

ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВАНН ФЕРРОСПЛАВНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ И ИХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Проанализирована представительная совокупность практических данных по геометрическим параметрам отечественных и зарубежных рудотермических электропечей (РВП) в зависимости от их электрической мощности. Показано, что выбор рациональной геометрии рабочего пространства (ванны) РВП следует осуществлять, исходя из потребляемой (активной) мощности электропечной установки. Выбор установленной мощности печного трансформатора определяется его электрическими характеристиками по ступеням напряжения и электрическим сопротивлением ванны как функции вида выплавляемого сплава и геометрии рабочего пространства. Основным параметром регулирования, обеспечивающим рациональное распределение энергии в ванне РВП является расположение рабочего конца электрода относительно пода электропечи или (что то же самое) заглубление электрода в шихту при заданной глубине ванны. РУДОТЕРМИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВАННЫ, ПОЛОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Проанализована показна сукупність практичних даних по геометричних параметрах вітчизняних і зарубіжних рудотермічних електропечей (РВП) залежно від їх електричної потужності. Показано, що вибір раціональної геометрії робочого простору (вани) РВП слід здійснювати, виходячи із споживаної (активної) потужності електропечної установки. Вибір встановленої потужності пічного трансформатора визначається його електричними характеристиками по ступінях напруги і електричним опором ванни як функції від виду сплаву, що виплавляється, і геометрії робочого простору. Основним параметром регулювання, що забезпечує раціональний розподіл енергії у вані РВП є розташування робочого кінця електроду відносно поду електропечі або (що те ж саме) заглиблення електроду в шихту при заданій глибині ванни.

The representative set of actual data on geometric parameters of domestic and foreign ore-smelting furnaces has been analyzed depending on their electric capacity. It was shown that the rational geometry of furnace's working space (bath) should be based on (active) power consumption of a furnace. The choice of installed capacity of a furnace transformer depends on its electricity specifications regarding voltage stages and electric resistance of a bath as a function of a type of melted alloy and a geometry of a working space. The basic control parameter providing a rational distribution of energy in a furnace's bath is a location of an electrode tip against a furnace's hearth or (which is the same) penetration of an electrode into a charge at a given depth of a bath.

Постановка задачи исследования

Основные затруднения, встречающиеся при выборе рациональных конструкций рудотермических электропечей (РВП) и их оптимальных электрических режимов работы, обусловлены, главным образом, недостаточной теоретической базой, слабой изученностью многообразных и тесно взаимосвязанных процессов в промышленных РВП большой

мощности. В настоящее время нет возможности теоретически определить наивыгоднейшие (в смысле минимакса) режимы работы проектирующихся печей без существенного привлечения экспериментальных данных и опыта эксплуатации действующих агрегатов. Решение практических вопросов оптимизации режимов работы РВП осуществимо только на основе сопоставления и анализа многочисленных эмпирических и полуэмпирических зависимостей. В этом плане изучение электрических и тепловых процессов в ваннах печей в сочетании с анализом физико-химических закономерностей протекания процессов формирования (ферро)сплава остаётся актуальной научно-технической задачей. В настоящей работе представлены промежуточные итоги многоплановых исследований, направленных на разработку рекомендаций по оптимизации параметров высокомоощных РВП, выплавляющих кремнистые и марганцевые ферросплавы.

Ванна руднотермической электропечи характеризуется геометрическими параметрами, а условия ее работы – электрическими режимами. Совокупности геометрических параметров ванн и электрических режимов тесно скоррелированы и могут быть однозначно взаимно определены [1-9]. Отсутствие надежных теоретических методов определения геометрических параметров рудовосстановительных электропечей (РВП) вынуждает осуществлять их выбор по аналогии с хорошо работающими печами по эмпирическим формулам [1, 3, 4, 7]. Основными параметрами, характеризующими ванну (рабочее пространство) РВП, являются: диаметр электрода, диаметр распада электродов, диаметр и глубина ванны. Из них наибольшее внимание традиционно уделяется диаметру распада; полагают при этом [10], что возможные ошибки в определении остальных параметров могут быть легко устранены изменением конструкции футеровки и уровня колошника.

