

На правах рукописи

ПЛЕТНЕВ Александр Александрович

**ТЕПЛОМАССОБМЕН В ШЛАКОВОМ
РАСПЛАВЕ ПРИ РАБОТЕ
РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ
НА ПОВЫШЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Талалов Виктор Алексеевич

Официальные оппоненты **Сапожников Сергей Захарович**
доктор технических наук, профессор,
(ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический
университет», заведующий кафедрой ТОТ)

Исаев Сергей Александрович
доктор физико-математических наук,
профессор
(ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный университет, гражданской
авиации», профессор кафедры «Механика»)

Ведущая организация ООО «Институт Гипроникель»
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 23 октября в 18 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, расположенном по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, ауд. 130

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент

Талалов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интенсификация процесса является одним из перспективных направлений совершенствования электроплавки медно-никелевого сырья. Как показывает теоретический анализ, энерготехнологические показатели работы руднотермической печи (РТП) могут быть улучшены, прежде всего, путем снижения относительных потерь мощности печи. Поскольку теплопотребление шихты на единицу массы определено ее свойствами и для каждой конкретной технологии неизменно, снижение относительных потерь связано с повышением удельной мощности печи, то есть увеличением вводимой в печь мощности без изменения ее размеров, либо уменьшением размеров РТП при сохранении вводимой мощности.

Согласно предварительным исследованиям имеются резервы для увеличения удельной мощности РТП, эксплуатируемых в настоящее время. На опытной печи ООО «Институт Гипроникель» экспериментально подтверждена возможность практической реализации высокоинтенсивной электроплавки на удельной мощности до 1600 кВт на единицу поверхности зеркала шлаковой ванны со снижением удельных затрат электроэнергии в среднем на 15%. Результаты, достигнутые в лабораторных испытаниях, не удается повторить в промышленном масштабе. Освоение плавки на высокой удельной мощности сдерживается, в том числе, из-за недостаточной изученности этого процесса, прежде всего, с точки зрения теплофизики и гидродинамики происходящих в шлаковой ванне явлений.

Вследствие химической агрессивности и высокой температуры расплавленного шлака практически единственным способом получения детальной информации о распределении температуры и скорости в шлаковой ванне РТП является численное моделирование.

Исходя из вышеизложенного, актуальной задачей является создание математической модели и численное исследование процессов теплообмена, происходящих в шлаковой ванне РТП при интенсификации плавки.

Целью работы является расчет и анализ полей электрического потенциала, источников объемного тепловыделения, скорости и температуры расплава в шлаковой ванне прямоугольных многоэлектродных РТП, используемых в производстве тяжелых цветных металлов; исследование стойкости к тепловым разрушениям водоохлаждаемых стен печи.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи.

1. Разработать компьютерную программу для расчета поля электрического потенциала и распределения источников Джоулева тепловыделения в много-

электродной РТП. Исследовать зависимость электрического сопротивления шлаковой ванны печи от ее геометрических параметров.

2. Разработать математическую модель для описания процессов естественно-конвективного теплообмена в ванне шлакового расплава руднотермической печи. Реализовать модель в виде компьютерного кода.

3. Верифицировать созданную численную модель.

4. Провести вычислительный эксперимент, исследовать режимы работы РТП на повышенной удельной мощности.

5. Определить предельно допустимую тепловую нагрузку на стены печи в зависимости от размеров и взаимного расположения охлаждающих элементов.

Научная новизна работы.

1. Выполнено численное исследование высокоинтенсивных режимов работы руднотермической печи на удельной мощности до 1800 кВт/м^2 .

2. Определены тепловые и электрические характеристики РТП в широком диапазоне изменения ее параметров: диаметра и относительного заглубления электродов; размеров шлаковой ванны; вводимой в печь мощности.

3. Предложена и реализована математическая модель плавления кусковой шихты в объеме шлакового расплава.

4. Обнаружен новый качественный эффект, связанный с изменением высоты ядра течения; дано физическое обоснование указанного эффекта.

5. Получена удобная для инженерных расчетов аналитическая зависимость электрического сопротивления ванны шлакового расплава.

Практическая ценность работы.

Подтверждена практическая возможность увеличения производительности и удельной мощности действующих РТП в 1,5–2 раза за счет регулируемой подачи шихты в шлаковый расплав.

Показано, что при повышении удельной мощности печи сверх определенного предела изотермическое ядро течения распространяется на весь объем шлаковой ванны. Нормальная работа печи в таких условиях невозможна, созданная численная модель позволяет предсказать границы недопустимых режимов работы для существующих или проектируемых РТП и тем самым избежать таких режимов на практике.

Определена предельно допустимая тепловая нагрузка на водоохлаждаемые стены печи в зависимости от размеров и взаимного расположения охлаждающих элементов.

На защиту выносятся перечисленные выше новые научные и практические результаты.

Апробация работы. Отдельные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических совещаниях «Электро-термия-98» и «Электротермия-2000» (Санкт-Петербург, 1998, 2000), на 5 Международной научной конференции стран Балтийского моря по теплообмену (Россия, Санкт-Петербург, 2007).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 6 работах.

Объем работы. Диссертация изложена на 145 страницах, состоит из введения, шести глав, заключения и четырех приложений. Количество рисунков – 65, количество таблиц – 15, список литературы насчитывает 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко проанализировано общее состояние проблемы и основные направления ее решения, обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования и дана общая характеристика работы.

В первой главе проведен литературный обзор состояния вопроса. В трудах Мосиондза К.И., Русакова М.Р., Жуковского Ю.С. и др., обоснована возможность улучшения энерготехнологических показателей работы электропечей путем интенсификации плавки. Описанные в публикациях авторов Y.Y. Sheng, G.A. Irons and D.G. Tisdale (1998); Румянцев Д.В., Талалов В.А., Степанов В.В., Русаков М.Р. (2009); Mei Chi, Zhou Jiemin, Xiaoqi Peng (2010) двух- и трехмерные численные модели тепломассообмена в ванне шлакового расплава РТП нуждаются в уточнении. В силу ряда ограничений эти модели не позволяют установить надежную количественную связь температуры продуктов плавки с размерами и удельной мощностью руднотермических печей. Во многих из цитированных работ расчеты выполнены на сетках, разрешающая способность которых недостаточна. Сделан вывод о необходимости продолжения подобных исследований.

