

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

ПАВЛОВ Сергей Иванович

УДК 537.84:519.6+621.365.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМКНУТОГО ТЕЧЕНИЯ
ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

01.02.05.– Механика жидкостей, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ленинград – 1984

Работа выполнена в Латвийском ордена Трудового Красного
Знамени Государственном университете имени П.Стучки

Научный руководитель – кандидат физико-математических
наук доцент МИКЕЛЬСОН Ю.Я.

Официальные оппоненты – доктор технических наук
профессор ТАНАНАЕВ А.В.
– кандидат физико-математических
наук старший научный сотрудник
РИВКИНД В. Я.

Ведущая организация – Институт физики
АН Латвийской ССР

Защита состоится “4” декабря 1984 г. в 17 часов на заседа-
нии Специализированного совета Д.063.38.15 Ленинградского ор-
дена Ленина Политехнического института им. М.И.Калинина по
адресу: 195251, Ленинград, ул. Политехническая, 29, корпус 3,
ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной биб-
лиотеке Ленинградского Политехнического института.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, в двух экзempla-
рах просьба направлять по вышеуказанному адресу на имя учёного
секретаря Специализированного совета.

Автореферат разослан “1” ноября 1984 г.

Учёный секретарь
специализированного совета

В.В.Богданова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для увеличения производства и улучшения качества выплавляемого металла совершенствуется металлургическая технология, разрабатываются и внедряются новые высокопроизводительные установки, обладающие высоким уровнем механизации и автоматизации.

Перспективным является применение металлургических МГД-устройств (индукционных электропечей, в том числе печей с холодным тиглем, дуговых, электроннолучевых, плазменных печей, устройств индукционного нагрева и электромагнитного (ЭМ-) перемешивания, ЭМ-кристаллизаторов и др.), в которых без механического контакта с агрессивной и высокотемпературной средой создается ЭМ-силовое воздействие, управляющее скоростной структурой потока жидкого металла, а через него распределением тепловых и концентрационных полей.

Гидродинамические (ГД-) характеристики устройств существенно влияют на продолжительность, интенсивность и эффективность различных этапов технологического цикла (например, гомогенизацию расплава, выравнивание его температуры, сепарацию и удаление продуктов химических реакций, в том числе дегазацию, и др.), а также в значительной мере определяют срок службы оборудования (например, интенсивная циркуляция расплава вблизи стенок тигля приводит к вымыванию его материала). Таким образом, для проектирования новых и совершенствования уже существующих МГД-устройств определение скорости движения расплава является ключевой задачей, на основе решения которой могут быть найдены тепловые и концентрационные поля.

Поскольку возможности экспериментального исследования ограничены, необходимо построение математических моделей металлургических МГД-устройств, разработка методик численного расчета, создание комплексов программ для ЭВМ, внедрение их для многовариантных расчетов, результаты которых позволят получить количественные данные о распределениях ЭМ-, ЭД-, тепловых и концентрационных полей при изменении в широких пределах параметров и геометрии устройств, а также явятся базой для обоснования и оптимизации конструкторских решений.

Цели работы: 1) Разработка математических моделей осесимметричных МГД-устройств с замкнутым течением расплава при индукционном, кондукционном и комбинированном подводе мощности, а также моделей поворотно-симметричных индукционных МГД-устройств с электропроводящим разрезным водоохлаждаемым тиглем.

2) Разработка численных методик и создание комплексов программ для расчета распределений ЭМ-, ГД- и тепловых полей в названных МГД-устройствах.

3) Использование разработанных методик и программ для получения качественных и количественных данных о ЭМ-, ГД- и тепловых полях в зависимости от геометрии и параметров, характеризующих МГД-устройства.

Научная новизна: 1) Предложена уточненная математическая модель осесимметричного металлургического МГД-устройства с подобластями произвольной формы, представляющими собой различные элементы конструкции устройства. Учитывается, что подвод энергии к расплаву осуществляется индукционным, кондукционным или комбинированным способом.

2) Предложена двухмерная математическая модель поворотно-симметричного индукционного МГД-устройства с разрезным водоохлаждаемым электропроводящим тиглем, воспроизводящая горизонтальное сечение. В модели учитываются электрические и тепловые свойства контактной зоны расплава и холодного тигля, а также зоны частичного и полного отжатия расплава от тигля.

