

*На правах рукописи*

Шатунов Алексей Николаевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ  
СИСТЕМ С РАЗРЕЗНЫМ ПРОВОДЯЩИМ ТИГЛЕМ  
ПРИ ПЛАВКЕ ОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 05.09.10 – Электротехнология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)”

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор, Блинов Юрий Иванович.

Официальные оппоненты:  
доктор химических наук, профессор, Удалов Юрий Петрович.  
доктор технических наук, профессор, Гончаров Вадим Дмитриевич.

Ведущая организация – ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт токов высокой частоты им. В.П. Вологодина”, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «11» декабря 2008 года в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд. 150.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 1-й уч. корпус, отдел аспирантуры и докторантуры.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

А.Д. Курмашев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Оксиды металлов образуют целые классы важнейших технологических материалов, которые определяют уровень развития энергетики, металлургии, машиностроения, связи и других областей. Особенный интерес представляют тугоплавкие оксиды с температурами плавления более  $1800^{\circ}\text{C}$ . Они обладают такими свойствами как: высокие прочность, твёрдость и износостойчивость; инертность и сопротивление коррозии даже при температурах, близких к точке плавления. Для ряда применений, например, выращивания монокристаллов выдвигаются повышенные требования к чистоте материалов.

При синтезе оксидных материалов применяются различные методы нагрева, большинство из которых электрические. Одним из перспективных способов получения высокочистых тугоплавких оксидов является индукционная гарнисажная плавка, совмещающая бесконтактный метод нагрева и незагрязняющий способ плавки. Одним из вариантов реализации гарнисажной плавки является использование разрезного металлического водоохлаждаемого тигля. Данный способ получил название индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ).

Обычно жидкофазный синтез оксидных соединений характеризуется высокой температурой расплава и окислительными условиями плавки. Однако, отсутствие достоверных данных о свойствах оксидных расплавов при высоких температурах, затрудняет создание технологического оборудования для жидкофазного синтеза новых веществ. Одним из таких свойств является удельное сопротивление, которое совместно с другими характеристиками индукционной системы определяет распределение источников тепла и опосредованно влияет на температурное и гидродинамическое состояние ванны расплава. Отсутствие данных о свойствах расплава также затрудняет управление режимами печи для получения заданных параметров плавки.

Существующие контактные методы определения удельного сопротивления расплавов оксидов на воздухе надёжны только при температуре до  $1800^{\circ}\text{C}$ . Бесконтактные методы либо не предназначены для оксидов, либо имеют высокую погрешность. Поэтому актуальной задачей является создание метода для определения удельного сопротивления высокотемпературного расплава.

**Цель диссертационной работы** – исследование энергетических характеристик индукционных печей с разрезным водоохлаждаемым тиглем и определение удельного электрического сопротивления расплавов оксидных материалов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Математическая модель электромагнитного поля (ЭМП) индукционной системы с разрезным проводящим тиглем;
- Энергетические характеристики индукционной печи с разрезным проводящим тиглем;

- Бесконтактный метод определения удельного сопротивления высокотемпературных расплавов на основе ИПХТ и решения обратной задачи электромагнитного поля;
- Температурные зависимости удельных сопротивлений расплава  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и системы  $\text{UO}_2 - \text{ZrO}_2 - \text{Zr}$ ;

**Методы исследования.** Исследование высокочастотных электромагнитных процессов выполнено с использованием теории ЭМП, натуральных и численных экспериментов. Расчёты выполнены с использованием программного пакета ANSYS. Обработка экспериментальных данных производится с применением программ EXCEL и MATHCAD. Оценка адекватности разработанной математической модели и метода определения удельного сопротивления выполнена на основе сравнения результатов натуральных и численных экспериментов, а также сопоставления полученных данных с опубликованными материалами других авторов.

**Достоверность научных положений, результатов и выводов** диссертации обусловлена корректным использованием теории ЭМП; применением современных компьютерных средств и программных комплексов; использованием прецизионной измерительной аппаратуры; экспериментальным подтверждением результатов, полученных теоретическим путём.

**Научная новизна:**

- Разработана двумерная математическая модель ЭМП индукционной печи с разрезным проводящим тиглем в дифференциальной постановке;
- Получены энергетические характеристики индукционной печи с разрезным проводящим тиглем (зависимости электрических мощностей в расплаве и тигле от удельного сопротивления расплава и от соотношения высоты расплава и высоты индуктора);
- Решены обратные задачи ЭМП в постановках на основе баланса мощностей и баланса импедансов. Проведён анализ погрешности решения обратной задачи;
- Получены температурные зависимости удельного сопротивления расплавов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2300 – 2950°C) и системы  $\text{UO}_2 - \text{ZrO}_2 - \text{Zr}$  (2150 – 2750°C).

**Практическая ценность:**

- Разработаны прикладные программы для расчёта электромагнитных параметров индукционной системы с разрезным проводящим тиглем (свид. о регистрации программы для ЭВМ №2007614478) и для определения удельного сопротивления материалов на основе решения обратной задачи ЭМП (свид. о регистрации программы для ЭВМ №2007614479), основанные на предложенной математической модели;
- Предложен бесконтактный метод измерения удельного сопротивления высокотемпературных расплавов, основанный на технологии ИПХТ;

- Даны рекомендации по выбору параметров индукционных систем с целью минимизации погрешностей при измерении удельного сопротивления высокотемпературных расплавов;
- Разработаны датчики для измерения напряжения на индукторе до 10 кВ и тока индуктора до 500 А в диапазоне частот 1.7 – 1.9 МГц.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы используются в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (СПбГЭТУ) в учебном процессе по дисциплинам: «Электротехнологические установки и системы», «Моделирование электротехнологических процессов», «Компьютерные технологии в науке и образовании», «Современные методы расчёта и проектирования электротехнологических установок».

Полученные результаты использовались для теоретической поддержки работ по моделированию тяжёлых аварий атомных реакторов в НИТИ им. Александрова г. Сосновый бор в рамках проекта METCOR 833.2 («Исследование взаимодействия расплава кориума со сталью корпуса реактора АЭС»).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева» (АРИН-2005, Санкт-Петербург); на международной научно-технической конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (ЭЭЭ-2005, Новосибирск); на Корейско-Российском международном симпозиуме (KORUS-2005, Новосибирск); на международном научном colloquium «Modelling for Material Processing» (Рига-2006); на внутривузовской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов в СПбГЭТУ в 2006 году и на Всероссийской научной конференции с международным участием «Руднотермические печи» (Электротермия-2006, Санкт-Петербург).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 2 в журналах из перечня, рекомендованного ВАК.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 77 наименований, и приложения. Основная часть работы изложена на 132 страницах машинописного текста. Работа содержит 62 рисунка и 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность исследований в диссертационной работе, формулируются цель и задачи работы, объясняется её структура, рассматривается её научная и практическая значимость, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** показана роль оксидных материалов в различных отраслях промышленности, дан обзор методов плавки высокотемпературных оксидов и приведены данные по удельным сопротивлениям расплавов оксидов.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели ЭМП в индукционной системе с разрезным проводящим тиглем и исследованию энергетических характеристик индукционной печи.