Поскольку, как выяснилось [4], посылка о геометрическом подобии ванн ферросплавных печей в ее сильной форме $B'/D_э = const$ не обладает явной инвариантностью, т.к. относительные величины $D_в/D_э$, $D_р/D_э$ и $h_в/D_э$ ² проявляют большую или меньшую зависимость от мощности печи, мы полагаем, что ее нельзя принять в качестве *абсолютно* правильного исходного пункта. Отсюда же, как нам кажется, следует сомнительность безоговорочного использования в расчетных методах каких-либо иных “*критериев подобия*” в какой бы то ни было, пусть даже в самой комплексной форме. Может быть, вообще, наиболее практичный путь – сначала добиться успеха на пути выявления общих тенденций, трендов и зависимостей в развитии ферросплавных печей как технического объекта (в

² B' – геометрический параметр ванны (какой-либо из нижеперечисленных); $D_в$ – внутренний диаметр ванны; $D_р$ – диаметр распада электродов; $h_в$ – глубина ванны; $D_э$ – диаметр электрода.

рассматриваемом случае геометрических параметров ванн), а затем, отталкиваясь от них, двигаться к более полному пониманию.

На самом первом этапе кажется логичным ограничиться выявлением общих корреляций, которые могут оказаться полезными и надежными в том смысле, что являются обобщением огромного накопленного опыта реального производства. По существу, эксплуатируемые в настоящее время печи – результат целенаправленной *эволюции*, в известном смысле даже “*селективного отбора*” по критерию повышения их технико-экономических показателей: пожалуй, невозможно найти ни одной ферросплавной печи из представленной выборки, сохранившей свои изначальные “проектные” размеры. Точно так же трудно обнаружить две совершенно идентичные по геометрическим параметрам (при заданной мощности) печи, что, с одной стороны, отражает самую существенную черту всякого эволюционного процесса – его динамичность и незавершенность (по крайней мере в отношении объектов последних поколений), а с другой – отмечавшееся уже отсутствие единства мнений, которые можно было бы сконцентрировать в понятие “хорошо работающая печь” (типичный пример нечеткого множества). В действительности с учётом возможных и неизбежных для практических данных вариаций статистическая выборка, включающая геометрические параметры ванн действующих ферросплавных печей, кажется достаточно представительной для того, чтобы обеспечить надежность и корректность корреляционных зависимостей, полученных регрессионным анализом.

Взаимосвязь геометрических параметров ванн РВП с потребляемой активной мощностью

Поскольку вводимая в ванну РВП энергия определяется в конечном итоге (и прежде всего) активной мощностью P (МВт), разумно было построить корреляционные зависимости геометрии ванн РВП от этого параметра. Полученные статистической обработкой *всей* совокупности данных (независимо от вида выплавляемого сплава) регрессионные уравнения имеют вид:

$$D_B = 1646,4 P^{0,4867}; \quad (1)$$

$$D_p = 1290,7 P^{0,3107}; \quad (2)$$

$$h_B = 831,3 P^{0,4088}; \quad (3)$$

$$D_{\text{э}} = 481,7 P^{0,3295}. \quad (4)$$

Здесь D_B – внутренний диаметр ванны, мм; D_p – диаметр распада электродов, мм; h_B – глубина ванны, мм; $D_{\text{э}}$ – диаметр электрода, мм.

Помимо этого, получены аналогичные зависимости для “усечённых” выборок – линейки печей, выплавляющих кремнистые сплавы (5)-(8)

$$D_B = 1725,6 P^{0,4782}; \quad (5)$$

$$D_p = 1184,8 P^{0,337}; \quad (6)$$

$$h_B = 761,9 P^{0,4305}; \quad (7)$$

$$D_э = 483,4 P^{0,3257}. \quad (8)$$

и линейки РВП, ориентированных на производство сплавов марганца (9)-(12)

$$D_в = 1946,1 P^{0,4428}; \quad (9)$$

$$D_р = 1089,8 P^{0,3556}; \quad (10)$$

$$h_в = 1183,1 P^{0,3195}; \quad (11)$$

$$D_э = 414,7 P^{0,3719}; \quad (12)$$

Сравнение соответствующих корреляционных уравнений (5)-(8) и (1)-(4) показывает их незначительные отличия (не более 2% даже для высокомоощных агрегатов), что указывает на возможность выбора геометрических параметров ванн РВП, выплавляющих *кремнистые сплавы*, безотносительно к их узкой специализации по виду выплавляемого сплава (по крайней мере, в пределах вариаций, имеющих место для парка печей, находящихся в эксплуатации).