3) Разработана методика численного расчета комплекса ЭМ-, ГД- и тепловых величин для металлургических МГД-устройств, основанная на применении консервативных конечно-разностных схем для уравнения переноса о переменными коэффициентами, построенных на неоднородной сетке интегроинтерполяционным методом. В схемах компенсируется схемная вязкость (температуропроводность, магнитная вязкость), возникающая при аппроксимации конвективных членов направлениями разностями.

4) При численном решении уравнений ЭМ- и теплового полей предложено использовать метод разделения на подобласти, что дает возможность на границах подобластей сшивать ко-

нечно-разностные решения с помощью сложных условий, учитывающих переходные электрическое и тепловое сопротивления. Кроме того, отказ от схем сквозного счета в расчетах вихревых токов, перетекающих через границу сред с различной электропроводностью, и применение метода разделения на под-области позволяет сократить количество неизвестных.

5) Все методики расчета, реализованные на ЭВМ ЕС-1033 и БЭСМ-6 в виде взаимосвязанных комплексов программ на языке ФОРТРАН, внедрены для многовариантных расчетов.

6) Получены качественные и количественные данные, выражающие зависимость ЭМ-, ГД- и тепловых полей: а) в осесимметричном индукционном МГД-устройстве – от расположения индуцирующей системы, геометрии тигля и формы мениска расплава; б) в зоне контакта расплава и тигля поворотно-симметричного индукционного МГД-устройства – от переходного электрического и теплового сопротивления, ширины изолирующего промежутка между секциями тигля и др.

7) Исследован характер результирующего течения расплава в осесимметричном МГД-устройстве с комбинированным подводом мощности при наложении электромагнитной конвекции (ЭМК) и электровихревого течения (ЭВТ), а при переменном кондукционно подведенном токе и дифференциального МГД-вращения (ДВ).

Защищаемые научные положения. 1) Пренебрежение мениском расплава может приводить к качественно неверным результатам для структуры течения, а, также распределений ЭМ-, ГД- и тепловых полей в осесимметричном индукционном МГД-устройстве. Таким образом, широко распространенные теоретические модели с цилиндрической садкой применимы для исследований металлургических установок со слабо выраженным мениском.

2) В индукционном МГД-устройстве с разрезным электропроводящим тиглем в жидком металле наряду с азимутально направленными вихрями тороидальной формы в пределах угловых размеров секции тигля возникают двухконтурные течения с вихрями аксиального направления, вызванные нарушением круговой симметрии вихревых токов. Интенсивность этих течений сопоставима с интенсивностью тороидальных вихрей.

3) В осесимметричном МГД-устройстве с комбинированным подводом энергии МГД-вращение возникает только при переменном кондукционно подведённом токе. Из-за выраженного скин-эффекта толщина зоны вращения оценивается удвоенной толщиной скин-слоя.

Практическая ценность. Разработаны методики и созданы комплексы программ для расчёта ЭМ- (индукции магнитного поля, плотности вихревых токов, мощности тепловыделения, плотности ЭМ-силы и её ротора и др.), ГД- (скорости движения расплава, давления, функции тока, завихренности и др.) и тепловых (температуры, теплового потока и др.) величин при замкнутом течении жидкого металла в МГД-устройствах со следующим подводом мощности: индукционным (индукционные тигельные печи, индукционные печи с холодным тиглем, ЭМ-кристаллизаторы, устройства индукционного нагрева и ЭМ-перемешивания и др.), кондукционным (дуговые, электроннолучевые, плазменные и др. электропечи) и комбинированным (индукционно-дуговые, электроннолучевые, плазменные и др. электропечи). Безразмерные параметры, характеризующие МГД-устройства, могут принимать следующие значения: относительная магнитная проницаемость $\mu \leq 10^6$; безразмерная частота $\omega \leq 5 \cdot 10^4$; эффективное число Рейнольдса $Re_e \leq 10^6$; магнитное число Рейнольдса $Rm \leq 10$ (для устройств с кондукционным и комбинированным подводом тока принято безындукционное приближение), число Пекле $Pe \leq 10^6$.

Комплексы программ внедрены во ВНИИ электротермического оборудования (гор. Москва) и используются при усовершенствовании и проектировании электропечей. Суммарный фактический документально подтверждённый экономический эффект от эксплуатации комплексов программ составил 35530 рублей, ожидаемый годовой экономический эффект – 35640 рублей.