Во второй главе выполнена математическая постановка задачи, обоснованы сделанные при этом допущения.

Согласно выполненным ранее исследованиям, при работе РТП в бездуговом режиме тепло- и массообмен в ванне шлакового расплава определяет свободная конвекция, вызванная нагревом от неравномерно распределенных внутренних источников тепловыделения, образующихся в результате протекания электрического тока.

В основу математической модели положены уравнения Навье-Стокса движения вязкой несжимаемой жидкости с непостоянной вязкостью и уравнение конвективного теплообмена с учетом объемных источников тепла. Выталкивающая сила естественной конвекции вычислена по модели Буссинеска. На основании

критериев гидродинамического подобия показано, что режим течения в большей части шлаковой ванны РТП является ламинарным.

Система определяющих уравнений

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + \text{Div} \left(\frac{2\mu}{\rho} \text{def} \mathbf{V} - \mathbf{V}\mathbf{V} \right) + \mathbf{f}; \quad (1)$$

$$\text{div} \mathbf{V} = 0; \quad (2)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T - c\rho \mathbf{V} T) + Q_v - Q_{melt}; \quad (3)$$

$$\text{div}(\sigma \text{grad} \varphi) = 0; \quad (4)$$

$$\mathbf{f} = -\mathbf{g} [\beta(T - T_{ref}) + \omega_g]; \quad Q_v = \sigma(\text{grad} \varphi)^2. \quad (5a, б)$$

Здесь \mathbf{V} – вектор скорости; T – температура шлакового расплава; p – давление; \mathbf{g} – ускорение силы тяжести; ω_g – относительное объемное газосодержание; T_{ref} – фиксированное значение температуры, от которого отсчитываются малые изменения плотности; φ – электрический потенциал; Q_v, Q_{melt} – удельные мощности источников Джоулева тепловыделения и источников теплопоглощения, вызванных плавлением замешиваемой в расплав шихты. Остальные обозначения – общепринятые (см. таблицу 1).

При выборе расчетной области принято во внимание симметричное расположение электродов в горизонтальном сечении шлаковой ванны (рис. 1), за счет этого в несколько раз уменьшено число ячеек дискретизации без ухудшения пространственного разрешения.

На поверхностях, образованных плоскостями симметрии, использовано граничное условие (ГУ) $\partial\phi/\partial\mathbf{n} = 0$, где \mathbf{n} – нормаль к поверхности, ϕ – общее обозначение для искомым компонентов вектора скорости u, v, w , температуры T или электрического потенциала φ (за исключением потенциала на поверхности симметрии между электродами).

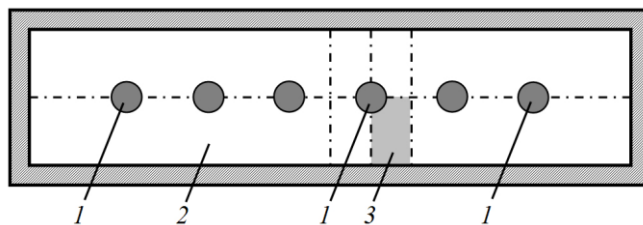


Рис.1 Вид в плане прямоугольной шестиэлектродной руднотермической электропечи:
1 – электроды, 2 – шлаковая ванна, 3 – расчетная область (закрашена)

На границах расчетной области были приняты следующие условия (рис. 2):

шихта неэлектропроводная;

электрический потенциал поверхности симметрии между электродами – нулевой;

на твердых поверхностях все компоненты вектора скорости равны нулю (условие «прилипания»);

на электроде и на поверхности раздела шлак-штейн вязкое трение отсутствует (условие проскальзывания);

температура поверхности раздела шлак-шихта и температура охлаждаемой боковой стенки равны температурам плавления шихты и шлака, соответственно;

на свободной от шихты поверхности шлаковой ванны вокруг электрода учтен лучистый теплообмен со сводом печи;

на нижней границе задан эффективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{эфф}$;

погруженная в расплав поверхность электрода теплоизолирована.

Последнее условие задано, исходя из следующих соображений.

Известно, что вследствие высокого контактного сопротивления электрод-шлак вблизи погруженной в расплав поверхности электрода образуется локальный температурный максимум. Наличие такого максимума позволяет выделить в шлаковом расплаве вокруг электрода поверхность, тепловой поток через которую равен нулю. Эта поверхность была принята в качестве граничной, а сложные для моделирования процессы, происходящие в контактном переходе электрод-шлак, исключены из рассмотрения.

В рудоплавильных и обеднительных печах, используемых в производстве тяжелых цветных металлов (Cu, Ni, Co), газовыделение в шлаке обусловлено главным образом окислением углерода на заглубленной в расплав поверхности электродов. Расчеты показали, что относительное объемное газосодержание ω_g в приэлектродной области, влияющее на величину выталкивающей силы (5а), не превышает 10 %.

Для вычисления среднего относительного объемного газосодержания ω_g получена формула $\omega_g = \dot{M}_g / (S_\Gamma U_\Gamma)$, где \dot{M}_g – интенсивность газовыделения, м³/с; S_Γ – площадь поперечного сечения газонасыщенной зоны вокруг электрода, U_Γ –

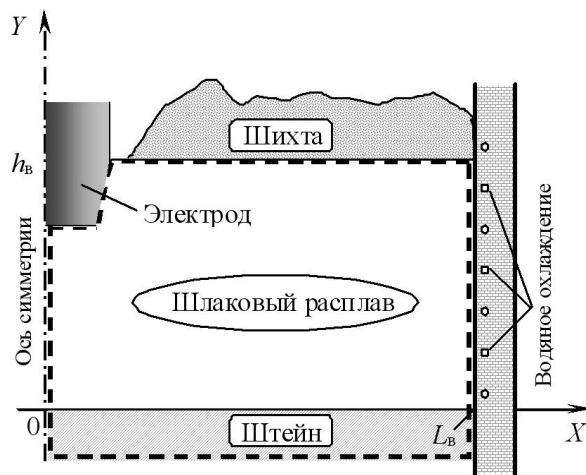


Рис.2 Вертикальное поперечное сечение расчетной области (обведено пунктиром)

вертикальная скорость движения пузырьков газа, складывающаяся из скорости их всплытия относительно расплава и скорости конвекции самого расплава.