Для печей линейки *марганцевых сплавов* видно, что наибольшие расхождения с результатами вычислений по уравнениям (9)-(12) и, соответственно (1)-(4) не превышают 6% для $D_в$, 2,5% для $D_р$, 13,7% для $h_в$ и 3,3% для $D_э$. Как и следовало ожидать, практически значимые отличия имеют место лишь для глубины ванны. Действительно, для маломощных электропечей, выплавляющих марганцевые сплавы (в том числе, ферросиликомарганец), может быть рекомендовано повышение глубины ванны на 10-15%. Для крупных печей (≥ 20 МВт), особенно закрытых и герметичных, повышение глубины ванны может привести к снижению газопроницаемости столба шихтовых материалов, ухудшению газодинамического режима и, как следствие, к снижению показателей работы.

Электрическое сопротивление ванны РВП как определяющий электро-технологический фактор

Паспортным параметром РВП является, однако, установленная мощность печного трансформатора S , и нужно, по-видимому, каким-то образом к нему перейти. Переход этот не совсем тривиален – авторам, по крайней мере, приходилось сталкиваться с непониманием: почему электропечь с установленной (суммарной) мощностью трансформаторов 81 МВ·А (3Ч27 МВ·А) в ходе эксплуатации потребляет 58...62_(max) МВт при $\cos \varphi \approx 0,90...0,92$ (печь РКЗ-63, высокоуглеродистый феррохром). Аналогично, печь РКЗ-33 (установленная суммарная мощность трансформаторов 40 МВ·А (3Ч13,333 МВ·А) при выплавке высокоуглеродистого феррохрома работает на мощностях 28...32_(max) МВт, а при выплавке товарного ферросиликомарганца – 19...22_(max) МВт (эксплуатационный коэффициент мощности при включённой УПК примерно одинаков и составляет $\cos \varphi \approx 0,90...0,92$). Причина проста, если учесть две тонкости - *электрические характеристики* печного

трансформатора по ступеням напряжения (ПСН) и *сопротивление нагрузки* на его вторичной обмотке (при заданных конструктивно сопротивлениях короткой сети – активном $r_{кс}$ и реактивном $x_{кс}$ – всё сводится, по существу, к сопротивлению ванны на фазу R_B).