Методики расчета и комплексы программ применяются также в Институте физики АН Латвийской ССР (гор. Саласпилс); проведены серии расчетов для Ленинградского электротехнического института и Института металловедения и технологии металлов АН Болгарской Народной Республики (гор. София).

Достоверность. 1) Проведено тестирование комплексов программ; сравнение численных результатов с имеющимися в литературе и полученными в работе аналитическими решениями, с численными результатами, полученными по другим независимым методикам, а также с доступными экспериментальными данными. Получено хорошее согласование результатов.

2) Проведён сравнительный анализ разработанных методик и полученных численных результатов с методиками и численными результатами других авторов. Выявлены преимущества разработанной методики.

Публикации. Результаты проведённых исследований отражены в 24 печатных работах, в том числе 11 статьях, тезисах 12 докладов, одном информационном листке.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на 1-ой студенческой конференции по гуманитарным и естественным наукам Прибалтийских республик и Белорусской ССР, октябрь 1976 г., гор. Тарту (тезисы доклада опубликованы);

– на 36–43 научных конференциях Латвийского государственного университета им. П.Стучки, февраль 1977–1984 гг., гор. Рига;

– на IX, X и XI Всесоюзных совещаниях по магнитной гидродинамике, апрель 1978, 1981 и 1984 гг., гор. Рига (тезисы докладов опубликованы);

– на IX Всесоюзной научно-технической конференции “Развитие применения токов высокой частоты в электротермии”, март 1981 г., гор. Ленинград (тезисы доклада опубликовали);

– на II Всесоюзной научно-технической конференции “Применение магнитной гидродинамики в металлургии и литейном производстве”, сентябрь–октябрь 1981 г., гор. Киев (тезисы доклада опубликованы);

– на Всесоюзной школе молодых учёных “Теоретические и прикладные проблем вычислительной математики и математической физики” под руководством академика А.А.Самарского, февраль 1982 г., гор. Рига;

– на Всесоюзном семинаре “Математическое моделирование процессов затвердевания металлов и сплавов”, июль 1983 г.,

гор. Новосибирск (тезисы доклада опубликованы).

Диссертация рассматривалась на заседании кафедры Электродинамики и механики сплошных сред Латвийского государственного университета им. П.Стучки (протокол № 171 от 2 февраля 1984 г.) и была рекомендована к защите.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и приложения. Работа изложена на 216 страницах, в том числе 145 стр. основного текста, 4 стр. содержания, 3 стр. списка обозначений и сокращений, 39 стр. рисунков, 1 стр. таблиц, 16 стр. списка использованных источников, состоящего из 113 наименований, и 7 стр. приложения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение. Обосновывается актуальность изучения ЭМ-, ГД-тепловых характеристик и металлургических МГД-устройств с индукционным, кондукционным и комбинированным подводом мощности к расплаву. Характеризуются цели работы и методы исследования. Формулируются научные положения, которые выносятся на защиту. Дается аннотация последующих глав диссертации.

1. Обзор математических моделей и методов расчёта металлургических МГД-устройств с замкнутым течением жидкого металла. Осесимметричная модель индукционного МГД-устройства, состоящая из расплава, тигля, индуктора, магнитного экрана и др. элементов, исследовалась в работах Калецки Д., Райхерта К., Терепоура Э., Тира Л.Л., Хегевальдта Ф., Шекели Дж., Яковича А.Т. и др. авторов. Предложена математическая модель, учитывающая произвольную форму подобластей, опробовано описание турбулентного течения расплава с помощью эффективной вязкости (определяется из алгебраических соотношений, одно- и двухпараметрных моделей); разработана конечно-разностная методика расчёта ЭМ- и ГД- полей. Большинство расчётов проведено для цилиндрической модели. Сделаны отдельные расчёты движения в случае малых чисел Рейнольдса при заданной форме мениска, которая оценивалась в гидростатическом приближении с помощью простейших моделей (работы Гецелева З.Н., Губченко А.П., Коровина В.М., Мюльбауэ-

ра А., Ниссена П., Тира Л.Л. и др.). Для расчета теплового поля сформулированы безразмерные параметры, даны качественные оценки и пример расчета методом конечных элементов (работы Тира Л.Л., Фотрея У., Кремера П.).