Установившуюся скорость всплытия пузырьков газа, форма которых предполагалась сферической, найдена из условия баланса сил Архимеда, тяжести и сопротивления. Соответствующий коэффициент сопротивления для случая стесненного обтекания пузырьков аппроксимирован по литературным данным.

Методика вычисления слагаемого Q_{melt} рассмотрена в четвертой главе диссертации. Логическая связь «входных» и «выходных» параметров математической модели тепловой работы РТП показана на рис. 3.

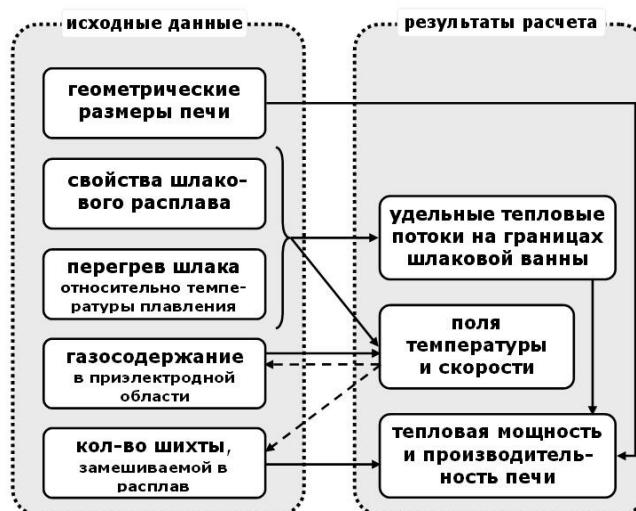


Рис.3 Логическая структура модели РТП

Третья глава посвящена расчету поля электрического потенциала и распределения источников Джоулева тепловыделения в шлаковой ванне РТП.

Уравнение для электрического потенциала (4) было решено отдельно от остальных уравнений системы. Для моделирования трехфазной схемы электропитания расчетная область была разделена только продольной плоскостью симметрии и включала в себя три соседних электрода.

В работе показано, что электрическое поле в РТП можно рассматривать как квазистационарное и подчиняющиеся правилу суперпозиции. Результирующее поле электрического потенциала представлено в виде суммы (наложения) полей, создаваемых каждым электродом в отдельности, задача линейная.

Распределение источников тепловыделения Q_v (5б) в шлаковой ванне руднотермической электропечи исследовано с учетом сдвига фаз на электродах при неодинаковом заглублении электродов в расплав.

В связи с тем, что численное моделирование конвекции в РТП требует минимизации расчетной области, эквивалентная электрическая схема трехэлектродной печи условно представлена в виде совокупности трех «ячеек», каждая из которых содержала один электрод. Электрический контакт «ячеек» друг с другом и со слоем штейна обеспечивали внутренние граничные поверхности, проходящие посередине между электродами и по поверхности раздела шлак-штейн (рис. 4, точки D , E , F , G и H).

Значения электрического потенциала на границах «ячеек» найдены путем осреднения мгновенных значений φ по площади граничных поверхностей с использованием в качестве весовой функции нормальной составляющей плотности тока.

Исследовано влияние геометрических параметров на активное электрическое сопротивление шлаковой ванны РТП. Для «ячейки» центрального электрода (см. рис. 4) при фиксированном (нулевом) потенциале на ее границах

выполнена серия расчетов, в которой относительные размеры расчетной области варьировались в пределах, охватывающих диапазон их изменения для печей с самоспекающимися ($d_3 \approx 1$ м) и с графитированными ($d_3 \approx 0,5$ м) электродами.

При обработке результатов все размеры шлаковой ванны были выражены в безразмерных единицах – долях диаметра электрода.

Из теории подобия следует, что сопротивление R_e связано с электрической проводимостью расплава $\sigma_{эфф}$ и масштабным размером d_3 соотношением

$$R_e = \frac{k}{\sigma_{эфф} \cdot d_3},$$

где k – коэффициент, зависящий только от безразмерных геометрических параметров шлаковой ванны.

Путем регрессионного анализа найдены корреляционные зависимости (6) и (7) для коэффициента k , аппроксимирующие результаты численного моделирования с погрешностью не более 3 %:

$$k = (8,94 - 12 \ln(h_3/h_e)) \cdot (10,5 - (3,16 - 0,524L_e)h_e), \quad (6)$$

при $1,25 \leq h_e \leq 2,0$; $2,25 \leq L_e \leq 3,5$; $0,2 \leq h_3/h_e \leq 0,5$; $B_e > 3$;

$$k = (8,3 - 12,9 \ln(h_3/h_e)) \cdot (10,1 - (1,35 - 0,058L_e)h_e), \quad (7)$$

при $2 \leq h_e \leq 4$; $5 \leq L_e \leq 8$; $0,2 \leq h_3/h_e \leq 0,6$; $B_e > 10$.

где d_3 – диаметр электрода, м; h_3 – относительное заглубление электрода в расплав (1 отн.ед. = d_3); h_e – отн. глубина шлаковой ванны; L_e – отн. расстояние между центрами электродов; B_e – отн. ширина шлаковой ванны печи; R_e – электрическое сопротивление печи в расчете на один (не крайний) электрод, мОм.