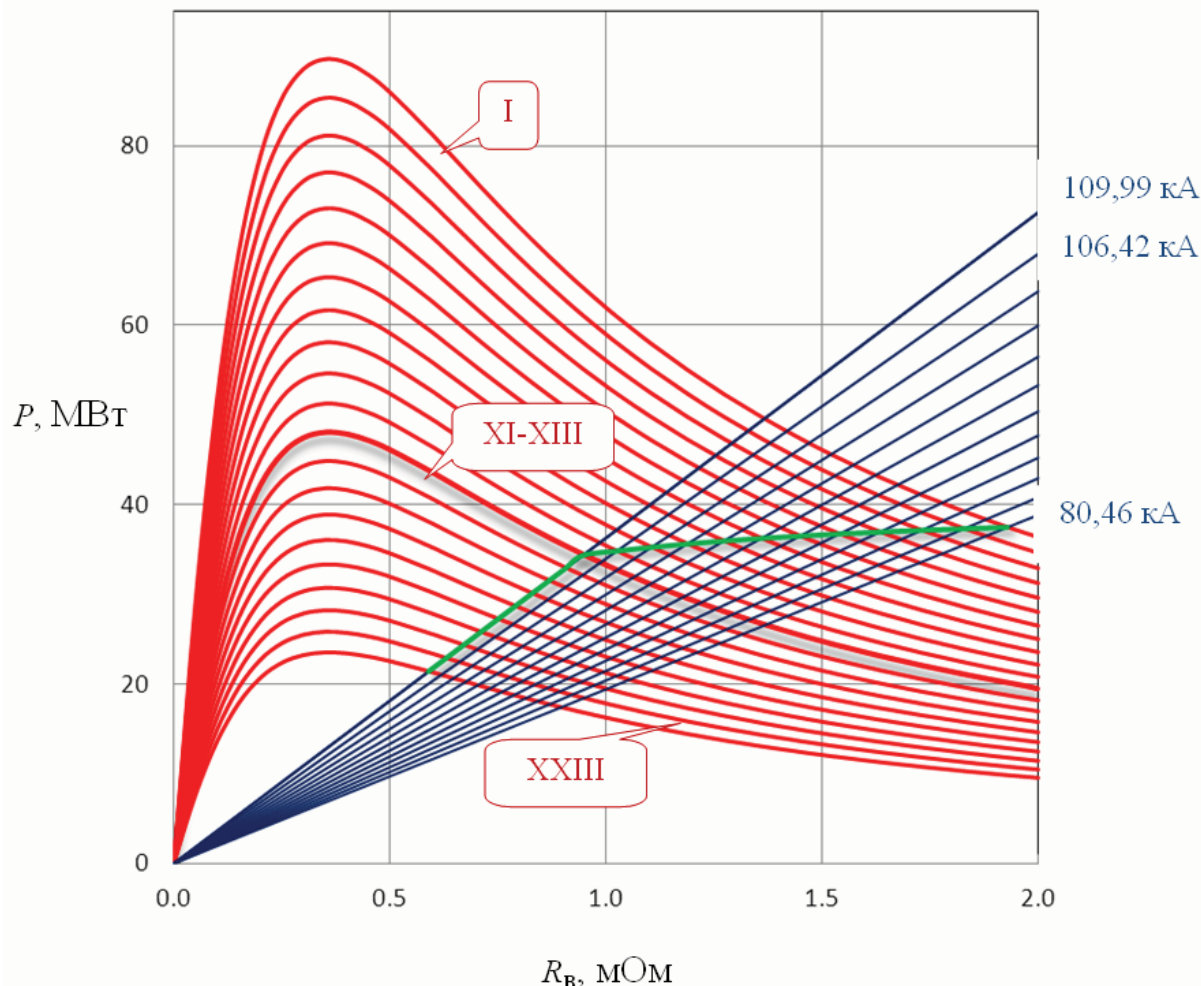


Рисунок 1 – Активная мощность (P , МВт) печного трансформатора ЭОЦНК 27000/110 по ступеням напряжения (римские числа у кривых) в зависимости от сопротивления ванны (R_B , МОм); пучёк прямых, исходящих из начала координат – номинальные токи вторичной обмотки трансформатора (числа справа); ломанная ограничивает сверху допустимые токи вторичной обмотки $I_{2л}$; "средние" ступени XI-XIII оттенены серым

Рассмотрим для конкретности упоминавшуюся уже печь РКЗ-33, характеристики печного трансформатора (ЭОЦНК 27000/110; 23 ступени напряжения; $U_{2л} = 287...217...147$ В; $I_{2л} = 80,46...106,42...109,99$ кА) которой приведены на рис. 1: здесь даны зависимости активной мощности печной установки (кривые с экстремумом) от сопротивления ванны РВП (по паспортным данным печи принято $r_{кс} = 0,1$ МОм, $x_{кс} = 0,345$ МОм с УПК).

Выплавка высокоуглеродистого феррохрома ФХ800 осуществляется на казахстанской руде с использованием китайского, российского коксов и казахстанского "спецкокса". При принятых геометрических параметрах

ванны, сырье (включая его подготовку) и технологии (шлаковый режим) сопротивление ванны составляет $0,79_{(min)}...0,87_{(max)}$ МОм. Печь эксплуатируется на XIV...XVII ступенях напряжения, потребляя 31,6...27,3 МВт мощности.

При производстве товарного ферросиликомарганца MnC17 в той же печи (казахстанские марганцевая руда и кварцит, те же восстановители) сопротивление ванны ниже и находится в пределах $0,63_{(min)}...0,67_{(max)}$ МОм; печь эксплуатируется на XXI...XXII ступенях напряжения, потребляя 20,4...22,3 МВт мощности.

Расположение электрода в ванне как фактор, определяющий распределение энергии в рабочем пространстве РВП

Считаем, что геометрия рабочего пространства РВП задана при проектировании, состав шихты (сырьё, восстановители, флюсы и их соотношение) оптимизирован и рассчитан на получение (ферро) сплава заданного качества, гранулометрический состав её также фиксирован, исходя из соображений технологии и возможностей производителя. Тогда остаётся только одна возможность и, в принципе, регулирование электрического сопротивления ванны можно осуществить, изменяя расположение электрода относительно пода электропечи. Однако, возможность эта больше гипотетическая, поскольку считается (и это подтверждено многолетней практикой ферросплавного производства), что положение электрода в ванне печи тоже должно быть оптимизировано (см., например, [8]), определяя, в конечном итоге, рациональное (в смысле минимакса) распределение энергии в рабочем пространстве РВП.