Недостаточное внимание уделено сравнению экспериментальных (работы Муура Дж., Терепоура Э., Тира Л.Л., Шекели Дж. и др.) и численных результатов для поля скорости, сопоставлению и отработке методик расчета. Не рассматривались течения в тиглях произвольной формы. Недостаточно исследованы течения при выраженной форме мениска. Не рассматривалось влияние ЭМК на тепловое поле.

Осесимметричная модель кондукционного МГД-устройства, состоящая из расплава, тигля, торцевых (боковых) электродов и др. элементов рассматривалась в работах Дилавари А., Мошняги В.Н., Орлова Л.П., Шарамкина В.И., Шекели Дж., Щелухина Е.М., Щербинина Э.В. и др. авторов. Предложена математическая модель для расчета ЭМ-, ГД- и теплового поля. ЭМ-граничные условия формируются с помощью интегрального закона полного тока. Исследованы ЭВТ при постоянном кондукционном токе, в том числе, при погруженном электроде. Рассмотрено МГД-вращение во внешнем постоянном магнитном поле. Даны аналитические выражения для скорости вращения при переменном кондукционном токе во внешнем однородном переменном магнитном поле.

Не рассматривались МГД-устройства с комбинированным индукционно-кондукционным подводом тока, не исследовались суммарные течения при наложении ЭВТ при постоянном или переменном кондукционном токе на ЭМК от индуктора, а также ДВ, возникающее в этом случае.

Двухмерная модель поворотно-симметричного индукционного МГД-устройства, воспроизводящая горизонтальное сечение, состоящее из расплава разрезного токопроводящего тигля, индуктора и др. элементов, рассматривалась в работах Губченко А.П., Ефимовских Н.А., Тира Л.Л., Фомина Н.И. и др. авторов. Проведены оценки ЭМ-величин методами теории цепей на основе схем замещения, предложено аналитическое решение для магнитной индукции при совпадающих электропроводностях расплава и тигля, дан пример расчета конечно-разностным методом.

Отсутствует постановка задачи о нахождении течения расплава при нарушении круговой симметрии вихревых токов, а также теплового поля с учетом свойств контакта расплава и тигля, и охлаждения последнего. Отсутствуют результаты расчетов ЭМ-, ГД- и тепловых полей при различной геометрии модели и свойствах контакта расплава и тигля.

Практика проектирования современных металлургических МГД-устройств требует устранения перечисленных выше недостатков ранее проведенных исследований.

2. Модели индукционно-кондукционного МГД-устройства.

Описывается схема индукционно-кондукционного металлургического МГД-устройства (рис. 1, 2), состоящая из одиннадцати областей: 1) расплава; 2) (не) проводящего разрезного (осесимметричного) тигля; 3) промежутков, электрически изолирующих секции тигля; 4) каналов для охлаждения секций тигля; 5) многофазного многосекционного индуктора; 6) каналов для охлаждения секции индуктора; 7) изоляции между тиглем и индуктором; 8) магнитного экрана; 9) окружающего пространства; 10) электрода для кондукционного подвода тока; 11) донного электрода. Кроме того, выделены следующие зоны: контакта расплава и тигля (А); частичного (Б) и полного (В) отжата расплава от тигля.

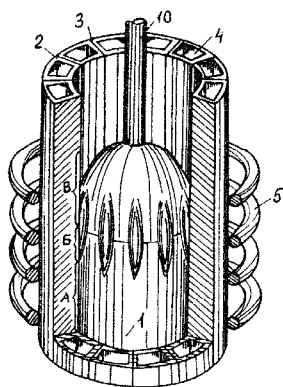


Рис. 1.

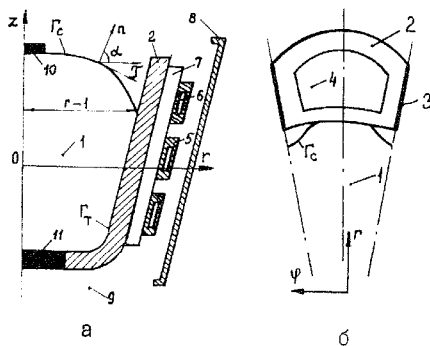


Рис. 2.

Для дальнейших исследований выбраны модели меридионального сечения (рис. 3а) МГД-устройства с осесимметричным непроводящим тиглем при индукционном (главы 3, 4) и комбинированном (глава 5) подводе тока, а также поворотной-симметричная модель горизонтального сечения (рис. 2б) индукционно-МВД-устройства с разрезным проводящим тиглем (глава 6).