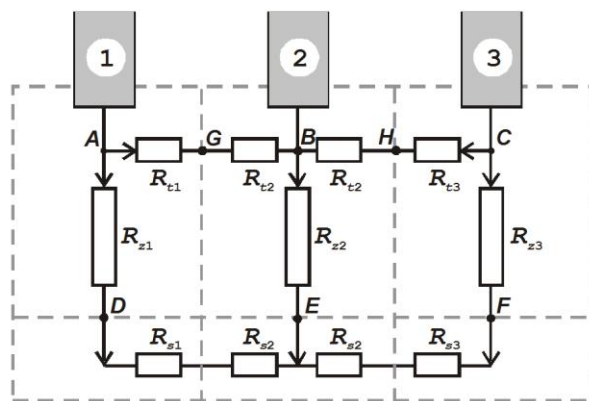


Рис.4 Схема замещения ванны РТП.

R_z – электрическое сопротивление току «звезды», R_t – току «треугольника»,
 R_s – току донной фазы (штейна)

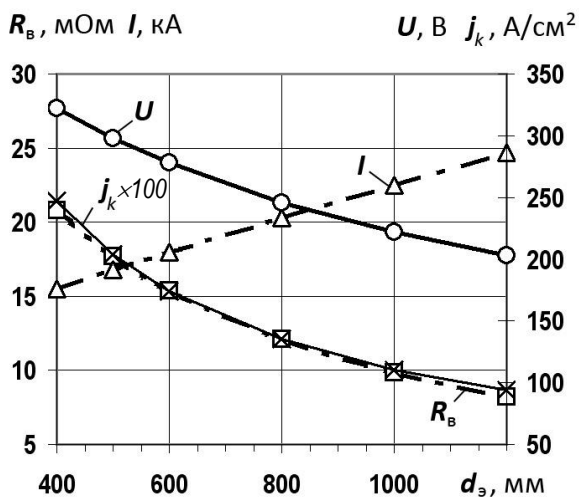


Рис.5 Зависимость электрических характеристик РТП от диаметра электродов

Влияние диаметра электродов на электрический режим и тепловыделение в прямоугольной руднотермической печи исследовано в диапазоне $d_э = 400 - 1200$ мм при зафиксированных размерах шлаковой ванны, неизменном заглублении электродов и постоянной мощности на один электрод $P_э = 5$ МВт. Обнаружено, что для принятых условий электрическое сопротивление шлаковой ванны $R_в$ прямо пропорционально плотности тока j_k через поверхность контакта электрод-шлак, а электрическая проводимость ванны $1/R_в$ линейно зависит от площади указанной поверхности (рис. 5).

В четвертой главе дано описание разработанного автором вычислительного алгоритма и приведены результаты тестирования машинного кода.

Для дискретизации трехмерной расчетной области применена оптимальная с точки зрения вычислительной эффективности одноблочная структурированная ортогональная сетка, построенная в цилиндрической системе координат. Аппроксимация уравнений сохранения (1) – (4) выполнена методом контрольного объема. Аппроксимация нестационарного члена в уравнениях переноса (1), (3) неявная с применением покоординатного расщепления. Программный код реализован в объектно-ориентированной среде программирования Delphi.

Уравнение Пуассона для поправки к давлению, дискретный аналог которого есть система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), решено прямым методом, оптимизированным для разреженных матриц ленточной структуры, с применением LU -разложения. Экономия машинного времени и оперативной памяти ЭВМ при решении СЛАУ достигается за счет того, что: 1) ленточная матрица коэффициентов формируется так, чтобы ширина ленты была минимальной; 2) диагонали ленты матрицы хранятся и обрабатываются в виде вектор-столбцов; 3) размер исходной матрицы уменьшается путем исключения узлов с ГУ 1-го рода; 4) LU -разложение выполняется только один раз перед началом цикла по времени.

В результате создан алгоритм, в котором переход на следующий временной слой осуществляется без итераций (при отсутствии итераций по нелинейности).

Машинный код, реализующий данный алгоритм, позволяет осуществлять расчеты нестационарных конвективных течений на одноблочных сетках размером

до $\sim 5 \cdot 10^5$ ячеек без использования многопроцессорных вычислительных систем (кластеров), располагая быстродействием персонального компьютера. Структура алгоритма расчета нестационарных полей скорости и температуры в ванне шлакового расплава РТП показана на рис. 6.

