.

Степень восстановления ведущего элемента и переход его в сплав являются основной технологической величиной углеродотермического процесса получения ферросплавов. Данный па-

раметр определяет эффективность технологии выплавки из определенного металлургического сырья (рудных материалов, углеродистых восстановителей, восстановителей-разрыхлителей). Одним из основных факторов, которые влияют на степень извлечения, является максимально возможное содержание ведущего элемента в шихте электропечи при минимальном содержании вредных примесей.

При выплавке ферросилиция и кремния основным сырьем для производства в электропечах является кварцит крупностью 20–80 мм в зависимости от мощности печи и диаметра электродов. Кварциты должны содержать не менее 96–98 % SiO_2 и не более 1,5 % Al_2O_3 , для этого их подвергают дроблению, промывке и сортировке. Другой источник поступления кремния в сплав — это углеродистые восстановители и самообжигающиеся электроды в виде золы, которая образуется в процессе выплавки. Извлечение кремния в сплав для выплавки основных марок ферросилиция достаточно высоко: от 92–98 % до 75–85 % для высококремнистых сплавов.

Извлечение кремния

На основании данных работ по исследованию параметров выплавки ферросилиция марок ФС20–ФС65 [4–6] в печах с мощностью трансформатора 22,5 МВА рассмотрен комплекс па-

раметров с позиции изменения извлечения кремния в сплав. Параметры выплавки с учетом энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫПЛАВКИ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК ФЕРРОСИЛИЦИЯ, СТЕПЕНИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КРЕМНИЯ И ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ РАБОТЫ ФЕРРОСПЛАВНОЙ ПЕЧИ

TABLE 1. VARIATION OF SMELTING PARAMETERS OF DIFFERENT FERROSILICUM GRADES, SILICUM EXTRACTION DEGREE AND ENERGY AND TECHNOLOGICAL CRITERIA OF FERROALLOY FURNACE OPERATION

Параметр	Марка ферросилиция			
	ФС20	ФС25	ФС45	ФС65
Используемая мощность, МВА	21,5	20,1	21,8	20,8
Полезная мощность, МВт	16,1	16,5	17,2	15,4
Диаметр электродов, мм	1200	1200	1200	1200
Сила тока электрода, кА	62,5	60,8	66,9	62,9
Коэффициент мощности	0,825	0,876	0,804	0,827
Электрический КПД	0,904	0,930	0,924	0,950
Коэффициент загрузки трансформатора	0,956	0,893	0,969	0,924
Базовое содержание Si в сплаве, %	20,0	25,0	45,0	65,0
Расход шихты на 1 баз. т, кг:				
кварцита	370	552	1015	1930
коксика	200	280	438	845
железной стружки	810	780	558	250
Извлечение Si в сплав	0,943	0,985	0,979	0,921
Тепловой КПД	0,474	0,467	0,472	0,461
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	2185	2750	4880	7410
Энерготехнологический критерий	0,3380	0,3347	0,3326	0,3290

Из данных табл. 1 следует, что при выплавке ферросилиция марок ФС20–ФС65 на практически близких и сопоставимых режимах работы печи наблюдается некоторое снижение степени извлечения ведущего элемента в сплав с увеличением содержания кремния в ферросилиции. Данное обстоятельство приводит к снижению энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи.

В соответствии с литературными данными можно отметить, что выплавка высококремнистых марок ферросилиция сопровождается нестабильными значениями извлечения ведущего элемента в сплав. К тому же имеется тенденция снижения степени извлечения ведущего элемента с повышением содержания кремния в сплаве.

Выплавка ферросилиция в электропечах, так же как и выплавка технического кремния, относится к бесшлаковым процессам, так как количество образующегося шлака составляет не более 3–5 % от массы сплава. Поэтому считается, что основное распределение ведущего элемента в процессе восстановления происходит в сплав и газовую фазу. Теоретическая температура начала восстановления кремнезема углеродом достаточно высока — 1942 К. Введение в шихту железа выводит кремний из реакционной зоны в продукт выплавки и облегчает процесс восстановления и получения ферросилиция. Температура сплава составляет около 1650–1750 °С на выпуске из печи. При нормальном ходе печи температура отходящих газов около 500–700 °С. При нарушении хода печи и небольшом заглублении электродов в шихту температура газов может достигать 1000–1200 °С. Поэтому значительное количество кремния теряется с отходящими газами в виде оксида SiO, который образуется в процессе восстановления кремнезема по следующей схеме:

В результате извлечение кремния в сплав снижается, что дополнительно увеличивает удельный расход электроэнергии на выплавку 1 баз. т сплава и ухудшает технико-экономические показатели работы печи.