3. Математическая модель и методика расчета МГД- и тепловых характеристик осесимметричного, индукционного МГД-устройства (рис. 2а). ЭМ-поле описывается уравнением относительно безразмерной комплексной амплитуды азимутальной составляющей векторного потенциала магнитного поля (учитывается влияние движения на магнитное поле). Граничные условия выражают отсутствие источников на бесконечности.

Движение расплава в турбулентном режиме моделируется уравнением Рейнольдса в приближении Буссинеска с введением эффективной вязкости в виде скалярной функции координат, которая задается алгебраическим соотношением. На поверхности тигля Γ_T (рис. 2а) ставятся условия прилипания, на поверхности мениска Γ_C – условия свободного скольжения. Уравнения записываются в переменных “ротор скорости (азимутальная компонента)” и “функция тока” или “скорость (радиальная и аксиальная компоненты)” и “давление”.

Тепловое поле определяется из уравнения теплопроводности, записанного относительно температуры, учитывающего джоулев источник из-за вихревых токов, конвективный и турбулентный перенос тепла. Последний моделируется введением эффективной теплопроводности, которая находится из аналогии Рейнольдса (турбулентное число Прандтля $Pr_t = 0,5 \div 2$). На поверхности мениска Γ_C ставятся условия излучения (вакуумное устройство), на поверхности тигля – условия теплоизоляции (если материал тигля имеет малую теплопроводность) или условия сопряжения тепловых потоков.

При конечно-разностном решении уравнения движения, записанного относительно ротора скорости, использовались следующие схемы, обобщенные на случай переменной по объему расплава эффективной вязкости и неоднородной сетки; схемы с аппроксимацией конвективных членов 1) центральными и 2) направленными разностями; 3) схема Такемитсу Н. с разделением

итерационных слоев; 4) схема Кочергина В.П. с компенсацией аппроксимационной вязкости на сетке с удвоенным шагом. Расчёт вихря на твёрдой стенке проводился: 1) по определению через производные от скорости; а также с применением условий: 2) Тома; 3) Вудса; 4) Йенсена; 5) Дородницына-Израэли; 6) Полежаева-Грязнова. Расчёты течения в естественных переменных осуществлялись методом установления с использованием явной схемы расщепления типа SMAC, обобщённой на случай переменной вязкости и неоднородной сетки.

Для численного расчёта ЭМ- и теплового полей уравнения аппроксимируются конечно-разностными схемами, перечисленными для уравнения ротора скорости.

Время расчёта МГД- и тепловых характеристик с применением комплекса программ для одного варианта с 2000 узловых точек составляет $1,5 \div 3$ часов машинного времени ЭВМ ЕС-1033 в зависимости от требуемой точности.

Результаты расчётов поля скорости по перечисленным методикам (при изменении схем и аппроксимации граничных условий результаты отличаются не более чем на 5%) сравнивались с экспериментальными данными Муура Дж., Тира Л.Л., Микельсона А.Э., Шекели Дж., Терепоура Э. и др., а также сопоставлялись с численными результатами, полученными по методикам Калецки Д., Шекели Дж., Райхерта К., Терепоура Э. и др. Получено хорошее согласование результатов с экспериментом, и выявлены преимущества разработанных методик в сравнении с методиками других авторов.

4. Результаты расчетов ЭМ-, ГД- и тепловых полей в осесимметричном индукционном МГД-устройстве. Анализируются результаты расчётов МГД-течения расплава в областях сложной геометрии, при выраженном мениске расплава, а также рассматриваются особенности теплового поля в условиях ЭМК.

При изменении геометрии проводящей области по сравнению с моделью, состоящей из расплава цилиндрической формы в поле кольцевого цилиндрического индуктора, качественный характер МГД-течения не нарушается, лишь приспособившись к области, при сохранении величины зазора между расплавом и индуктором. Пользуясь сужениями и расширениями, выступами и уступами в форме тигля, можно добиться ослабления, ограни-

чения или усиления движения в различных зонах расплава. На рис. 3 показана возможность ограничения движения вблизи зеркала расплава (а), а также течение в тигле с коническим участком в поле конического многофазного индуктора при постоянном зазоре с расплавом (б).