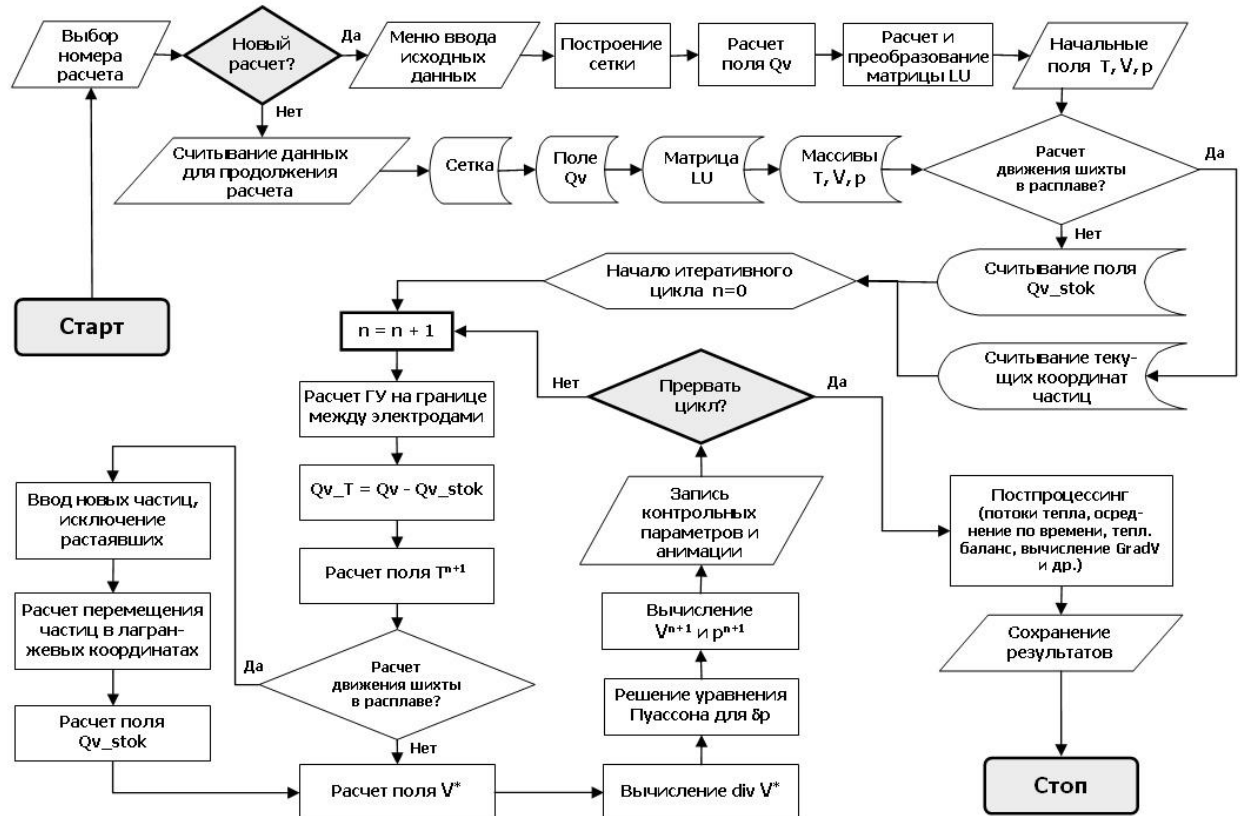


Рис.6 Структура вычислительного алгоритма

Тестирование машинного кода выполнено на ряде модельных задач, в числе которых естественная конвекция в замкнутой (кольцевой, прямоугольной) полости и поперечное обтекание кругового цилиндра.

Тестовое решение задачи о свободной конвекции в кольцевой полости при $Ra = 8,4 \cdot 10^4$, $Pr = 0,7$ приведено на рис. 7,а. Слева – изолинии функции тока, справа – изотермы с относительным шагом 0,05. Погрешность найденного численного решения по сравнению с результатом физического эксперимента $< 2\%$. На задаче о поперечном обтекании кругового цилиндра был протестирован расчет перемещения частиц пассивной примеси в лагранжевых координатах. На рис. 7,б показан пример тестового расчета (вихревая дорожка Кармана), выполненного на сетке $\sim 3 \cdot 10^4$ ячеек при числе Рейнольдса $Re = 140$, на рис. 7,в – визуализация аналогичного натурального течения (фото Sadatoshi Taneda¹).

¹ Ван-Дайк, М. (ред.) Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. – 184 с.

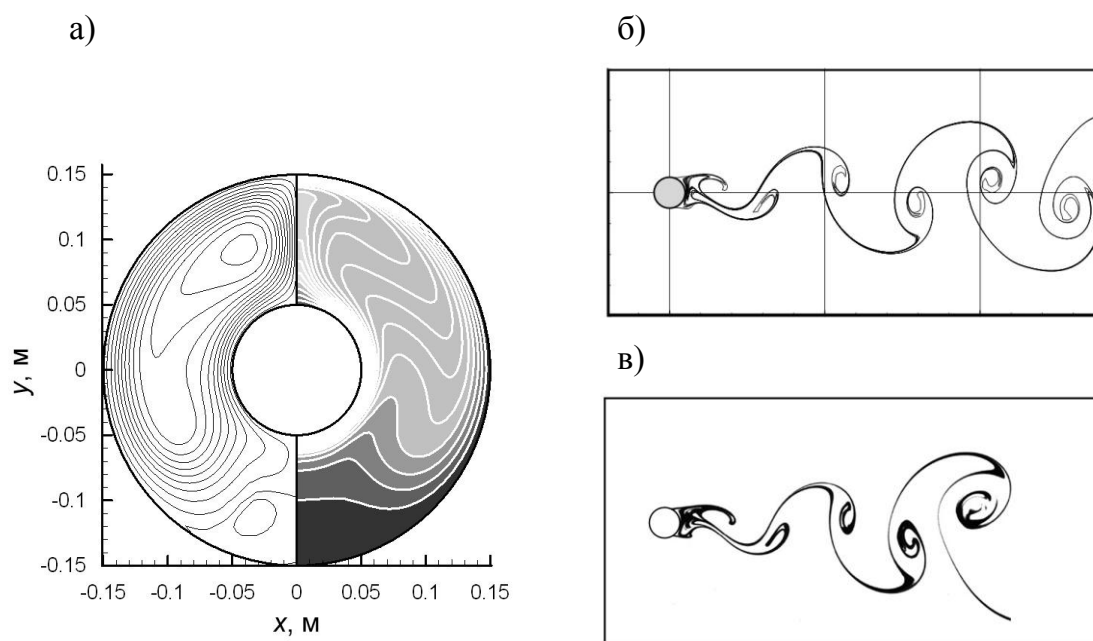


Рис.7 Примеры решений тестовых задач (пояснения в тексте)

Пятая глава. Приведены результаты апробации математической модели и кода для расчета конвективного теплообмена в шлаковой ванне РТП. Для апробации использованы данные промышленных испытаний на различной мощности печи РПЗ-33ШНО2 Дзержинского горно-металлургического комбината, заимствованные из монографии Г.С. Нуса². Для четырех режимов, различающихся вводимой в печь мощностью, глубиной шлаковой ванны и заглублением электродов, результаты моделирования с погрешностью не более 10 % совпали с опытными данными. Сделан вывод об адекватности численной модели исследуемому объекту.

При сравнении опытных и расчетных данных учтено падение напряжения в приэлектродном слое, которое составило от 40 до 50 % от полного напряжения «электрод-под». Падение напряжения в приэлектродном слое найдено из решения уравнения (4) при соответствующих действующей печи значениях тока через электрод и электрической проводимости шлакового расплава.

В соответствии с целью исследования для варьирования выбраны параметры, непосредственно влияющие на удельную мощность и тепловой КПД руднотермической печи (таблица 1). Физические свойства шлакового расплава были одинаковы для всех 40 вариантов расчета, образованных сочетаниями значений параметров, указанных в последнем столбце таблицы 1.