В работе [7] проведен анализ технологии выплавки ферросилиция марок ФС20–ФС90 и технического кремния в 34 рудовосстановительных электропечах углеродотермическим процессом. В результате обобщения и статистической обработки получена зависимость извлечения кремния от его содержания в продукте выплавки:

$$\eta_{\text{Si}} = -0,0062[\text{Si}]^2 + 0,392[\text{Si}] + 91,09, \quad (2)$$

где η_{Si} — извлечение кремния в сплав; $[\text{Si}]$ — содержание кремния в сплаве, %.

С увеличением содержания кремния в сплаве степень извлечения кремния снижается, вследствие повышенного улета кремния в виде SiO_г с отходящими газами (рис. 1). Полученные результаты более полно подтверждают энерготехнологические параметры табл. 1. Степень извлечения ведущего элемента в сплав снижается с повышением содержания кремния. При этом учитывались статьи поступления кремния из кварцита, золы электродов, золы различных видов углеродистых восстановителей, а также золы восстановителей-разрыхлителей. Как видно из рис. 1, значительное снижение извлечения кремния начинается после 65–70 % Si из-за большого улета SiO_г с отходящими газами. Снижение извлечения кремния с увеличением его содержания в сплаве в конечном итоге уменьшает энерготехнологический критерий работы электропечи.

Рис. 1. Изменение степени извлечения кремния при выплавке на кусковой шихте различных марок ферросилиция и кремния углеродотермическим процессом для 34 электропечей (коэффициент корреляции $R = 0,902$)

Fig. 1. Variation of silicium extraction degree during smelting of ferrosilicium different grades and silicium with lump mixture by a carbon-thermal method for 34 electric furnaces (correlation coefficient $R = 0,902$)

Например, как показали расчеты в работе [7], при переводе электропечи мощностью 16,5 МВА при выплавке ферросилиция ФС45 на марку ФС75 энерготехнологический критерий печи снижается с 0,3109 до 0,2770. При мощности печи 29 МВА и аналогичном переводе печей на более высококремнистый ферросилиций ФС75 энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи снижается с 0,2706 до 0,2411

(–11 %). Это происходит вследствие ухудшения не только степени извлечения кремния, но и энергетических параметров выплавки, таких как коэффициент мощности и электрический КПД. Поэтому величины энерготехнологического критерия работы печи мощностью 29 МВА снижаются по сравнению с данным параметром для типовой печи мощностью 16,5 МВА, как при выплавке ферросилиция ФС45, так и при выплавке ФС75.

В еще более сложных условиях работают печи такой же мощности при выплавке кремния технической чистоты аналогичным углеродотермическим процессом. Извлечение кремния на кусковой шихте невысокое — в среднем около 70 %. В некоторых особых технологических вариантах выплавки при использовании комплексной шихты и специальных восстановителей возможно извлечение кремния до 84–86 %. При мощности печи 16,5 МВА энерготехнологический критерий работы печи обычно не превышает уровня 0,2122. Однако на практике в этих печах стараются работать с более глубокой посадкой

электродов в шихту для повышения теплового КПД из-за высокой энергоемкости процесса восстановления кремния. Как следствие, при выплавке рабочее напряжение невысокое и, соответственно, активная мощность печи составляет не более 10,3–11,6 МВт для мощности трансформатора 16,5 МВА. Поэтому энерготехнологический критерий работы печи при выплавке кремния в трехфазных печах очень невысокий и составляет 0,1876–0,2096. Сравнивая работу печей мощностью 16,5 МВА, выплавляющих ферро-силиций типовой марки ФС45 и технический кремний, можно отметить, что величины энерготехнологического критерия работы печи различаются весьма значительно (0,3109 для ФС45 и 0,1876–0,2096 для кремния). Соответственно, печь с низкой величиной энерготехнологического критерия работает более энергозатратным процессом, что соответствует высокому удельному расходу электроэнергии от 12,6–13,1 до 14–16 МВт·ч/т кремния против 4,7–4,9 МВт·ч/т ферросилиция марки ФС45.

