

УДК 621.365:621.745.5

**Колесников Александр Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент Южно-Казахстанского государственного университета имени М. Ауэзова.

E-mail: kas164@yandex.ru

Область научных интересов: металлургия, электротермия, комплексная переработка техногенного и минерального сырья, промышленная экология, нефтегазовое дело.

**Капсалимов Бауыржан Аухсанович**, д-р техн. наук, доцент, директор по развитию ТОО «Производственное объединение литейных заводов».

E-mail: 19575859@rambler.ru

Область научных интересов: металлургия, электротермия, комплексная переработка техногенного и минерального сырья, промышленная экология.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ТРАНСФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ В ВАННЕ ПЕЧИ ПРИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫПЛАВКЕ ФЕРРОСИЛИЦИЯ ИЗ КЛИНКЕРА ВЕЛЬЦЕВАНИЯ АЧИСАЙСКОЙ РУДЫ

А.С. Колесников\*, Б.А. Капсалимов

Южно-Казахстанский государственный университет  
им. М. Ауэзова\*

ТОО «Производственное объединение литейных заводов»

E-mail: kas164@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью переработки техногенного сырья, в частности отхода вельцевания цинксодержащих материалов – клинкера, с целью вовлечения его в технологический цикл получения ферросилиция марок ФС20 и ФС25 и коллективных свинцово-цинковых возгонов. В связи с этим важной характеристикой переработки рудного или техногенного сырья электроплавкой является оптимальный тип электрического режима (дуговой, сопротивления, смешанный), обеспечивающий максимальный выход продукта с минимальными экономическими показателями. Цель работы – определение типа электрического режима и влияние его на технологические показатели плавки клинкера вельцевания. Основные экспериментальные данные получены с привлечением современных методов физико-химического анализа, в частности химико-аналитических методов и методом осциллографирования. В результате исследований выяснено, что электроплавка клинкера вельцевания на ферросилиций характеризуется наличием дугового разряда, в котором выделяется 22,7 % подводимой к печи мощности, при этом основная часть энергии (75 %) выделяется в расплаве.

лиций характеризуется наличием дугового разряда, в котором выделяется 22,7 % подводимой к печи мощности, при этом основная часть энергии (75 %) выделяется в расплаве.

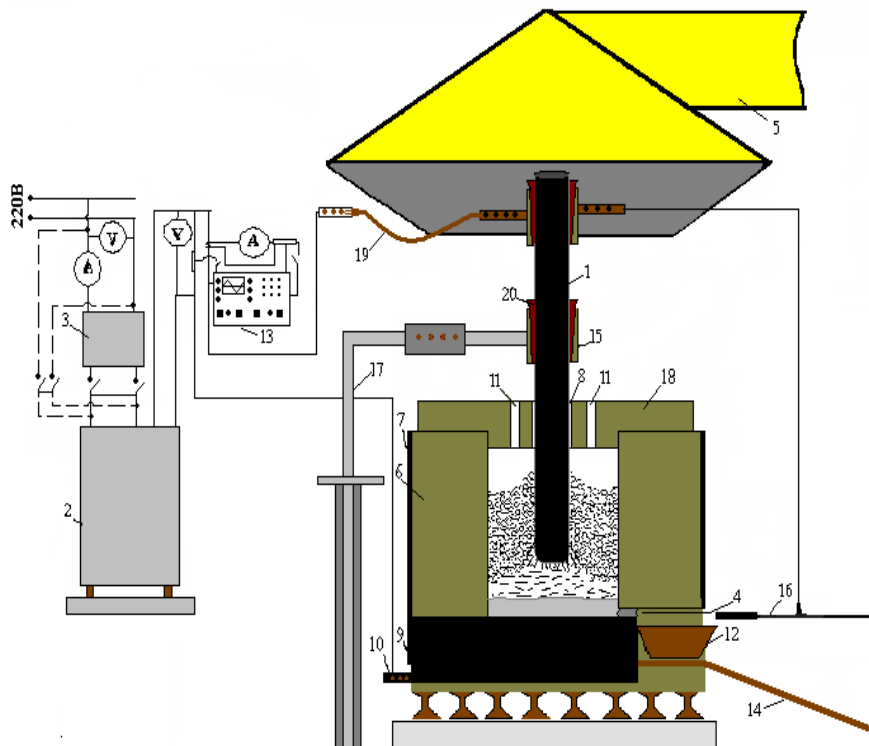
### Ключевые слова:

Клинкер вельцевания, ферросилиций, электрическая энергия, тепловая энергия, дуговой режим, режим трансформации, вольт-амперные характеристики, электротермическая плавка.