Рассмотрены РТП трех типов: «промышленный», соответствующий действующим печам с диаметром электродов $d_e = 1,1$ м, расстоянием между осями

² Нус Г.С. Рудно-термические шлаковые электропечи. М.: Энергоатомиздат, 2004. – 199 с.

электродов $L_B = 3,2$ м и шириной ванны $B_B = 6,6$ м; «с заменой электродов на графитированные» ($d_3 = 0,6$ м; $L_B = 3,2$ м; $B_B = 6,6$ м); и «перспективный», у которого диаметр электродов и горизонтальные размеры шлаковой ванны уменьшены приблизительно вдвое ($d_3 = 0,6$ м; $L_B = 1,8$ м; $B_B = 3,6$ м), удельная мощность увеличена в 3,2 раза, глубина ванны и вводимая в печь мощность оставлены без изменений.

Таблица 1

Варьируемые параметры и исходные данные

	Параметр	Обозначение	Размерность	Значения
Параметры РТП	Мощность на один электрод, вводимая в печь	P_3	$\frac{\text{МВт}}{\text{электрод}}$	от 2 до 12
	Диаметр электродов	d_3	м	1,1; 0,6
	Площадь пода печи в расчете на один электрод	$B_B \times L_B$	м×м	6,6×3,2 3,6×1,8
	Глубина шлаковой ванны	h_B	м	1,2; 1,5
	Относительное заглубление электродов в расплав	h_3/h_B	-	0,25; 0,35; 0,5
Свойства шлакового расплава	Плотность	ρ	кг/м ³	2700
	Температура плавления	$T_{пл}$	°С	1150
	Удельная теплоемкость	c	Дж/(кг·К)	1000
	Коэффициент теплопроводности	λ	Вт/(м·К)	2,0
	Коэффициент объемного расширения	β	10 ⁻³ 1/К	1,5
	Действующая электропроводность	σ	(Ом·м) ⁻¹	20
	Динамическая вязкость (при 1400 °С)	μ	Па·с	1,4

Во всех случаях температура в верхней части шлаковой ванны, так называемом ядре течения, предполагалась неизменной. Для поддержания ее на заданном уровне (1400 °С) рост вводимой в печь мощности скомпенсирован увеличением массы шихты, замешиваемой в расплав, что легко осуществимо в рамках математической модели.

На основании литературных данных гранулометрический состав шихты был представлен тремя фракциями: фракция 1 – диаметр частиц 6 мм, массовая доля 35 %; фракция 2 – 12 мм, 45 %; фракция 3 – 20 мм, 35 %, соответственно.

Расчет каждого из вариантов выполнен до достижения квазистационарного теплового состояния, определяемого совокупностью следующих признаков: стабильная температура нижних слоев шлаковой ванны, установившаяся средняя по объему скорость конвекции, малые колебания теплового баланса около отметки 100 % с амплитудой менее 2 %.

Сравнительный анализ квазистационарных полей температуры и скорости расплава, плавления замешиваемой в расплав шихты в диапазоне изменения удельной мощности печи 140 – 1800 кВт/м² показал что:

- Поля температуры и скорости в шлаковой ванне РТП взаимосвязаны. Интенсивное перемешивание расплава сглаживает даже сильную неоднородность источников тепловыделения и теплопоглощения, в результате ядро течения становится практически изотермичным (рис. 8,а). В расположенной ниже ядра зоне стратификации конвекция ослаблена, и характер изменения температуры по высоте близок к линейному (рис. 8,б).

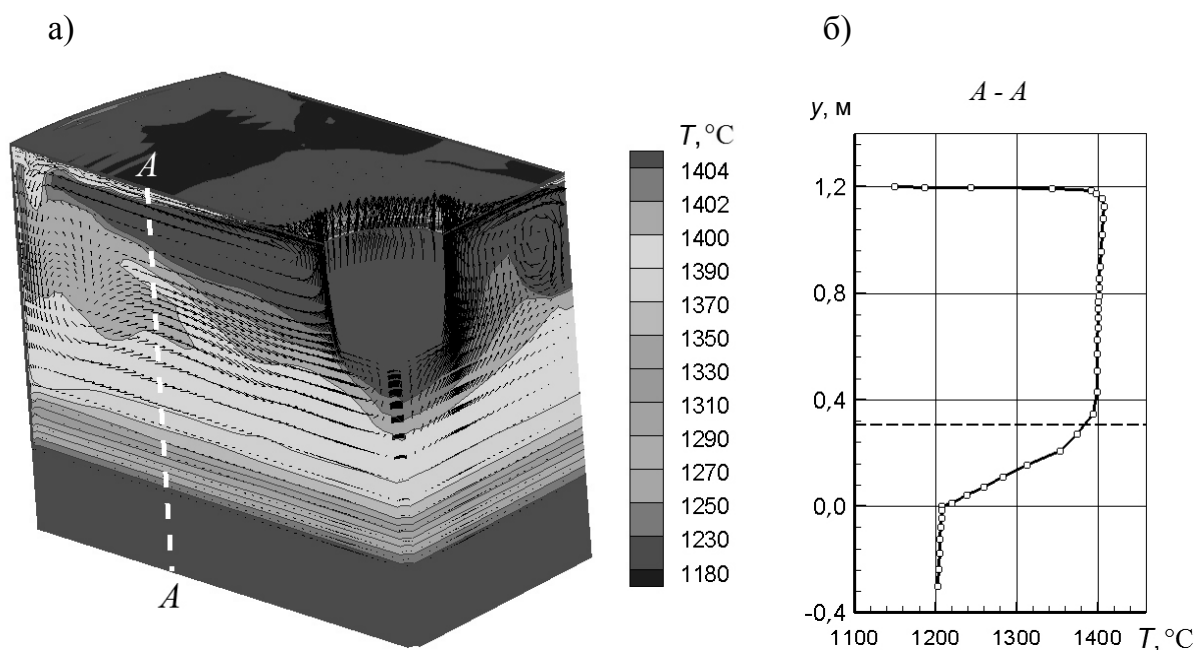


Рис.8 Распределение температуры и скорости в шлаковой ванне (а); профиль температуры в вертикальном сечении (б). $h_b = 1,2$ м; $B_b \times L_b = 3,6 \times 1,8$ м; $h_s/h_b = 0,35$; $P_s = 5$ МВт/эл-од

- Циркуляция шлака в РТП поддерживается энергией восходящего потока, генерируемого силами плавучести вблизи погруженной в расплав поверхности электродов. Максимальная расчетная скорость конвекции 0,8 м/с. На удалении от электродов течение нестационарное, имеет вихревой характер, наблюдается гидродинамическая неустойчивость Рэлея – Тейлора.