Тепловой КПД ферросплавной печи

При выплавке ферросилиция тепловой КПД ферросплавной печи, как было показано в работах [8, 9], в основном находится в пределах 0,40–0,50. Данный параметр является наименьшей величиной среди составляющих энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи. При оптимальном рабочем напряжении и посадке электродов в шихту неплохая работа ванны печи характеризуется тепловым КПД в диапазоне 0,45–0,48 и более. При выплавке 75 %-ного ферросилиция зависимость энерготехнологического критерия печи от теплового КПД приведена на рис. 2.

Ухудшение тепловой работы ванны ферросплавной печи отрицательно влияет на энерготехнологический критерий. В связи с тем, что величины теплового КПД не очень высоки, как другие электроэнергетические параметры, данная величина оказывает значительное влияние как на удельный расход электроэнергии, так и на производительность печного агрегата.

Некоторому увеличению теплового КПД способствует достаточный и высокий уровень колошника, глубокая посадка электродов в шихту и оптимальное положение рабочего конца электрода относительно подины печи. В большинстве случаев данное расстояние находится в диапазоне 0,6–0,9 диаметра электрода печи и определяется величиной распада электродов, что подробно проанализировано в работе [10].

Это необходимо для оптимального токораспределения в ванне печи, которое выражается как соотношение минимального удельного расхода электроэнергии на 1 баз. т сплава и максимальной производительности печного агрегата.

Рис. 2. Зависимость энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи от теплового КПД при выплавке 75 %-ного ферросилиция для 37 электропечей (коэффициент корреляции $R = 0,831$)

Fig. 2. Variation of energy and technological criteria of ferroalloy furnace operation on heat efficiency coefficient during smelting 75 % ferrosilicium for 37 electric furnaces (correlation coefficient $R = 0,831$)

Удельный расход электроэнергии

Тепловой КПД ферросплавной печи при выплавке с закрытой дугой является весьма значимым параметром ввиду его наименьшего значения (см. табл. 1). Среди других составляющих величин в системе энерготехнологического критерия тепловой КПД в 1,5–2 раза меньше, чем такие величины, как извлечение ведущего элемента в сплав, коэффициент мощности, электрический КПД и коэффициент загрузки трансформатора. Поэтому тепловой КПД в значительной мере влияет на удельный расход электроэнергии при выплавке ферросплавов. Взаимосвязь энерготехнологического критерия работы печи и удельного расхода электроэнергии при выплавке 75 %-ного ферросилиция рассмотрена в работе [11] и представлена на рис. 3.

Показано, что снижение удельного расхода электроэнергии соответствует повышению энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи. Для печей средней мощности хороший уровень работы соответствует диапазону значений энерготехнологического критерия: $0,300 < Sh < 0,314$, при котором удельный расход электроэнергии составляет от 9,0 до 8,6 МВт·ч/т сплава. Удовлетворительному, но менее эффективному варианту работы печи соответствует диапазон значений энерготехнологического критерия $0,272 < Sh < 0,293$, при котором удельный расход электроэнергии составляет от 9,8 до 9,2 МВт·ч/т сплава.

При выплавке ферросилиция ФС75 с целью дальнейшего снижения удельного расхода электроэнергии менее 8,6 МВт·ч/т и увеличения энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи $Sh > 0,314$ возможно применение различных видов комбинированных углеродистых восстановителей.

Перспективными восстановителями могут быть полукокс, бурые угли, а также другие материалы, в том числе отходы, которые содержат карбид кремния. Разработка новых технологий выплавки на окомкованной или брикетированной шихте, предварительная сушка и подогрев шихты способствуют снижению удельного расхода электроэнергии. К тому же большое значение имеют подготовка шихты перед плавкой, квалификация персонала, оптимальный элек-

трический режим, сокращение времени простоев электропечи и другие факторы.

Следовательно, при выплавке ферросилиция повышение величины энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи соответствует снижению удельного расхода электроэнергии. При ухудшении работы ферросплавного агрегата отмечены снижение величины энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи и рост удельного расхода электроэнергии.