Анализ тенденции развития минерально-сырьевой базы республики Казахстан показывает снижение содержания металлов в сырье и ухудшение технологических свойств. Практически отсутствуют мономинеральные легкообогатимые руды. Сейчас сырьевая проблема металлургии не может быть решена только на основе переработки природного сырья. Необходимо системное вовлечение в сферу производства техногенного и вторичного сырья независимо от его отраслевой принадлежности и переход от отраслевого сырья к единому технологическому, при переработке которого можно получать не только цветные металлы, но и продукты, относящиеся к черной металлургии, химической отрасли и производству строительных материалов, характеризующихся новыми технологическими свойствами и обладающих добавочной стоимостью. Необходимость такого подхода связана также с тем, что доля минерального сырья в структуре сырьевых источников этих отраслей составляет более 70 % [1]. Исходя из этого к категории единого технологического сырья, способного расширить сырьевую базу для металлургии, можно отнести около 5 млрд т. твердых отходов металлургического передела, накопленных в Казахстане [2], в частности клинкер вельцевания оксидных цинксодержащих руд, который является потенциальным источником получения Zn, Pb и ферросплавов.

При электротермическом способе переработки природного и техногенного сырья важным вопросом является определение типа электрического режима или типа трансформации

электроэнергии в тепловую и влияние ее на технологические показатели получения целевого продукта [3, 4]. Нами для переработки крупнотоннажного отхода вельцевания цинксодержащих материалов – клинкера – предложена его электротермическая переработка с получением ферросилиция и переводом Zn, Pb в возгоны [5]. Для определения типа электрического режима и влияния его на технологические показатели плавки клинкера вельцевания нами было проведено осциллографирование процесса с использованием осциллографа марки С1-55. Исследования проводились на укрупненной лабораторной печи, схема которой приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема установки исследования режима электроплавки клинкеров вельцевания Ачисайской цинковой руды: 1 – графитированный электрод; 2 – трансформатор ОСУ-80; 3 – тиристорный регулятор; 4 – летка; 5 – зонт печи; 6 – хромомagneзитовая футеровка; 7 – кожух печи; 8 – отверстие для вывода газов в систему улавливания возгонов; 9 – углеграфитовая подина; 10 – нижний токоподвод; 11 – отверстие для загрузки шихты; 12 – изложница; 13 – двухлучевой осциллограф С1-55; 14 – эстакада; 15 – замок; 16 – аппарат прожига летки; 17 – механизм перемещения электрода; 18 – крышка; 19 – гибкая часть короткой сети; 20 – медные клинья

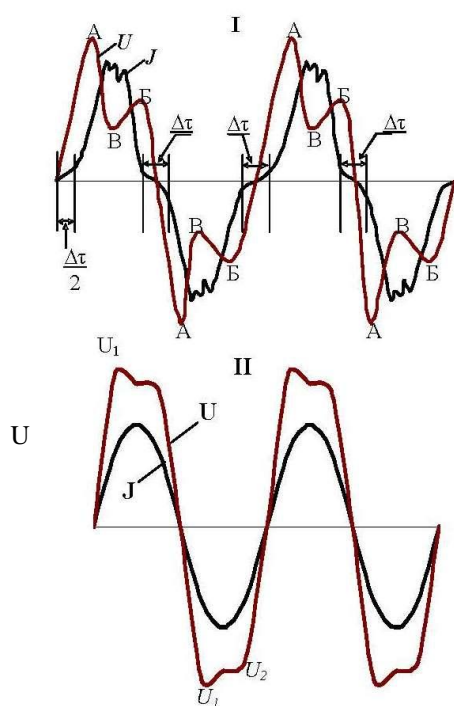
Печным агрегатом, в котором происходил процесс переработки клинкеров вельцевания, являлась однофазная электропечь, питающаяся от трансформатора ОСУ-80 (2). Футеровка электропечи – хромомagneзитовая (6), подина углеграфитовая (9). Ванна электропечи имела форму квадрата размером  $0,3 \times 0,3$  м, Высота ванны электропечи – 0,45 м. Объем ванны –  $0,0405$  м<sup>3</sup>, площадь пода –  $0,09$  м<sup>2</sup>. Футеровка печи и подина были заключены в кожух толщиной 1,3 мм. Пространство между кожухом печи и футеровкой было заполнено листовым асбестом. В верхней части футеровки была установлена крышка из огнеупорного материала (18) с отверстиями: для засыпки шихты (2 отверстия), для ввода электрода и для отвода отходящих газов (8). Расплав сливался через летку (4). Для слива шлака и ферросплава в нижнюю часть подины устанавливалась металлическая изложница (12) с толщиной стенок и днища 0,01 м, для транспортировки изложницы из ниши на охлаждение печь была снабжена наклонной эстакадой (14). Температура на колошнике, отходящих газов измерялась при помощи термопары ПП-1 в паре с милливольтметром МПП-154М, а расплава на выпуске (эпизодически) вольфрам-рениевой термопарой. Газы из электропечи через газоход направлялись в пылевую камеру для