- Приэлектродная зона, объем которой зависит, прежде всего, от площади смоченной расплавом поверхности электрода, исполняет роль «насоса», производительность которого определяет расход течения шлакового расплава в сечении РТП. Обнаружено, что на среднерасходную и среднеобъемную скорости расплава влияет не только объем приэлектродной зоны, но также абсолютная и удельная мощность печи. Показано, что в приэлектродной зоне шлаковой ванны достигают

максимума: удельная мощность тепловыделения, температура и скорость расплава, градиент скорости (мера неоднородности векторного поля), темп плавления (схода) шихты.

- В процессе плавления замешиваемой в расплав шихты распределение мелких и средних фракций по объему расплава является существенно неравномерным. Время плавления шихты, как правило, меньше характерного времени циркуляции расплава, поэтому большая часть частиц шихты и связанный с ними источник объемного теплопоглощения сконцентрированы вблизи верхней границы шлаковой ванны.

- Удельный тепловой поток на охлаждаемые стены печи, работающие в гарнисажном режиме, определяется свойствами и температурой расплава и практически не зависит от скорости течения в ядре. Причина в том, что при числах Прандтля, свойственных расплавленному шлаку ($\sim 10^2$), тепловой пограничный слой расположен внутри динамического вязкого подслоя и не воспринимает происходящих далеко за его пределами возмущений скорости.

- Интенсивность конвекции, количественной характеристикой которой является средняя по объему скорость шлакового расплава, оказывает косвенное влияние на тепловые потери со стен и пода печи. Это влияние состоит в том, что с увеличением мощности и (или) заглубления электродов нижняя граница ядра течения смещается вниз, ближе к штейну, что совпадает с данными натурных измерений и результатами «холодного» физического моделирования.

- На установившуюся температуру штейна оказывают влияние три фактора: 1) температура шлака в ядре течения; 2) высота зоны стратификации (расстояние от нижней границы изотермического ядра до границы со штейном); 3) плотность теплового потока на подине.

- Установлено, что увеличение удельной мощности $P_{уд}$ с 320 до 500 кВт/м² для печи с площадью пода на один электрод 21,1 м² при высоте шлаковой ванны $H_b = 1,5$ м снижает долю учтенных в расчете тепловых потерь с 10 до 6,8 % (при $P_{уд} = 680$ кВт/м² относительные тепловые потери составили 5 %). Сравнительный расчет проектной РТП с графитированными электродами диаметром 0,6 м и площадью пода на один электрод 6,5 м² показал, что при идентичных предыдущему случаю высоте шлаковой ванны и количестве замешиваемой в расплав шихты величина $P_{уд}$ составила 720 и 1270 кВт/м², а доля учтенных тепловых потерь уменьшилась до 7,4 и 3,9 %, соответственно.

В шестой главе сформулирована и решена методом конечных элементов внутренняя задача теплообмена для кессонированной стенки с гарнисажем. Задача

имела целью определить минимальное безопасное число охлаждающих элементов на единицу площади охлаждаемой поверхности при заданной плотности теплового потока со стороны расплава, а также выяснить условия, при которых отклонения границы «расплав-гарнисаж» от плоскости относительно невелики.

Двухмерная расчетная область представляла собой часть поперечного сечения стенки РТП, ограниченную по горизонтали поверхностями симметрии (рис. 9).

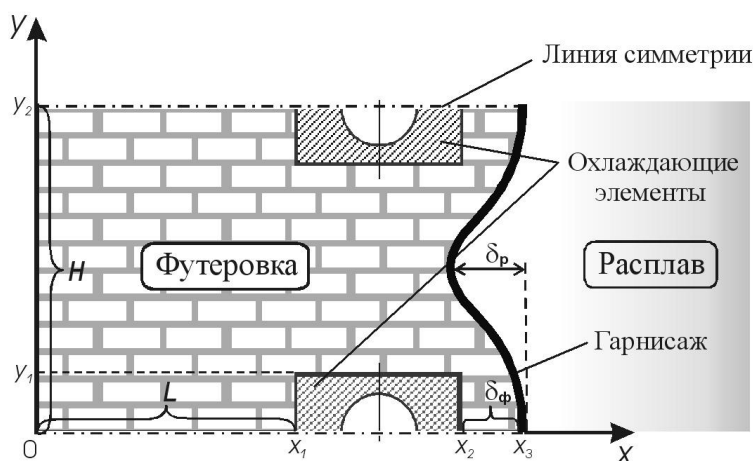


Рис.9 Расчетная область к задаче о тепловом разрушении водоохлаждаемой стенки РТП

Тепловое разрушение охлаждаемых стен исследовано в диапазоне изменения тепловых нагрузок $q = 25 - 105 \text{ кВт/м}^2$. Подтверждено, что наибольшее влияние на величину разрушения, определяемую глубиной каверны δ_p , оказывает расстояние между охлаждающими элементами H . На рис. 10 показаны результаты расчетов, выполненных для охлаждающих труб поперечным сечением $65 \times 65 \text{ мм}$ (обозначения те же, что на рис. 9).