Проиллюстрируем сказанное данными [4], полученными на электропечи РКЗ-63. Обследование печи осуществлялось в период выведения её на нормальный режим работы после аварии на электроде второй фазы (в ходе его "наращивания"). В результате появилась возможность получить картину, характеризующую влияние расположения электрода в ванне РВП на её температурное поле и расположение шихтовых материалов и полупродуктов плавки в различных физических состояниях (рис. 2).

При малой общей длине электрода (1900 мм от нижнего обреза контактных щёк) расстояние от торца электрода до пода составляла ≈ 3700 мм (рис. 2а), "горячая" зона смещена к колошнику, имеющему температуру 1450...1473 К. Расположение изотерм выпуклостью вниз характерно для печей, работающих многошлаковым процессом, но не для производства ферросилиция. Подэлектродная газовая полость изображена скорее условно, так как достоверно установить её наличие не представлялось возможным. Обращают на себя внимание и значительные объёмы, занятые ошлакованной массой и вязким "тестообразным" шлаком.

После удлинения электрода до 3000 мм (рис. 2б) заглубление его в шихту увеличилось до 1600 мм, а расстояние до пода печи составило \approx

3000 мм. В результате температура колошника понизилась до 1323 К; изотермы, ближние к торцу электрода, приняли более-менее “правильную” форму – выпуклостью вверх –, характерную для производства кремнистых сплавов. Печь работала более стабильно, отсутствовали свищи и обвалы шихты, имевшие место при “коротком” электроде (рис. 2а), но всё же неудовлетворительно: имело место “захолаживание” пода.

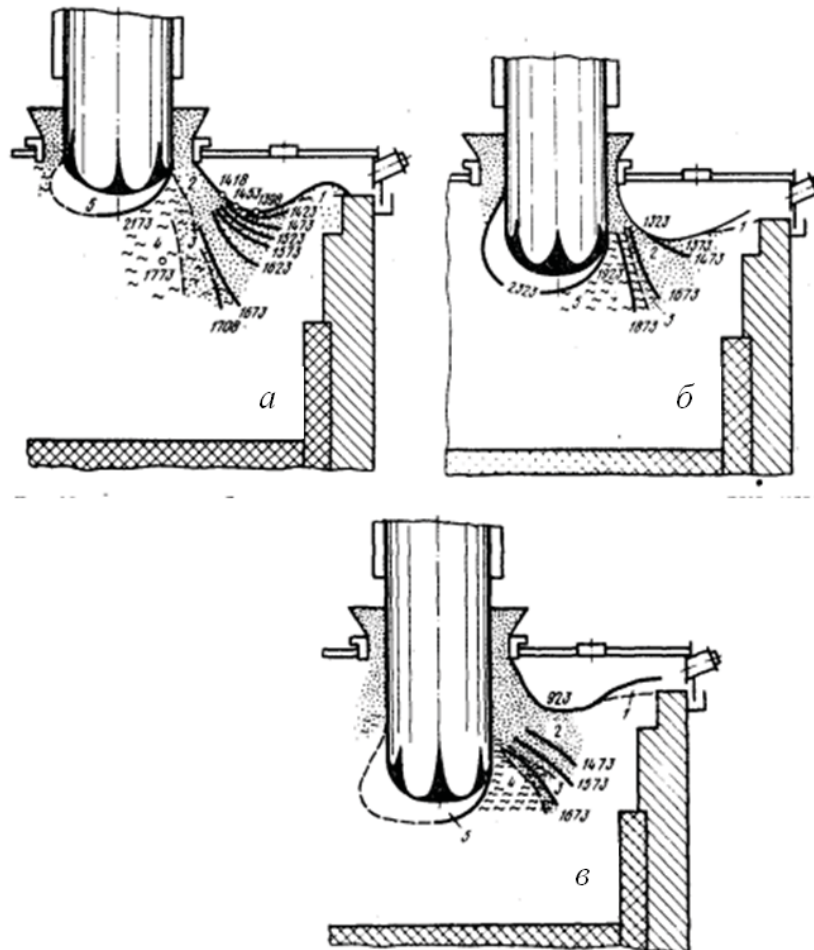


Рисунок 2 – Строение рабочего пространства и температурное поле печи РКЗ-63 при выплавке ферросилиция с различным положением электрода в ванне (масштаб $D_3 = 1900$ мм): 1 – отложения продуктов возгона; 2 – рыхлая шихта; 3 – вязкая масса; 4 – ошлакованная масса; 5 – газовая полость; числа – изотермы и локальные температуры (К)