улавливания цинка, свинца. Очищенный газ выбрасывался в трубу посредством дымососа. Пыль, осаждаемая в камере, собиралась в подвесных мешках. Электрод использовали графитированный, диаметром 10 см (1). Нарастивание электрода происходило при помощи графитовых ниппелей. Механизм поддержания электрода состоял из кольцеобразной опоры, в пространство между которой и электродом вбивались железные конические клинья. Опора через изолятор соединялась со штангой механизма перемещения электрода (17). Выше кольцеобразной опоры находилось токоподводящее кольцо-замок (15). В пространство между кольцом и электродом вбивались медные конические клинья (20). Токоподводящее кольцо соединялось через гибкую короткую медную сеть с шиной, идущей от трансформатора ОСУ-80. Вторая шина от трансформатора через медную шпильку-токоподвод (10) соединялась с углеграфитовой подиной.

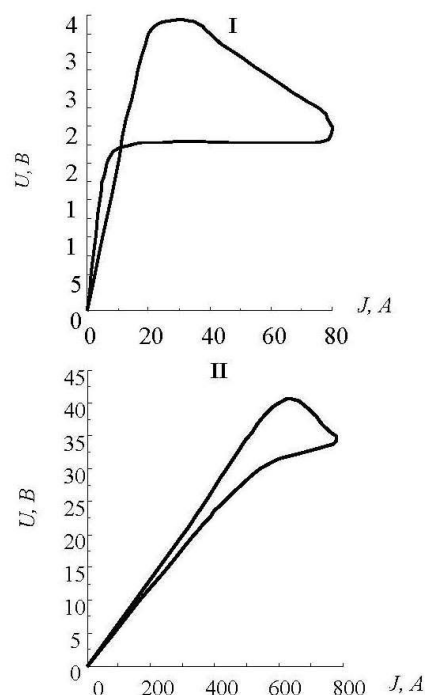
Между трансформатором и электропечью было установлено терристорное устройство (3), позволяющее регулировать мощность от 0 до 60 кВт. Контролирующие устройства (амперметры и вольтметры) были установлены на входе и выходе из трансформатора. Для определения типа электрического режима при переработке клинкера проводили осциллографирование процесса при помощи осциллографа марки С1-55 (13). В этот период тиристорный блок отключался, и регулирование мощностью печи осуществлялось положением электрода.

На первом этапе исследований были сняты осциллограммы тока ( $J$ ) и напряжения ( $U$ ) в период розжига печи на коксике (рис. 2), из которого следует, что в начальный период розжига печи имеются значительные отклонения линий  $U$  и  $J$  от синусоид. Так, при  $J = 750$  А и  $U = 40$  В на кривой напряжения имеются два пика (точки А и Б), которые соответствуют напряжению зажигания и гашению дуги, а на кривой тока при переходе его через нуль имеется промежуток времени ( $\Delta\tau$ ), когда кривая тока стремится занять горизонтальное положение.

Подобный характер изменения тока и напряжения относится к неустойчивому дуговому разряду с сравнительно холодным газовым промежутком и низкой степенью ее ионизации [6]. Об этом свидетельствует и форма вольт-амперной характеристики (рис. 3), которая имеет сложный и нелинейный характер с большим гистерезисом.