Рис. 3. Изменение энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи при различных величинах удельного расхода электроэнергии для 27 отечественных и зарубежных печей мощностью 10–49,5 МВА при выплавке 75 %-ного ферросилиция (коэффициент корреляции $R = 0,825$)

Fig. 3. Variation of energy and technological criteria of ferroalloy furnace operation at different specific electric energy consumption values for 27 domestic and foreign furnaces with power of 10–49.5 MVA during smelting of 75% ferrosilicium (correlation coefficient $R = 0,825$)

С этих позиций такая комплексная величина, как энерготехнологический критерий, может рассматриваться как основной элемент энергетического и технологического аудита ферросплавного печного агрегата, а также для выявления эффективных режимов работы, применения различных видов шихтовых материалов (рудного сырья, углеродистых восстановителей) и инновационных технологий выплавки.

Выводы

С позиции энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи рассмотрено влияние на углеродотермический процесс выплавки ферросилиция комплекса параметров, который включает: извлечение ведущего элемента в сплав, тепловой КПД печи, а также энергетические параметры.

Проанализированы факторы, влияющие на извлечение ведущего элемента в сплав, при получении различных марок ферросилиция углеродотермическим процессом. Показано, что с увеличением содержания кремния в сплаве снижается извлечение ведущего элемента. Также наиболее значительное влияние на удельный расход электро-

энергии при выплавке имеет тепловой КПД низкошахтной ферросплавной электропечи.

Анализ комплекса параметров выплавки ферросилиция показал, что величина энерготехнологического критерия работы ферросплавной

печи возрастает при снижении удельного расхода электроэнергии на 1 баз. т сплава и, наоборот, комплексная величина снижается при увеличении удельного расхода электроэнергии и ухудшении работы печного агрегата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щедровицкий Я.С. Высокремнистые ферросплавы. — Свердловск: Metallurgizdat, 1961. — 256 с.
2. Шкирмونت А.П. Определение комплекса параметров для получения энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи // Главный энергетик. 2010. № 5. С. 44–50.
3. Шкирмونت А.П. Анализ энерготехнологических параметров работы ферросплавной электропечи при выплавке ферросилиция // Главный энергетик. 2015. № 11–12. С. 21–24.
4. Емлин Б.И., Гасик М.И. Справочник по электротермическим процессам. — М.: Metallurgia, 1978. — 288 с.
5. Дашевский В.Я. Ферросплавы: теория и технология. — М.: Издательский дом МИСиС, 2014. — 362 с.
6. Толстогузов Н.В., Елкин К.С., Толстогузов В.Н. Исследование расхода углерода при плавке сплавов кремния // Сталь. 1995. № 10. С. 40–42.
7. Шкирмونت А.П. Влияние извлечения ведущего элемента в сплав на энерготехнологический критерий работы печи при выплавке ферросилиция и кремния // Шестая Междунар. конф. “Metallurgia-Intekhko-2013” (26–27 марта 2013 г.): сборник докладов. — М.: Интехко, 2013. С. 69–71.
8. Егоров А.В. Электрометаллургия стали и спецэлектрометаллургия. Электроплавильные печи черной металлургии. — М.: МИСиС, 2007. — 428 с.
9. Чернышов Е.А. Специальные плавильные печи. Ч. 1. Электродуговые печи. — Нижний Новгород: НГТУ, 2014. — 253 с.
10. Шкирмونت А.П. Роль подэлектродного промежутка в ферросплавной печи в улучшении энерготехнологических параметров выплавки углеродотермическим процессом // Электрометаллургия. 2017. № 6. С. 24–31.
11. Шкирмونت А.П. Тепловой КПД, удельный расход электроэнергии и энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XV Междунар. науч. конф. (24–27 сентября 2013 г.). Часть 2. — Челябинск: ЮУрГУ, 2013. С. 210–213.

SMELTING OF FERROSILICUM FROM THE POSITION OF ENERGY AND TECHNOLOGY CRITERIA OF FERROALLOYS ELECTRIC ARC FURNACE OPERATION

A. P. SHKIRMONTOV, PhD (Tech), aps-panor@yandex.ru
(ID “Panorama”, Russia, Moscow)

Abstract. For estimation of ferroalloy-producing electric arc furnace operation efficiency an energy and technology criteria proposed. Its physical meaning is as follows: it determines a share of energy from the current source, in particular its useful part, spent by ore reduction carbon-thermal process of a ferroalloy production (ferrosilicium, ferrochrome, ferromanganese), taking into account heat losses and degree of extraction of the leading element into the alloy.