Основной проблемой при численном исследовании ИПХТ становится учёт разрезного тигля, что в общем случае требует решения трёхмерной электромагнитной задачи. Кроме того, система ИПХТ включает большое количество дополнительных элементов конструкции, что также усложняет численную модель. Поэтому была предложена двумерная математическая модель ЭМП для исследования процессов при ИПХТ, представленная в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \frac{\dot{A}}{R^2} \right) - j\omega\sigma\dot{A} = J_{\Omega_1} + J_{\Omega_2} \\ J_{\Omega_2} = -j\omega\sigma\dot{A} \\ \text{div}(J_{\Omega_2}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Преимуществами дифференциального подхода являются: 1) возможность использования стандартных программных средств для исследования электромагнитных систем. 2) простота учёта магнитных элементов конструкции системы.

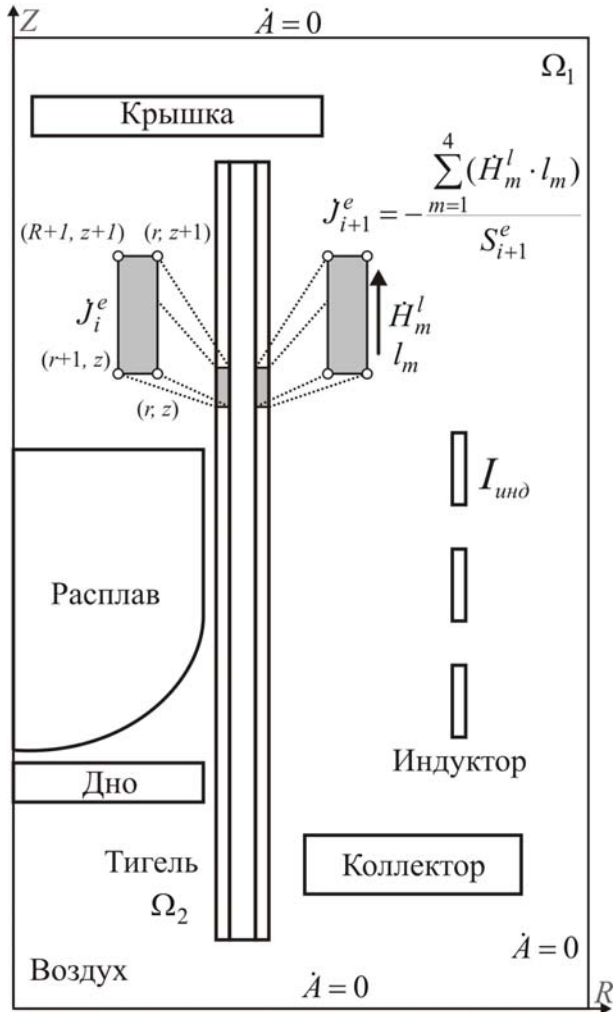


Рис. 1. Схема математической модели

Идея метода заключается в замене тигля осесимметричной областью  $\Omega_2$  (рис. 1) с источниками тока. Для этих источников вводится условие  $\text{div}(J_{\Omega_2}) = 0$ . Значения вторичных источников тока  $J_i^e$  в области  $\Omega_2$  вычисляются по закону полного тока. Для этого вычисляется напряжённость магнитного поля  $H_m^l$  на поверхности элементов области  $\Omega_2$ . Учёт тигля приводит к решению итерационным методом. Предложенная модель реализована в виде программы на языке APDL в пакете ANSYS v.10.0. Результатом работы модели являются потери в тигле и других элементах индукционной системы, импеданс индуктора и распределение источников тепла в

Идея метода заключается в замене тигля осесимметричной областью  $\Omega_2$  (рис. 1) с источниками тока. Для этих источников вводится условие  $\text{div}(J_{\Omega_2}) = 0$ . Значения вторичных источников тока  $J_i^e$  в области  $\Omega_2$  вычисляются по закону полного тока. Для этого вычисляется напряжённость магнитного поля  $H_m^l$  на поверхности элементов области  $\Omega_2$ . Учёт тигля приводит к решению итерационным методом. Предложенная модель реализована в виде программы на языке APDL в пакете ANSYS v.10.0. Результатом работы модели являются потери в тигле и других элементах индукционной системы, импеданс индуктора и распределение источников тепла в

загрузке.

При помощи разработанной математической модели были исследованы влияние высоты и удельного сопротивления расплава на потери в разрезном тигле (рис. 2), соотношение потерь в расплаве и тигле (рис. 3) и электрический КПД индуктора. На рис. 2 показано, что наличие расплава снижает потери в тигле. Из рис. 3 видно, что при ярко выраженном поверхностном эффекте ( $R_{\text{загр}}/\Delta_{\text{загр}} > 12$ ) до половины вводимой в систему мощности выделяется в тигле.

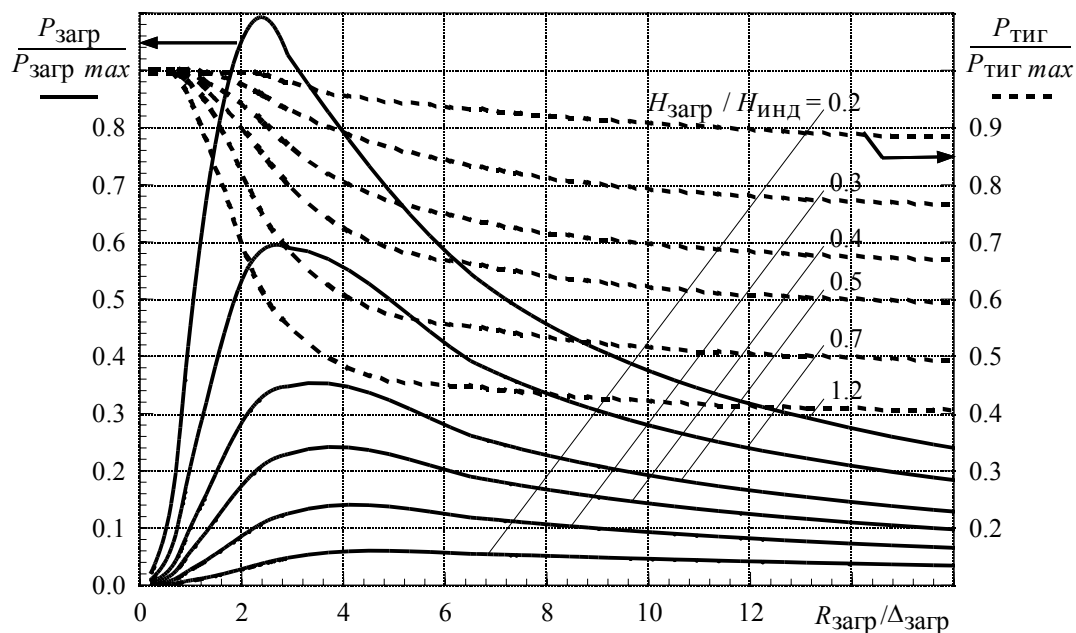


Рис. 2. Влияние параметров расплава на электрические мощности, выделяющиеся в расплаве и разрезном тигле