**Рис. 2.** Осциллограмма силы тока ( $J$ ) и напряжения ( $U$ ) розжига печи на коксе: I – начало розжига ( $J = 750$  А,  $U = 40$  В); II – окончание розжига ( $J = 800$  А,  $U = 40$  В)

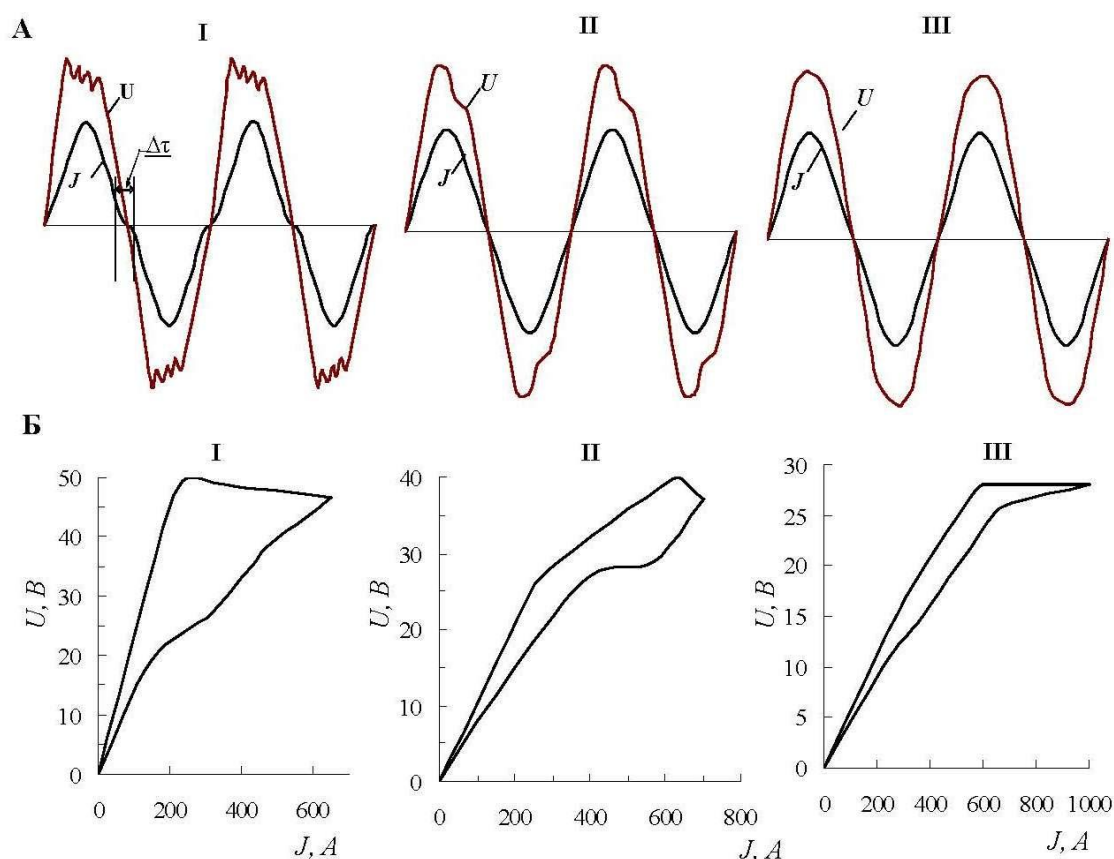


**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики розжига печи на коксе: I – начало розжига ( $J = 750$  А,  $U = 40$  В); II – окончание розжига ( $J = 800$  А,  $U = 40$  В)

После прогрева печи в течение 2 часов кривые  $U$  и  $J$  имеют небольшие искажения. О наличии стабильной дуги в печи свидетельствует некоторая асимметричность трапециевидного характера кривой  $U$ , на которой сохраняется неравенство  $U_1 > U_2$  в течение каждого полупериода. При этом  $U$ - $J$ -характеристика имеет также нелинейный характер. Однако он более близок к линейному в сравнении с начальным периодом розжига печи. Таким образом, собранная установка позволяет фиксировать различные фазы дугового разряда.