Results of an analysis of ferroalloys smelting parameters in electric arc furnaces via carbon-thermal process by example of smelting FeSi using energy and technology criteria of ferroalloys furnace operation presented. It was shown, that while increasing values of energy and technology criteria, the specific consumption of electric power per one basic tonne of the alloy is reducing. For mid power electric furnaces that melted 75% FeSi, the energy and technology criteria of ferroalloys furnace operation corresponds to a range from 0.300 to 0.314. At the same time, the specific electric power consumption is from 9.0 to 8.6 MW·h/t of the alloy. A satisfactory, but less efficient version of the furnace operation is the range of energy and technology criteria from 0.272 to 0.293 and specific electricity consumption of electric power varies from 9.8 to 9.2 MW·h/t of alloy. Such a complex value can be considered as the main element of the energy and technological audit of the ferroalloy furnace facility, as well as to identify effective operating modes, analysis of usage of various types of charge materials (ore raw materials, carbonaceous reductants) and the application of innovative melting technologies.

Key words: ferroalloys production; ferroalloy-producing electric arc furnace; carbon-thermal process; extraction of silicon; thermal efficiency, active power; energy and technology audit.

For citation: Shkirmontov A.P. Smelting of ferrosilicium from the position of energy and technology criteria of ferroalloys electric arc furnace operation. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 8, pp. 43–49. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-43-49

REFERENCES

1. Shhedroviczkiy Ya.S. *Vy'sokokremnisty'e ferrosplavy'* [High silicium ferroalloys]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1961, 256 p. (In Russ.).
2. Shkirmontov A.P. Determining of parameters complex for elaboration of energy and technological criteria of ferroalloy furnace operation. *Glavny'j e'nergetik*, 2010, no. 5, pp. 44–50. (In Russ.).
3. Shkirmontov A.P. Analysis of of energy and technological criteria of ferroalloy furnace operation during ferrosilicium smelting. *Glavny'j e'nergetik*, 2015, no. 11–12, pp. 21–24. (In Russ.).
4. Emlin B.I., Gasik M.I. *Spravochnik po e'lektrotermicheskim processam* [Reference book on electrical and thermal processes]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 288 p. (In Russ.).
5. Dashevskij V.Ya. *Ferrosplavy': teoriya i texnologiya* [Ferroalloys: theory and technology]. Moscow: Izdatel'skij dom MISiS, 2014, 362 p. (In Russ.).
6. Tolstoguzov N.V., Elkin K.S., Tolstoguzov V.N. Study of carbon consumption during smelting of silicium alloys. *Stal'*, 1995, no. 10, pp. 40–42. (In Russ.).
7. Shkirmontov A.P. [Influence of leading element extraction into an alloy on energy and technological criteria of ferroalloy furnace operation during ferrosilicium and silicium smelting]. *Shestaya Mezhdunar. konf. "Metallurgiya-Intex'e'ko-2013" (26–27 marta 2013 g.): sbornik dokladov*. Moscow: Intex'e'ko, 2013, pp. 69–71. (In Russ.).
8. Egorov A.V. *E'lektrometallurgiya stali i specze'lektrometallurgiya. E'lektroplavil'ny'e pechi chernoj metallurgii* [Electrometallurgy of steel and special electrometallurgy. Electro melting furnaces of ferrous metallurgy]. Moscow: MISiS, 2007, 428 p. (In Russ.).
9. Cherny'shov E.A. *Special'ny'e plavil'ny'e pechi. Ch. 1. E'lektrodugovy'e pechi* [Special smelting furnaces. Part 1. Electric arc furnaces]. Nizhnij Novgorod: NGTU, 2014, 253 p. (In Russ.).
10. Shkirmontov A.P. Determining of parameters complex for elaboration of energy and technological criteria of ferroalloy furnace operation. *E'lektrometallurgiya*, 2017, no. 6, pp. 24–31. (In Russ.).
11. Shkirmontov A.P. [Heat efficiency coefficient, specific electric energy consumption and energy and technological criteria of ferroalloy furnace operation]. *Sovremenny'e problemy' e'lektrometallurgii stali: materialy' XV Mezhdunar. nauch. konf. (24–27 sentyabrya 2013 g.). Chast' 2*. Chelyabinsk: YuUrGU, 2013, pp. 210–213. (In Russ.).