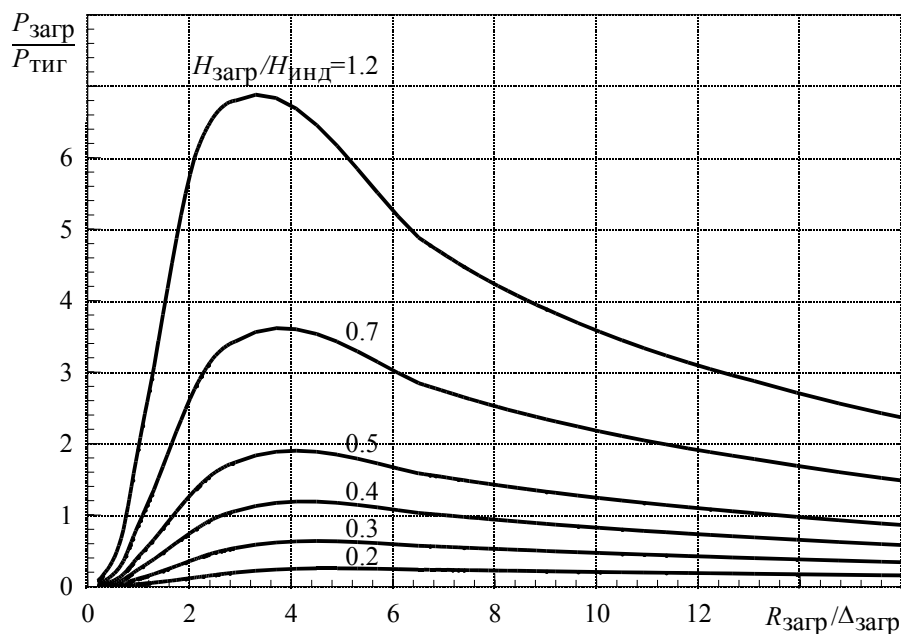


Рис. 3. Соотношение электрических мощностей, выделяющихся в расплаве и тигле

Поэтому тигель необходимо учитывать в расчётах электромагнитной системы. Простым способом измерений потерь в тигле и мощности в расплаве является калориметрирование. Но при калориметрировании измеряется сумма электрических потерь в тигле и тепловых потерь в тигель от расплава. Их разделение возможно только при использовании математической модели. Анализ систем при ИПХТ оксидов показал, что электрический КПД системы с учётом потерь в тигле составляет не более 75% при  $R_{\text{загр}}/\Delta_{\text{загр}} = 3.5$  и  $H_{\text{загр}}/H_{\text{инд}} = 1.2$  и не более 50% при  $R_{\text{загр}}/\Delta_{\text{загр}} = 14$  и  $H_{\text{загр}}/H_{\text{инд}} = 1.2$ .

**В третьей главе** описывается стенд, разработанный для исследования режимов работы индукционной печи с разрезным проводящим тиглем и определения удельного сопротивления расплавов.

Исследовательский стенд (рис. 4) состоит из лампового генератора ВЧИ-11-60/1.76, индукционной печи с холодным тиглем и системы сбора данных, которая позволяет регистрировать следующие параметры: потери в элементах индукционной системы; ток, напряжение и коэффициент мощности индуктора; частоту тока индуктора; температуру расплава, а также производить видеосъёмку зеркала расплава.

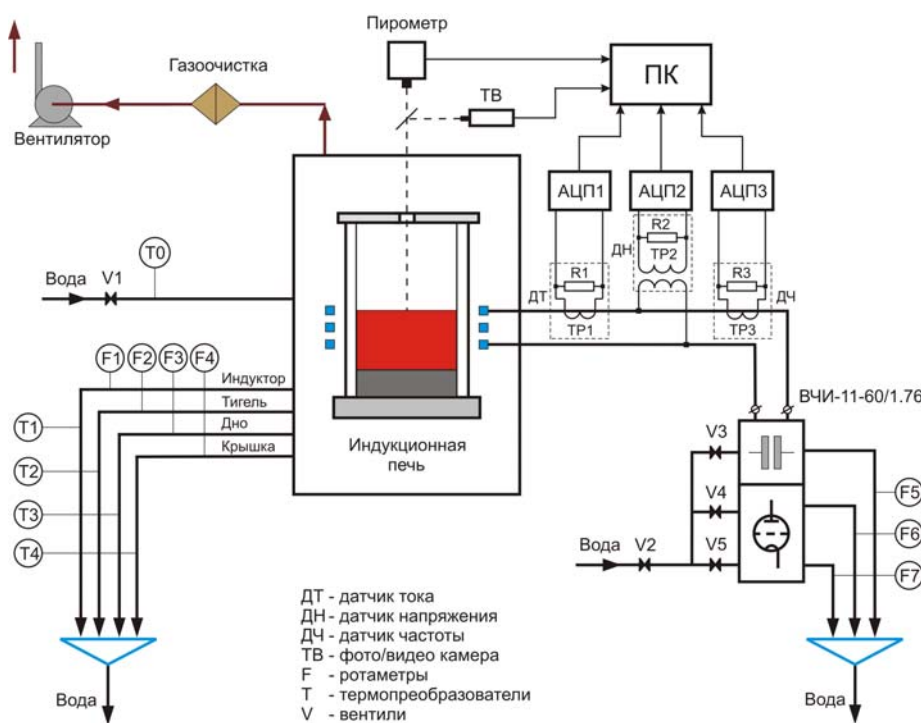


Рис. 4. Технологическая схема исследовательского стенда

Измерение электрических потерь производится путём калориметрирования. Для этого в конструкции индукционной системы предусмотрены водоохлаждаемые крышка и дно тигля. Для уменьшения неучтённых потерь поверхность индуктора и наружные поверхности тигля и крышки теплоизолируются. В системе калориметрирования используются промышленно выпускаемые крыльчаточные ротаметры и датчики температуры на основе дифференциальных термоэлектрических преобразователей медь-константан



(тип Т) и термосопротивлений Pt-100 класса А. Для измерения температуры поверхности расплава применяется двухволновый радиационный пирометр.