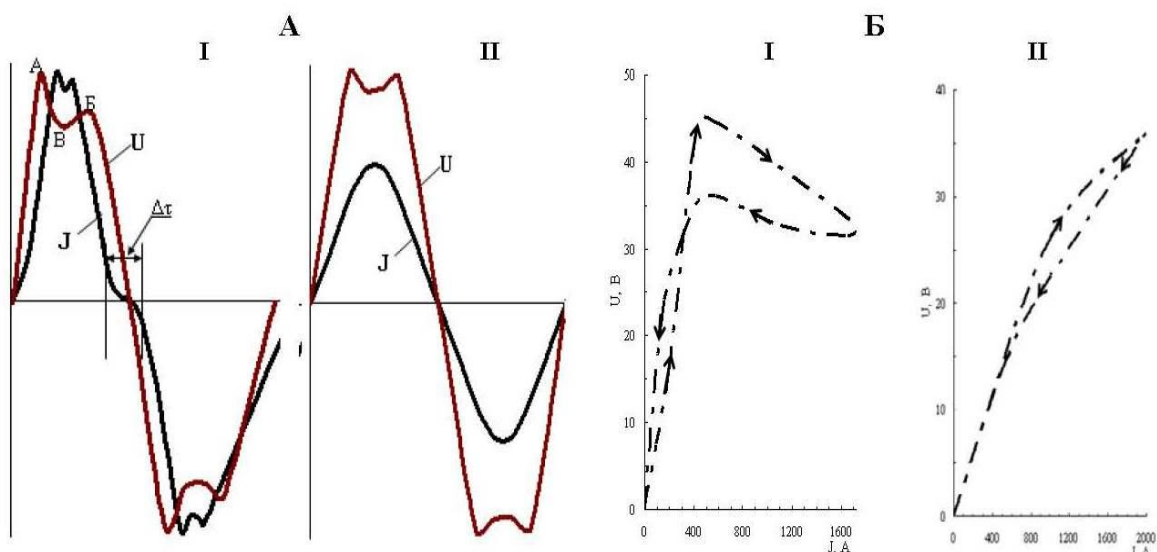
На рис. 4 приведена информация о характере кривых  $U$  и  $J$  в различные периоды электроплавки клинкера (1,5–2 % Zn, 0,1–0,2 % Pb, 13–16 % CaO, 2–3 % MgO, 16–20 % SiO<sub>2</sub>, 3–5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 20–23 % Fe<sub>общ.</sub>, 16–17 % C). Из рис. 4 следует, что в период загрузки шихтой в печи работала неустойчивая электрическая дуга, характерными признаками которой являлись искажения напряжения (особенно при максимальных значениях), наличие периода  $\Delta t$  на кривой  $J$  и явно нелинейный характер  $U$ - $J$ -характеристики. Окончание плавки клинкера характеризуется меньшим искажением  $U$  и  $J$  (рис. 4).

В этот период вольт-амперная характеристика при амплитудных значениях  $J = 700$  А и  $U = 40$  В также носит нелинейный характер. Однако он имеет гораздо меньше отклонений от прямолинейного характера в сравнении с периодом загрузки, поэтому окончание процесса плавления также характеризуется наличием дугового разряда. В середине периода электроплавки клинкера (20 минут после расплавления) кривые  $U$  и  $J$  также имеют отклонения от синусоидальной формы, а  $U$ - $J$ -характеристика носит нелинейный характер (рис. 4).



**Рис. 4.** Осциллограмма (А) силы тока ( $J$ ) и напряжения ( $U$ ) и вольт-амперные характеристики (Б) электроплавки клинкера вельцевания с получением ферросилиция: I – начало розжига ( $J = 650$  А,  $U = 50$  В); II – окончание расплавления шихты ( $J = 700$  А,  $U = 40$  В); III – середина плавки шихты ( $J = 1000$  А,  $U = 28$  В)

Отмеченные проявления свидетельствуют о том, что при электроплавке клинкера электропечь работает в смешанном режиме, когда энергия в ванне выделяется и в расплаве, и в дуговом разряде. Такой режим обеспечивает степень перехода Si в сплав на 88–90,6 а Fe от 96,2 до 97% и характеризуется отношением глубины погружения электрода в расплав ( $h_3$ ) к диаметру электрода ( $d_3$ ) равным  $h_3/d_3=0,37-0,43$ . Подобные исследования проведены нами на опытной установке НИФ «Казхиминвест» мощностью 72 кВт и диаметром электрода 20 см с использованием осциллографа С1-55. Кривые  $U$  и  $J$  периода розжига печи (рис. 5) имеют значительные отклонения от синусоидального характера (точки А, Б и В на кривой  $U$  и  $\Delta t$  на кривой  $J$ ). Эти признаки, а также нелинейность  $U$ – $J$  динамической характеристики свидетельствуют о наличии в печи электрической дуги. Иные кривые  $U$  и  $J$  были получены в период плавки клинкера (рис. 5).