В расчётах МГД-течения с учётом мениска расплава форма последнего считалась наперёд изданной и определялась по формуле, полученной в гидростатическом приближении с использованием результатов численного эксперимента по расчёту ЭМ-силы на торцевой поверхности цилиндрической области. Рассчитанные координаты точек на поверхности мениска согласуются с экспериментальными данными Губченко А.П. Течение в цилиндрической области (рис. 4а) качественно отличается от циркуляции при выраженном мениске (рис. 4б), причём переход от плоской формы мениска к выпуклой осуществляется увеличением плотности тока в индукторе. Интенсивность верхнего контура (рис. 4б) при свободном скольжении на поверхности мениска более чем на порядок превышает интенсивность нижнего. При выпуклом мениске радикально изменяется характер джоулева тепловыделения в расплаве.

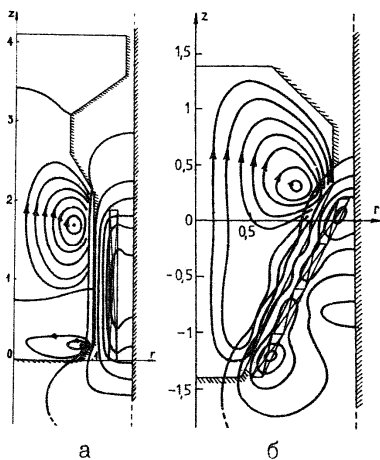


Рис. 3.

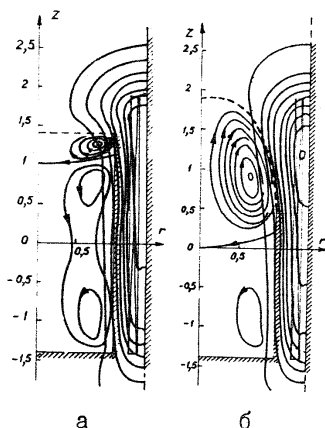


Рис. 4.

ЭМК приводит к существенному выравниванию температуры расплава. В зависимости от расположения источников тепла и характера циркуляции перепады температуры в расплаве составляют $2 \div 20^\circ$. Неоднородность теплового поля не влияет на движение расплава.

5. Математическая модель и результаты расчётов МГД-течения расплава в осесимметричном МГД-устройстве с кондукционным и комбинированным подводом мощности (рис. 2а). Магнитное поле кондукционно подведённого через торцевые электроды аксиально направленного осесимметрично растекающегося в области постоянного (переменного) тока определяется из действительного (комплексного) уравнения для азимутальной составляющей индукции. При комбинированном подводе энергии ЭМ-поле находится по принципу суперпозиции полей кондукционного и индукционного (см. главу 3) токов (влияние движения на магнитное поле не учитывается).

Для численного расчёта течения с тремя компонентами скорости используются модифицированные методики главы 3.

Результирующее движение расплава (рис. 5а, 5б) при наложении ЭВТ при постоянном токе и ЭМК имеет форму тороидальных вихрей и определяется относительной интенсивностью взаимодействий кондукционного тока с собственным магнитным полем и вихревых токов с индуцированным магнитным полем (на рис. 5а, 5б индуктор симметричный и сдвинутый, соответственно).

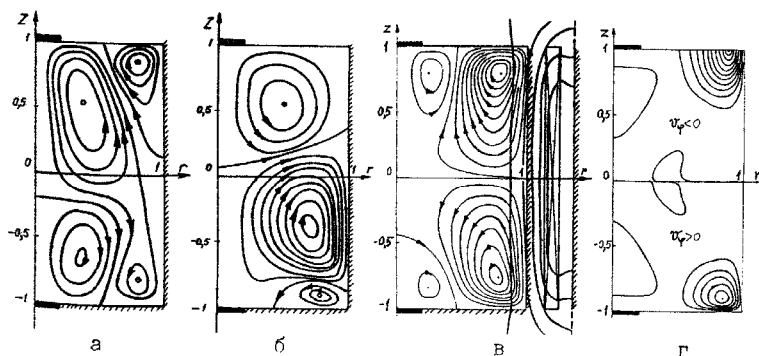


Рис. 5.

МГД-вращение, характеризующееся азимутальной составляющей скорости v_ϕ (изотахи на рис. 5г), возникает только при одновременном подводе индукционного и переменного кондукционного токов. Усреднённое значение азимутальной составляющей ЭМ-силы, определяющей вращение, при несовпадающих частотах токов находится по специальной формуле. Течение в меридиональной плоскости (рис. 5в) образуется при наложении ЭВТ и ЭМК. При сохранении качественной картины циркуляции интенсивность ЭВТ при переменном токе меньше, чем при постоянном, при совпадении эффективных значений соответствующих ЭМ-величин.