Для измерения тока и напряжения индуктора были разработаны датчики со следующими характеристиками: частотный диапазон 1.7–1.9 МГц; гальваническая развязка выходного сигнала; выходное сопротивление 50 Ом; длительный режим работы. Датчики позволяют проводить измерения при токе до 500 А и напряжении до 10 кВ.

Датчик напряжения откалиброван на основе измерения напряжения на индукторе статическими вольтметрами С53 с классом точности 0.5 и частотным диапазоном до 15 МГц. Датчик тока откалиброван на основе измерения активного сопротивления  $r_{\text{инд}}$  и индуктивности пустого индуктора  $L_{\text{инд}}$ , напряжения на индукторе  $|\dot{U}_{\text{инд}}|$  и частоты тока индуктора  $f$ . Тогда ток индуктора вычисляется по формуле:

$$|\dot{I}_{\text{инд}}| = \frac{|\dot{U}_{\text{инд}}|}{\sqrt{r_{\text{инд}}^2 + (2\pi f L_{\text{инд}})^2}} \quad (2)$$

Величины  $r_{\text{инд}}$  и  $L_{\text{инд}}$  на частоте  $f$  измеряются с помощью прецизионного LCR – метра (QuadTech 7600 Precision LCR Meter Model B).

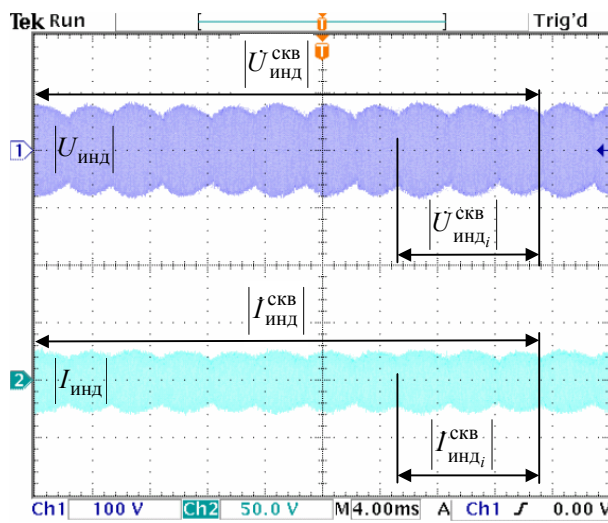


Рис. 5. Форма сигналов напряжения и тока на индукторе

Регулировка напряжения на аноде лампы производится с использованием широтно-импульсного управления углом открытия тиристоров. Это приводит к трёхсотгерцовой модуляции рабочего высокочастотного сигнала (рис. 5). Поэтому действующее значение синусоидального сигнала, эквивалентного по энергии реальному сигналу со всем спектром гармоник, вычисляется по формулам:

$$|I_{\text{инд}}^{\text{СКВ}}| = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \int (I(t))^2 dt}}{N}, \quad |U_{\text{инд}}^{\text{СКВ}}| = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \int (U(t))^2 dt}}{N},$$

где  $N$  – число периодов сигнала  $|U_{\text{инд}_i}^{\text{СКВ}}|$  или  $|I_{\text{инд}_i}^{\text{СКВ}}|$  (рис. 5).

Определение коэффициента мощности индуктора производится двумя способами:

1) На основе измерения активной и полной мощностей индуктора:

$$\cos(\varphi_{\text{инд}}) = \frac{P_{\text{актив}}}{P_{\text{полн}}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{актив}}$  определяется калориметрированием, а  $P_{\text{полн}} = |U_{\text{инд}}^{\text{СКВ}}| \cdot |I_{\text{инд}}^{\text{СКВ}}|$  – произведением напряжения и тока индуктора.

2) На основе прямого измерения разности фаз. Для уменьшения погрешности измерения используется метод статистической обработки сигналов. Зависимости напряжения и тока аппроксимируются гармоническими функциями:

$$\begin{aligned} U_{\text{инд}} &= U_{\text{инд}m} \cdot \sin(\omega t + \varphi_U), \\ I_{\text{инд}} &= I_{\text{инд}m} \cdot \sin(\omega t + \varphi_I). \end{aligned}$$

Тогда коэффициент мощности вычисляется как:

$$\cos(\varphi_{\text{инд}}) = \cos((\varphi_U - \varphi_I) - \varphi_S),$$

где  $\varphi_U$  – фаза сигнала с датчика напряжения индуктора,  $\varphi_I$  – фаза сигнала с датчика тока индуктора,  $\varphi_S$  – фазовый сдвиг, вносимый датчиками напряжения и тока. Фазовый сдвиг каждого датчика определяется при его калибровке.

**В четвёртой главе** описывается метод, разработанный для определения удельного сопротивления высокотемпературных расплавов. Приводятся результаты исследования удельного сопротивления расплавов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и системы  $\text{UO}_2 - \text{ZrO}_2 - \text{Zr}$ .

В большинстве случаев удельное сопротивление расплавов определяют с помощью контактных методов. Однако в окислительной среде их применимость ограничивается температурой 1600 – 1800°C, выше которой начинается активное взаимодействие расплава с материалом тигля и измерительными электродами. Инертная среда позволяет поднять температуру исследований до 3000°C. Для определения удельного сопротивления расплавов при высоких температурах на воздухе существуют бесконтактные методы, но большинство из них предназначается для исследования расплавов металлов. Предпринимались попытки оценить удельное сопротивление оксидных расплавов, используя параметры индукционной плавки в холодном тигле, но данный метод, по оценке авторов, имеет большую погрешность. Поэтому предложенный метод основан на получении и удержании расплава с заданной температурой в индукционной печи с разрезным тиглем; измерении тепловых и электрических параметров плавки и решении обратной задачи ЭМП.