**Рис. 5.** Осциллограмма (А) силы тока ( $J$ ) и напряжения ( $U$ ) и вольт-амперные характеристики (Б) процесса получения ферросилиция из клинкера вельцевания Ачисайской руды: I – розжиг печи ( $J = 1750$  А,  $U = 45$  В); II – электроплавка клинкера ( $J = 2000$  А,  $U = 36$  В)

В этот период кривая тока ( $J_{ампл} = 200$  А) не имеет каких-либо искажений. О наличии дуги в печи свидетельствуют только искажения кривой напряжения ( $U_l = 36$  В). Форма  $U$  в этом случае близка к трапеции.  $U$ – $J$ -характеристика плавки клинкера имеет отклонения от прямой в интервале  $U$  от 14 до 36 В и  $J$  от 600 до 1200 А (рис. 5). Подобная  $U$ – $J$ -характеристика и кривые  $U$ ,  $J$  свидетельствуют о том, что при электроплавке клинкера основная масса электроэнергии преобразуется в тепловую по закону Джоуля – Ленца, а доля тепловой энергии, выделяемой в дуговом разряде, значительно меньше [7]. Баланс напряжения печи при электроплавке клинкера вельцевания ( $U_{печ}$ ) можно представить как сумму напряжения, теряемого в электроде ( $U_{эл}$ ), контакте электрод-щетка ( $U_{э-щ}$ ), напряжения закрытой дуги ( $U_{дуг}$ ) и напряжения, теряемого в расплаве ( $U_{распл}$ ). В соответствии с [7] при некоторых допущениях:

$$U_{эл} = \rho \times l_{эл} \times \delta_{эл} \quad (1)$$

$$U_{распл} = R_{распл} \times J = \rho^1 \times \frac{h_p}{\pi r^2} \times K_p \times J \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное электросопротивление электрода (ом·см);  $l_{эл}$  – длина электрода (см);  $\delta_{эл}$  – плотность тока в электроде (ом/см<sup>2</sup>);  $\rho^1$  – эквивалентное удельное сопротивление расплава, равное такому удельному сопротивлению однородной среды, сопротивление растекания тока по которому при тех же геометрических размерах такое же, как и по относительно неоднородному расплаву (ом·см);  $r$  – радиус электрода (см);  $h_p$  – глубина расплава в ванне печи (см);  $K_p$  – коэффициент учитывающий отклонение электрического поля в расплаве от плоскопараллель-

ного, определяется из зависимости  $K_p=f(h_p/d_{эл})$ . Из [7] следует, что  $U_{э-ц}$  не превышает 0,35 % от  $U_{печ}$ .

В нашем случае:

$$U_{эл} = \frac{J}{3,14 \times r^2} \times l_{эл} \times \rho = \frac{200}{3,14 \times 10^2} \times 1000 \times 0,08 \times 10^{-2} = 0,51 \quad (3)$$

$$U_{э-ц} = 32 \times 0,35 \times 10^{-2} \times 2 = 0,22B \quad (4)$$

$$U_{распл} = 0,6 \times \frac{15}{3,14 \times 100} \times 0,42 \times 2000 = 24B \quad (5)$$

Поэтому  $U_{двз} = 32 - 24 - 0,51 - 0,22 = 7,27$  В. Следовательно подводимая к печи мощность при последовательно соединенных проводниках будет распределяться следующим образом:

- в контакте электрод-щека – 0,68 %;
- в электроде – 1,6 %;
- в расплаве ( $P_p$ ) – 75 %;
- в дуговом разряде ( $P_d$ ) – 22,72 %,

т. е. соотношение  $P_p/P_o = 3,3$ .

Таким образом, проведенные исследования позволили установить следующее:

- Электроплавка клинкера вельцевания на ферросилиций характеризуется наличием дугового разряда, в котором выделяется 22,7 % мощности, подводимой к печи;
- Основная часть энергии (75 %) выделяется в расплаве и характеризуется расходом энергии в 2700 кВт·час на 1 тонну ферросплава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексное использование руд и концентратов / В.А. Резниченко, М.С. Липихина, А.А. Морозов и др. – М.: Наука, 1989. – 172с.
2. Туркбаев Э.А., Сыдыков Г.Х. Комплексное использование сырья и отходов промышленности. – Алма-Ата: Казахстан, 1988. – 140 с.
3. Платонов Г.Ф. Параметры и электрические режимы металлургических электродных печей. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 151с.
4. Струнский Б.М. Руднотермические плавильные печи. – М.: Металлургия, 1972. – 368 с.
5. Колесников А.С. Технология получения ферросплава и возгонов цветных металлов из отхода: моногр. – Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 212 с.
6. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
7. Сисоян Г.А. Электрическая дуга в электрической печи. – М.: Металлургия, 1974. – 304 с.

Поступила 10.11.2014