Дальнейшее заглубление электрода в шихтовые материалы (рис. 2в) привело к нормализации режима работы электропечи. Температура колошника понизилась до приемлемых 923 К, высокотемпературные зоны сместились в направлении пода, образуя компактный “реакционный тигель”. Расположение изотерм приобрело вид, характерный для бесплаковых (малошлаковых) процессов – выпуклостью вверх. Ход печи характеризовался спокойной электрической нагрузкой, равномерным сходом шихты, отсутствием затруднений при выпуске металла и шлака.

Таким образом, положение электрода в ванне РВП определяет форму и размеры высокотемпературной зоны рабочего пространства (“реакционного тигля”) и, соответственно, распределение энергии в ванне, являясь, оптимизирующим (в смысле минимакса: наименьший из достижимых удельный расход электроэнергии при наибольшей из возможных производительности) параметром.

Выводы

1. Выполнен анализ представительной совокупности (187 действующих электропечей) данных по геометрическим параметрам отечественных и зарубежных РВП в зависимости от потребляемой (активной) электрической мощности. Показано, что геометрические параметры рабочего пространства (ванны) РВП хорошо описываются степенными уравнениями вида $B' = c R^n$ с высоким коэффициентом тесноты связи.

2. Установленную мощность печного трансформатора для РВП с заданными (оптимизированными) геометрическими параметрами ванны следует осуществлять, опираясь на электрические характеристики ЭПУ по ступеням напряжения в функции электрического сопротивления ванны электропечи. Последнее, в свою очередь, определяется видом выплавляемого сплава и геометрией рабочего пространства (ванны) РВП.

3. Оптимальное распределение энергии в ванне РВП при заданных геометрических и электрических параметрах обеспечивается расположением рабочего конца электрода относительно пода электропечи или (что то же самое) заглублением электрода в шихту при заданной глубине ванны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубов В.Л., Поляков О.И. Геометрические параметры ванн ферросплавных электропечей, выплавляющих кремнистые ферросплавы //Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 3. – С. 25-27.
2. Поляков О.И., Зубов В.Л., Гриненко В.И., Гасик М.И. Характеристики цепи ванн рудовосстановительных печей для выплавки кремнистых ферросплавов //Электрометаллургия. – 2001. – № 8. – С. 15-21.
3. Микулинский А.С. Определение параметров руднотермических печей на основе теории подобия. – М.: Энергия, 1964. – 97 с.
4. Гаврилов В.А., Поляков И.И., Поляков О.И. Оптимизация режимов работы ферросплавных печей. – М.: Metallurgia, 1996. – 176 с.
5. Поляков И.И. Характеристики электрической цепи ванны ферросилициевых рудовосстановительных печей // В сб. “Актуальные проблемы и перспективы электрометаллургического производства”. Днепропетровск ГНПП “Системные технологии”, 1999. – С. 251-255.
6. Zerdev I.T., Polyakov I.I., Yaskov E.S Methods and results of arc ferrosilicon furnace research // Proc. Int. Conf. Electrothermics (1968, May, Great Britain). Brighton: Royal Society Press, 1968. – p. 113-116.
7. Поляков И.И., Корневич А.Л., Жердев И.Т., Яськов Е.С. Метод подобия, параметры и режимы работы ферросплавных печей // Metallurgia и

коксохимия. Электрометаллургия стали и ферросплавов. Межвед. научн.-техн. сб. – 1984. – вып. 72. – С. 76-80.

8. Поляков О.И., Поляков И.И. Положение электрода в ванне ферросилициевых электропечей // Производство ферросплавов: Научн.тр. / НИИМ. – Челябинск: Metallurgia, 1991. – С. 52-59.

9. Поляков О.И., Зубов В.Л., Гасик М.И. Рациональные геометрические параметры ванн ферросилициевых печей // Сталь. – 2000. – № 4. – С. 37-42.

10. Жердев И.Т., Занузванный Т.А. // Электротермия и измерение удельных давлений: Сб.науч.тр. ДМетИ. – 1952. – Вып. XI. – С. 55-71.

Отримано 05.04.2011 р.