Обратная задача основана на решении системы уравнений ЭМП и условии, обеспечивающем её решение при неизвестном удельном сопротивлении расплава. Наиболее подходящими параметрами печи стали суммарная мощность индукционной системы и импеданс индуктора. Определение ак-

тивной мощности в индукционной печи производится калориметрированием или произведением  $P_{\text{акт}} = |\dot{U}_{\text{инд}}| \cdot |I_{\text{инд}}| \cdot \cos \varphi_{\text{инд}}$ . Импеданс индуктора рассчитывается как  $|Z_{\text{инд}}| = |\dot{U}_{\text{инд}}| / |I_{\text{инд}}|$ . Поэтому предлагаются три постановки обратной задачи: две на основе баланса мощностей и одна – на основе баланса импедансов. Системы уравнений при этом имеют вид:

$$\begin{cases} P_{\text{дно}}^{\text{э}} + P_{\text{тиг}}^{\text{э}} + P_{\text{кр}}^{\text{э}} + P_{\text{загр}}^{\text{э}} = P_{\text{дно}}^{\text{т}} + P_{\text{тиг}}^{\text{т}} + P_{\text{кр}}^{\text{т}} \\ \left\{ \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \frac{\dot{A}}{R^2} \right) - j\omega\sigma\dot{A} = J_{\Omega_1} + J_{\Omega_2} \right. \\ \left. \begin{cases} J_{\Omega_2} = -j\omega\sigma\dot{A} \\ \text{div}(J_{\Omega_2}) = 0 \end{cases} \right. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_{\text{дно}}^{\text{э}} + P_{\text{тиг}}^{\text{э}} + P_{\text{кр}}^{\text{э}} + P_{\text{загр}}^{\text{э}} + P_{\text{инд}}^{\text{э}} = |\dot{U}_{\text{инд}}| \cdot |I_{\text{инд}}| \cdot \cos \varphi_{\text{инд}} \\ \left\{ \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \frac{\dot{A}}{R^2} \right) - j\omega\sigma\dot{A} = J_{\Omega_1} + J_{\Omega_2} \right. \\ \left. \begin{cases} J_{\Omega_2} = -j\omega\sigma\dot{A} \\ \text{div}(J_{\Omega_2}) = 0 \end{cases} \right. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} |Z_{\text{инд}}| = \frac{|\dot{U}_{\text{инд}}|}{|I_{\text{инд}}|} \\ \left\{ \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \dot{A}}{\partial R} + \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \frac{\dot{A}}{R^2} \right) - j\omega\sigma\dot{A} = J_{\Omega_1} + J_{\Omega_2} \right. \\ \left. \begin{cases} J_{\Omega_2} = -j\omega\sigma\dot{A} \\ \text{div}(J_{\Omega_2}) = 0 \end{cases} \right. \end{cases} \quad (6)$$

где  $P_{\text{дно}}^{\text{э}}, P_{\text{тиг}}^{\text{э}}, P_{\text{кр}}^{\text{э}}, P_{\text{загр}}^{\text{э}}, P_{\text{инд}}^{\text{э}}$  – электрические потери в дне разрезного водоохлаждаемого тигля, секциях тигля, крышке тигля, расплаве и индукторе;  $P_{\text{дно}}^{\text{т}}, P_{\text{тиг}}^{\text{т}}, P_{\text{кр}}^{\text{т}}$  – суммарные мощности, отводимые от дна, секций и крышки тигля, включающие собственные электрические потери и тепловые потери от расплава;  $|\dot{U}_{\text{инд}}|, |I_{\text{инд}}|, \cos \varphi_{\text{инд}}$  – напряжение, ток и коэффициент мощности индуктора.

Решение обратных задач на основе предложенных постановок иллюстрируется на рис. 6. Для обеспечения однозначности решения (точки 1 или 2 на рис. 6,а) используется дополнительное условие, основанное на измерении и расчёте напряжения на индукторе. При решении обратных задач связь между изменением входной и изменением выходной величины нелинейно ме-

няется в зависимости от отношения  $R_{\text{загр}} / \Delta_{\text{загр}}$ . Поэтому нужно исследовать чувствительность обратной задачи к отклонению входных данных. Зависимость чувствительности рассматривается как функция связи  $\Phi_{\text{оз}}$  между входом и выходом обратной задачи. Погрешность удельного сопротивления как решения обратной задачи  $\delta_{\text{оз}}$  связана с погрешностями входных данных следующим образом:

$$\delta_{\text{оз}} = (2\delta_{\text{к}} + \delta_{\text{геом}}) \cdot \Phi_{\text{оз}} \quad \text{или} \quad \delta_{\text{оз}} = (2\delta_{\text{эл}} + \delta_{\text{геом}}) \cdot \Phi_{\text{оз}}$$

где  $\delta_{\text{геом}}$  – погрешность измерения геометрии ванны расплава;  $\delta_{\text{к}}$  – погрешность калориметрирования;  $\delta_{\text{эл}}$  – погрешность измерения тока напряжения и коэффициента мощности.

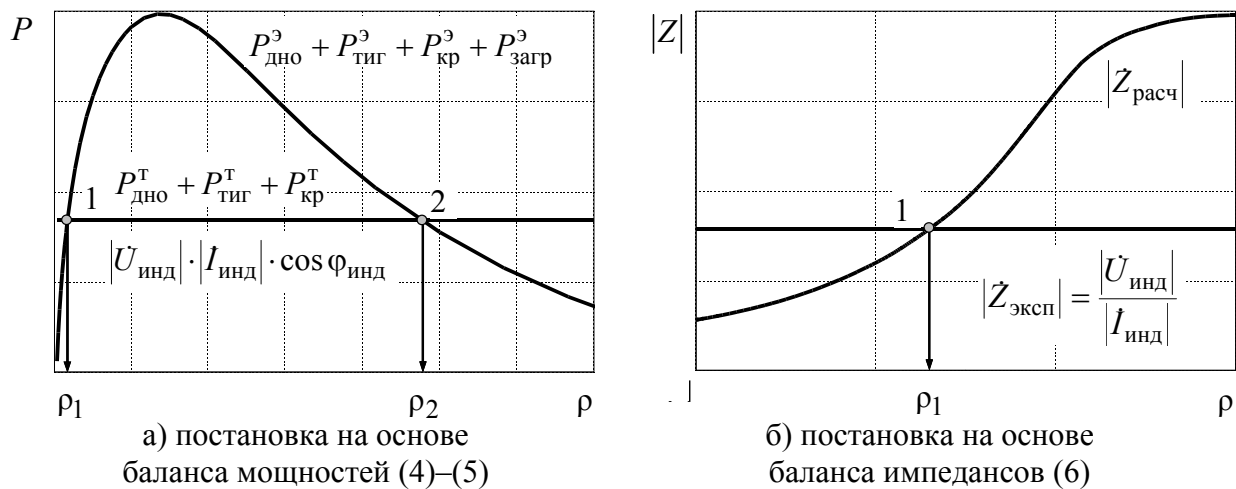


Рис. 6. Решение обратной задачи

Функция обратной задачи зависит от параметров индукционной системы и погрешности измерения:

$$\Phi_{\text{оз}} = f \left( \left\{ \frac{R_{\text{загр}}}{\Delta_{\text{загр}}}, \frac{H_{\text{загр}}}{H_{\text{инд}}} \right\}, \delta_{\text{геом}} \right),$$

где  $R_{\text{загр}}$  – радиус ванны расплава,  $\Delta_{\text{загр}}$  – глубина проникновения ЭМП в расплав,  $H_{\text{загр}}$  – глубина ванны расплава,  $H_{\text{инд}}$  – высота индуктора.