Зависимость $\delta_p(q)$ при фиксированном H имеет асимптотический характер: при увеличении тепловой нагрузки на стены печи производная $\delta'_p(q) \rightarrow \infty$ (см. рис. 10). Определена предельная тепловая нагрузка, которую способна выдерживать футеровка стен при заданных размерах охлаждающих элементов, как функция расстояния между ними.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

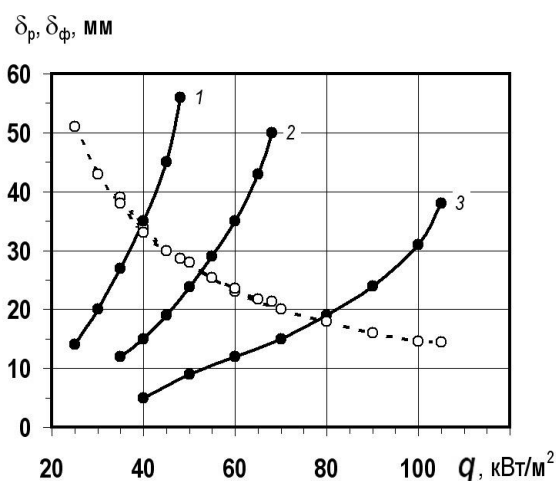


Рис.10 Зависимость величины разрушения футеровки от тепловой нагрузки.
1 – $H = 190 \text{ мм}$; 2 – 160 ; 3 – 130

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При помощи созданной математической модели и разработанного на ее основе программного кода выполнено исследование высокоинтенсивных режимов работы печи на удельной мощности до 1800 кВт/м^2 . Согласно результатам моделирования двукратное увеличение удельной мощности РТП приводит к снижению доли относительных тепловых потерь в 1,5–2 раза, если температуру шлака поддерживать постоянной за счет регулируемой подачи в него шихты.

2. Выявлен новый качественный эффект, связанный с изменением высоты ядра течения, который состоит в следующем.

При повышении удельной мощности РТП возрастает доля тепловыделения в нижней части ванны расплава, где отсутствует объемное теплопоглощение, обусловленное плавлением шихты; данный эффект усиливается с увеличением относительного заглубления электродов. В результате разогрева подэлектродного слоя область интенсивной конвекции (изотермическое ядро течения) постепенно распространяется на весь объем шлаковой ванны. Нормальная работа печи в таких условиях невозможна: отсутствие в ванне расплава малоподвижной буферной зоны с устойчивой температурной стратификацией по высоте вызывает перегрев штейна, затрудняет разделение продуктов плавки, снижает тепловой КПД, увеличивает износ пода печи.

Для исследованных типов руднотермических печей предельные в указанном смысле значения удельной мощности при глубине шлаковой ванны 1,2 м и относительном заглублении электродов 0,35 составили: для промышленной РТП $\sim 650 \text{ кВт/м}^2$; для РТП с полноразмерной шлаковой ванной и электродами диаметром 0,6 м $\sim 880 \text{ кВт/м}^2$; для перспективной РТП с графитированными электродами и уменьшенными размерами шлаковой ванны $\sim 1800 \text{ кВт/м}^2$. Максимальный удельный проплав шихты в таких условиях достигает 35, 45 и $100 \text{ т/(м}^2 \cdot \text{сут)}$, соответственно.

3. Предложено физическое истолкование взаимосвязи объема приэлектродной зоны и удельной мощности руднотермической печи с факторами, влияющими на скорость обеднения шлака.

4. Влияние диаметра электродов на электрический режим и тепловыделение в прямоугольной РТП исследовано в диапазоне $d_3 = 400 - 1200 \text{ мм}$. Показано, что возникновение дугового разряда является наиболее вероятным фактором, препятствующим практическому использованию графитированных электродов с $d_3 < 450 \text{ мм}$ на печах мощностью, превышающей 5 МВт/электрод .

5. Получена новая аналитическая зависимость активного электрического сопротивления РТП от геометрических параметров ванны шлакового расплава.

Указанная зависимость применима в диапазоне изменения относительных размеров шлаковой ванны РТП, который не был охвачен ранее.

6. Определена предельная тепловая нагрузка на футеровку стен печи, выполненную из хромитопериклазового кирпича и охлаждаемую кессонами сечением 230×65 мм, как функция расстояния между центрами кессонов H . В диапазоне $H = 130 - 190$ мм расчетная максимальная плотность теплового потока, выдерживаемого охлаждаемой стенкой, снижается со 100 до 45 кВт/м².

По результатам диссертации опубликовано 6 работ.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Плетнев, А.А. Математическое моделирование тепловой работы многоэлектродной руднотермической электропечи / А.А. Плетнев // Вестник молодых ученых. Сер. Технические науки. – СПб.: Изд-во Балтийского государственного техн. ун-та. – 1999. – №2(6). – с. 34–42.

2. Плетнев, А.А. Численное моделирование электрического поля и сопротивления ванны многошлаковой руднотермической печи / А.А. Плетнев, М.Р. Русаков, В.А. Талалов // Компьютерное моделирование при оптимизации технологических процессов электротермических производств: сб. трудов научно-техн. совещания "Электротермия - 2000". – СПб.: Изд-во СПбГТИ, 2000. – с.317–323.

3. Плетнев, А.А. Математическое моделирование разрушения футеровки охлаждаемой стенки металлургической печи / А.А. Плетнев // Цветные металлы. – 2004. – №8. – с. 114–117.

4. Pletnev, A. Numerical simulation of the operating regime of multislag ore electric furnace/ Alexaner A. Pletnev, Victor A. Talalov // Advances of Heat Transfer. Proceedings of the 5th Baltic Heat Transfer Conference (September 19–21, 2007, Saint-Petersburg, Russia). – Vol.1. – pp. 449–455.

5. Плетнев, А.А. Математическая модель тепло-массопереноса в ванне шлакового расплава многоэлектродной руднотермической электропечи / А.А. Плетнев, В.А. Талалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – №1. – с. 36–44.

6. Плетнев, А.А. Расчет тепловыделения и электрического сопротивления ванны шлакового расплава руднотермической электропечи / А.А. Плетнев // Электрометаллургия. – 2012. – №6. – с. 7–14.