Для качественного анализа связи между отклонением входных данных и отклонением результата рассматривается область решения вокруг точки 1 (рис. 6). При отсутствии погрешностей входных данных решением является точка пересечения расчётной  $f(\rho)$  и экспериментальной  $\tilde{f}(\rho)$  зависимостей (точка 1 на рис. 7). Область решения образуется из-за наличия погрешностей измерения. Её ширина определяет относительное отклонение решения обратной задачи ( $\delta_{\text{оз}}^- = \frac{\rho_4}{\rho_0} - 1$  и  $\delta_{\text{оз}}^+ = 1 - \frac{\rho_3}{\rho_0}$ ). Для анализа они разделяются на составляющие ( $\bar{\delta}^-(\rho)$  и  $\bar{\delta}^+(\rho)$ ); ( $\delta^-(\rho)$  и  $\delta^+(\rho)$ ), вызванные соответственно экспериментальной и расчётной погрешностями, и рассчитываются как:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\delta}^-(\rho) = \frac{\Delta \bar{f}^-}{\rho_0 \cdot f'(\rho_0)} \\ \bar{\delta}^+(\rho) = \frac{\Delta \bar{f}^+}{\rho_0 \cdot f'(\rho_0)} \end{array} \right. \text{ и } \left\{ \begin{array}{l} \delta^-(\rho) = \frac{\Delta f^+(\rho_2)}{\rho_2 \cdot (f^+(\rho_2))'} \\ \delta^+(\rho) = \frac{\Delta f^-(\rho_1)}{\rho_1 \cdot (f^-(\rho_1))'} \end{array} \right., \quad (7)$$

где  $\Delta \bar{f}^- = \bar{f}(\rho_2) - \bar{f}(\rho_0)$ ,  $\Delta \bar{f}^+ = \bar{f}(\rho_1) - \bar{f}(\rho_0)$  – экспериментальная погрешность;  $\Delta f^+(\rho_2)$ ,  $\Delta f^-(\rho_1)$  – расчётная погрешность;  $f^+(\rho_2) = f(\rho_2) + \Delta f^+(\rho_2)$ ,  $f^-(\rho_1) = f(\rho_1) + \Delta f^-(\rho_1)$  – значение расчётной функции с учетом расчётной погрешности.

Найденные зависимости являются обобщённым инструментом для анализа погрешности метода определения удельного сопротивления в различных постановках.

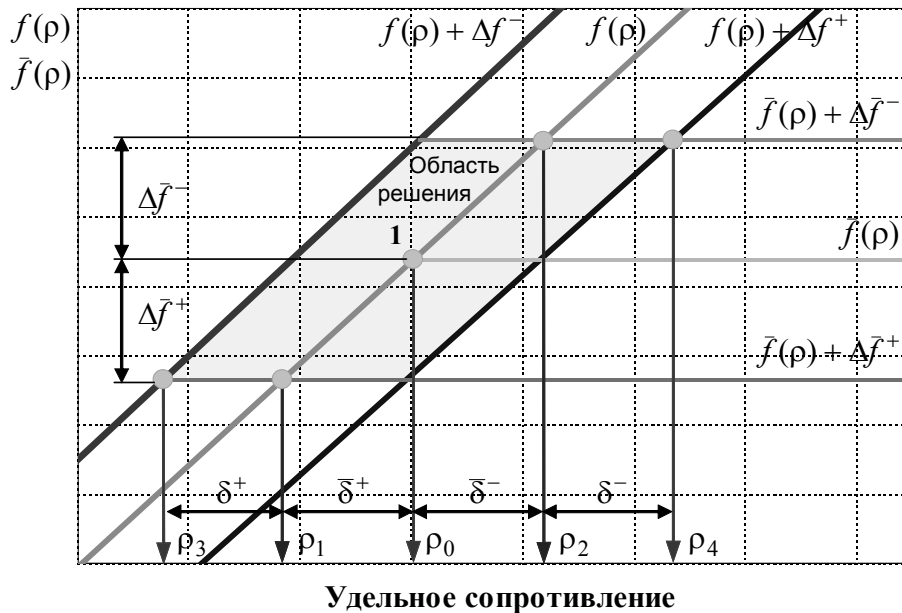


Рис. 7. Определение погрешности решения обратной задачи

Зависимости функции обратной задачи  $\Phi_{03}$  от степени выраженности поверхностного эффекта в расплаве для постановок на основе баланса мощностей и импедансов представлены на рис. 8. Результаты анализа погрешностей для указанных постановок сведены в табл. 1. Для вычисления погрешностей  $\delta_{03}$ , вызванных указанными погрешностями исходных данных, используются формулы (7). Ход зависимостей  $\delta_{03}(R_{\text{загр}} / \Delta_{\text{загр}})$  соответствует функции обратной задачи  $\Phi_{03}$ .

Зависимость “баланс мощностей” (рис. 8) показывает, что для минимизации погрешности исследование удельного сопротивления следует проводить при  $R_{\text{загр}} / \Delta_{\text{загр}} < 1.5$  или  $R_{\text{загр}} / \Delta_{\text{загр}} > 7$ . На участке с  $R_{\text{загр}} / \Delta_{\text{загр}} = 2 \div 3$ , погрешность входных данных приводит к образованию области с отсутствием решения. Для постановки на основе баланса модулей импеданса индукто-

ра (зависимость “баланс импедансов” на рис. 8) отклонение минимально на участке с  $R_{\text{загр}} / \Delta_{\text{загр}} = 2 \div 4$ .

Рассмотренные постановки дополняют друг друга, что позволяет минимизировать погрешность решения.

Таблица 1

Погрешности метода		
Составляющая ошибки	Обозн.	Погрешность, %
Расходомеры	–	0.5
Термоэлектрические преобразователи	–	0.25
Аналого-цифровые преобразователи	–	0.1
Неучтённые потери в элементах индукционной системы	–	1.2
Суммарная погрешность калориметрирования	$\delta_{\text{к}}$	2.05
Погрешность измерения напряжения	–	1.5
Погрешность измерения тока	–	1.5
Суммарная погрешность измерения импеданса	$\delta_{\text{имп}}$	2.1
Погрешность измерения высоты расплава	$\delta_{\text{геом}}$	2.5
Погрешность решения обратной задачи	$\delta_{\text{оз}}$	$\pm(10 \div 35)$
Погрешность численной математической модели ЭМП	$\delta_{\text{мат}}$	$\pm(5 \div 10)$
Суммарная погрешность метода	$\delta_{\text{сум}}$	$\pm(15 \div 45)$

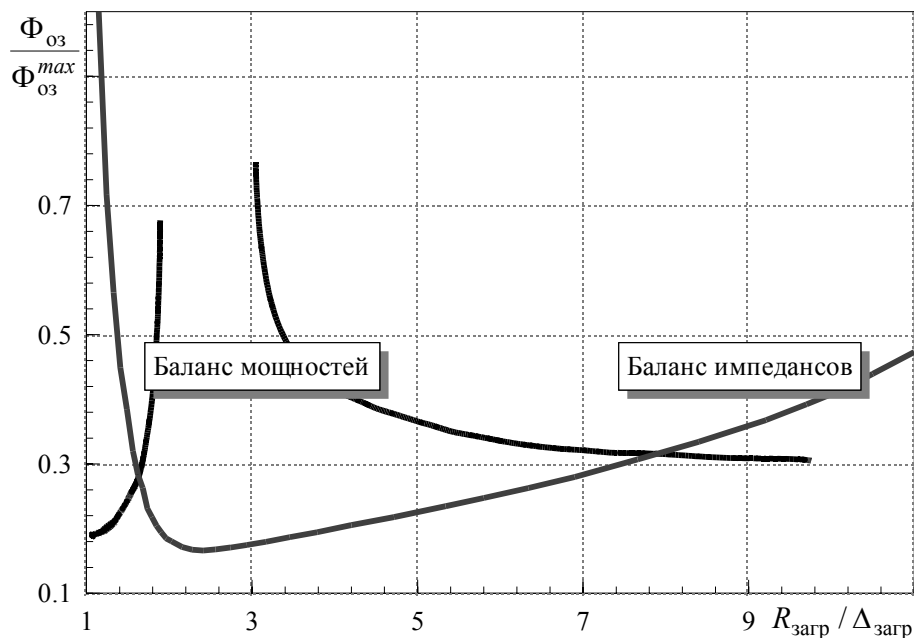


Рис. 8. Функция связи погрешности входных данных и результатов

Для определения полной погрешности метода к найденной погрешности  $\delta_{\text{оз}}$  прибавляется погрешность численной математической модели ЭМП  $\delta_{\text{мат}}$ :

$$\delta_{\text{сум}} = \delta_{\text{оз}} + \delta_{\text{мат}},$$

Допущением рассмотренных постановок является равномерность температуры расплава по объёму ванны. Поскольку скорость перемешивания оксидных расплавов достигает 10 см/с, то градиент температуры в объёме ванны расплава в местах распределения внутренних источников тепла может составлять менее 100°C. Это позволяет пренебречь градиентами температуры в расплаве и решать коэффициентную обратную задачу относительно удельного сопротивления расплава, принимая температуру расплава постоянной.

Верификация метода проводится в результате сравнения результатов измерения удельного сопротивления образцов с литературными данными. В качестве образцов были выбраны материалы с известными удельными сопротивлениями, а именно нержавеющая сталь, медь, сплавы на основе алюминия и титана. В табл. 2 приводятся значения удельных сопротивлений образцов, полученные в результате верификационных тестов, литературные данные и погрешность между ними. Максимальная погрешность составила 6.5%.

Таблица 2

Результаты верификационных тестов

Материал	Удельное сопротивление, Ом·м		Погрешность, %
	Литературные данные	Расчётные значения	
Сталь нержавеющая X18H25C2	$1.03 \cdot 10^{-6}$	$9.66 \cdot 10^{-7}$	6.5
Титановый сплав BT-1	$6.00 \cdot 10^{-7}$	$6.17 \cdot 10^{-7}$	2.8
Сплав алюминиевый литевой	$4.00 \cdot 10^{-7}$	$4.12 \cdot 10^{-7}$	2.9
Медь электротехническая M2	$1.80 \cdot 10^{-8}$	$1.77 \cdot 10^{-8}$	1.6

При помощи разработанного метода и созданного стенда было исследовано удельное сопротивление расплава  $Al_2O_3$ . Данные экспериментов и результаты расчётов приводятся в табл. 3. Индукционные системы были спроектированы таким образом, чтобы уменьшить погрешность метода на основе выработанных рекомендаций. Теоретическая оценка погрешности метода не превышает 17%.

Таблица 3

Результаты измерения удельного сопротивления  $Al_2O_3$ 

Размеры индукционной системы, мм		$T_{\text{загр}}$ , °C	$\frac{R_{\text{загр}}}{\Delta_{\text{загр}}}$	$f$ , МГц	$ U_{\text{инд}} $ , кВ	$ I_{\text{инд}} $ , А	$P_{\text{тиг}} + P_{\text{загр}}$ , кВт	$P_{\text{инд}}$ , кВт	$\rho_{\text{загр}}$ , Ом·м	$\delta_{\text{сум}}$ , ±%
$H_{\text{инд}} = 86.0$ $R_{\text{инд}} = 109.5$	$H_{\text{загр}} = 111.0$ $R_{\text{загр}} = 76.0$	2300	1.41	1.853	—	—	37.71	0.90	$2.13 \cdot 10^{-2}$	16
$H_{\text{инд}} = 93.0$ $R_{\text{инд}} = 63.0$	$H_{\text{загр}} = 50.0$ $R_{\text{загр}} = 33.0$	2680	0.87	1.744	5.316	316	—	3.30	$1.00 \cdot 10^{-2}$	17
$H_{\text{инд}} = 65.0$ $R_{\text{инд}} = 47.0$	$H_{\text{загр}} = 72.0$ $R_{\text{загр}} = 26.5$	2950	0.91	1.830	—	—	19.79	2.22	$0.61 \cdot 10^{-2}$	16
$H_{\text{инд}} = 110.0$ $R_{\text{инд}} = 105.0$	$H_{\text{загр}} = 48.0$ $R_{\text{загр}} = 67.0$	2470	1.46	1.754	6.858	353	30.53	2.07	$1.45 \cdot 10^{-2}$	16

Результаты исследования удельного сопротивления системы  $UO_2 - ZrO_2 - Zr$ 

№	Степень окисленности корнума, %	$T_{загр}$ , °C	Среда	$\rho_{загр}$ , Ом·м	$R_{загр}/\Delta_{загр}$	$\delta_{сум}$ , ±%
1	32	2400	Аргон	$8.9 \cdot 10^{-6}$	8.26	22.47
2		2400		$6.4 \cdot 10^{-6}$	9.44	21.95
3		2400		$8.9 \cdot 10^{-6}$	8.40	22.25
4	70	1600 (корка)	Аргон	$8.8 \cdot 10^{-5}$	2.48	51.24
5	100	2460 (корка)	Воздух	$3.0 \cdot 10^{-4}$	1.60	25.82
6		2690		$2.4 \cdot 10^{-4}$	1.52	17.30
		2710		$2.2 \cdot 10^{-4}$	1.51	17.10
		2730		$2.6 \cdot 10^{-4}$	1.44	16.53
		2720		$2.2 \cdot 10^{-4}$	1.51	17.10
7	2348 (корка)	Пар	$3.0 \cdot 10^{-4}$	5.23	25.82	
2147 (корка)	$3.2 \cdot 10^{-4}$		4.95	27.16		

Представленный метод определения удельного сопротивления был использован для научной поддержки тестов в НИТИ им. Александра г. Со-сновый Бор. Были получены удельные сопротивления урансодержащих оксидных расплавов (система  $UO_2 - ZrO_2 - Zr$ ) при различных температурах и степени её окисленности (табл. 4). На основе этих исследований было проведено математическое моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов, происходящих при взаимодействии расплава с металлом корпуса атомного реактора. Полученные результаты были использованы при разработке элементов систем безопасности для атомных реакторов нового поколения.

Таким образом, разработанный метод позволяет определять удельное сопротивление высокотемпературных расплавов в интервале температур до  $2950^\circ\text{C}$  в инертной атмосфере и на воздухе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана двумерная математическая модель ЭМП индукционной печи с разрезным проводящим тиглем, реализованная в виде программы в среде пакета ANSYS.
2. Получены энергетические характеристики индукционной печи с разрезным тиглем, показывающие распределение мощностей в элементах конструкции печи.
3. Разработан бесконтактный метод определения удельного сопротивления высокотемпературных расплавов как в окислительной, так и в инертной атмосфере, основанный на измерении параметров индукционной плавки в разрезном проводящем тигле и решении обратной задачи ЭМП в постановках на основе баланса мощностей и баланса модулей импеданса индуктора. Изготов-



лен исследовательский стенд с системой сбора данных о плавке. Решение обратной задачи реализовано в виде программы в среде пакета ANSYS.

4. Зависимости удельного сопротивления расплавов  $Al_2O_3$  в диапазоне температуры 2300 – 2950°C и системы  $UO_2 - ZrO_2 - Zr$  в диапазоне температуры 2150 – 2750°C.

**Основное содержание диссертации опубликовано в  
следующих работах**

1. Блинов, Ю.И. Исследование и управление индукционной плавкой в холодном тигле на основе решения обратной задачи / Ю.И.Блинов, А.Ю.Печенков, И.В.Позняк, А.Н.Шатунов // Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева АРІН–05: материалы междунар. конф., г. С.-Петербург, 25-26 мая 2005 г. – СПб., 2005. – С. 329-335.
2. Pechenkov, A.Yu. Induction Furnace with Cold Crucible as a Tool for Investigation of High Temperature Melts / A.Yu.Pechenkov, I.V.Pozniak, A.N.Shatunov // The 9<sup>th</sup> russian-korean international symposium on science & technology KORUS–2005: proceedings of international symposium, Novosibirsk, 26<sup>th</sup> June – 2<sup>th</sup> July 2005. – Novosibirsk, 2005. – P. 372-376.
3. Печенков, А.Ю. Индукционная печь с холодным тиглем как инструмент для научных исследований / А.Ю.Печенков, И.В.Позняк, А.Н.Шатунов // Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ–2005: материалы второй науч.-техн. конф. с междунар. участием, г. Новосибирск, 25-26 октября 2005 г. – Новосибирск, 2005. – С. 203-206.
4. Pechenkov, A.Yu. Measurement of high frequency voltage, current and power factor of inductor/ A.Yu.Pechenkov, Yu.B.Petrov, I.V.Pozniak, A.N.Shatunov // Modelling for material processing: proceedings of 4<sup>th</sup> international scientific colloquium, Riga, 8-9 June 2006. – Riga, 2006. – P. 233-238.
5. Печенков, А.Ю. Исследование электропроводности высокотемпературных расплавов / А.Ю.Печенков, Ю.Б.Петров, И.В.Позняк, А.Н.Шатунов // Руднотермические печи (конструкции, исследование и оптимизация технологических процессов, моделирование) Электротермия-2006: труды Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием, г. С.-Петербург, 6-8 июня 2006 г. – СПб, 2006. – С. 209-218.
6. Pechenkov, A.Yu. Electrical conductivity measurement of oxides melts [Text] / A.Yu.Pechenkov, I.V.Pozniak, A.N.Shatunov // Magnetohydrodynamics. – Riga, 2007. vol.43. No.2. – P. 3-10. – Bibl.: P. 25.
7. Печенков, А.Ю. Технология определения удельного сопротивления высокотемпературных расплавов / И.В.Позняк, А.Ю.Печенков, А. Н. Шатунов // Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ–2007: материалы третьей науч.-техн. конф. с междунар. участием, г. Новосибирск, 25-26 октября 2007 г. – Новосибирск, 2007. – С. 204-210.

8. Позняк, И.В. Бесконтактный метод определения удельного электрического сопротивления высокотемпературных расплавов / И.В.Позняк, А.Ю.Печенков, А.Н.Шатунов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, №11, 2007.– С. 129-131.
9. Максимов, А.И. Исследование удельного электрического сопротивления расплава оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) / А.И.Максимов, И.В.Позняк, А.Ю.Печенков, А.Н.Шатунов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, №11, 2007.– С. 126-128.
10. Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007614478. Зарегистрировано 24 октября 2007. Программа расчёта электромагнитных параметров индукционной системы с разрезным проводящим тиглем / Правообладатели: Позняк И.В. Авторы: Позняк И.В., Шатунов А.Н., Печенков А.Ю. // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – М.: ФГУ ФИПС, 2008. – №1. – С. 74.
11. Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007614479. Зарегистрировано 24 октября 2007. Программа для определения электропроводности материалов на основе решения обратной задачи электромагнитного поля / Правообладатели: Позняк И.В. Авторы: Позняк И.В., Шатунов А.Н., Печенков А.Ю. // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – М.: ФГУ ФИПС, 2008. – №1. – С. 75.

Личный вклад соискателя состоит в разработке математической модели электромагнитной системы индукционной печи с разрезным проводящим тиглем на основе дифференциального метода [1, 8]; решении обратной задачи электромагнитного поля в постановках на основе баланса мощностей и баланса импедансов [1-3, 6, 9]; разработке прикладных программных модулей, реализованных в коммерческом пакете ANSYS на основе предложенной математической модели [10, 11]; исследовании погрешности решения обратной задачи [2-8]; разработке датчиков для измерения напряжения и тока индуктора и алгоритма работы системы сбора экспериментальных данных [2, 4, 5, 9]; определении удельного электрического сопротивления расплавов  $Al_2O_3$  и системы  $UO_2 - ZrO_2 - Zr$  [2,5-7,9].