6. Двухмерная математическая модель и результаты расчетов МГД- и тепловых характеристик поворотного-симметричного индукционного МГД-устройства (рис. 2б). ЭМ-поле описывается уравнением относительно безразмерной комплексной амплитуды аксиальной составляющей магнитной индукции, которое решается в областях с постоянным значением электропроводности. На границах областей задаются условия непрерывности нормальной и разрыва тангенциальной составляющих плотности тока. На границе контакта расплава и тигля при перетекании вихревых токов учитывается переходное электрическое сопротивление R_n [Ом·м²]. Ввиду бесконечности модели в аксиальном направлении магнитное поле от индуктора идеально проникает в пространство между секциями тигля, а также зоны частичного или полного отжатия.

Движение, вызванное нарушением круговой симметрии вихревых токов при обтекании изолирующего промежутка между секциями тигля, находится из решения уравнения Рейнольдса (глава 3) в переменных: “ротатор скорости (аксиальная составляющая)” и “функция тока” или “скорость (радиальная и азимутальная составляющие)” и “давление” – с учётом условий прилипания и скольжения соответственно на поверхностях тигля и мениска (последнее принимается во внимание при рассмотрении зон частичного и полного отжатия расплава от тигля).

Тепловое поле рассчитывается из уравнения теплопроводности. Принимается во внимание движение расплава в горизонтальной плоскости, а также источники тепла в расплаве и тигле из-за вихревых токов. На границе контакта расплава и тигля

учитывается переходное тепловое сопротивление R_{π}^T [м·К/Вт], а также джоулево тепло, выделяющееся на переходном электрическом сопротивлении R_{π} .

Для численного расчёта движения используется модификация конечно-разностной методики главы 3. ЭМ- и тепловое поле рассчитывается с применением метода разделения на подобласти, что даёт возможность при сшивании конечно-разностных решений на границах учесть сложные условия, содержащие переходные электрическое и тепловое сопротивления. Отказ от схем сквозного счёта для уравнения магнитной индукции позволяет сократить количество неизвестных. Расчёты проводятся на неравномерной конечно-разностной сетке, построенной по алгоритму, обеспечивающему постоянство соотношения шагов сетки в радиальном и азимутальном направлениях.

Для упрощённой модели зоны контакта расплава и тигля, применимой при малых угловых размерах секции тигля и выраженном скин-эффекте, методом разделения переменных в декартовой системе координат построено аналитическое решение уравнений для магнитной индукции и функции тока и линеаризованного уравнения для ротора скорости. Коэффициенты разложения магнитной индукции в расплаве и тигле определяются из бесконечной системы алгебраических уравнений, которая после редукции размерности решается на ЭВМ. Ротор скорости и функция тока находятся суммированием трёхкратных рядов. Результаты расчётов по аналитическим выражениям сравниваются с результатами конечно-разностного решения. Получено хорошее количественное согласование результатов для ЭМ-поля и качественное – для ГД-полей.

Распределения МГД-полей существенно зависят от величины переходного электрического сопротивления. При $R_{\pi}=0$ (рис. 6а) наблюдается эффект концентрации вихревых токов под изолирующим промежутком между секциями тигля. Течение в пределах угловых размеров секции тигля имеет характер двухконтурной циркуляции, вихри прижаты к поверхности тигля (рис. 6в). При $R_{\pi} \geq 10^{-5}$ происходит разделение контуров замыкания вихревых токов в тигле и расплаве, и течение с аксиально направленными вихрями отсутствует. При промежуточных значениях $R_{\pi} = 10^{-11} \div 10^{-9}$ развитие вихрей происходит в благоприят-

ных условиях (рис. 6б), и характерное значение скорости расплава v_0 достигает максимума в зависимости от R_{II} . Исследованы также зависимости скорости v_0 от безразмерной частоты расплава и ширины изолирующего промежутка α . Характерная картина течения и векторов плотности вихревых токов при конечной ширине изолирующего промежутка приведена на рис. 6в ($\alpha = 8^\circ$).

Для теплового поля поворотнo-симметричного МГД-устройства с водоохлаждаемым тиглем характерен скачок температуры $\Delta T \sim 1500^\circ\text{C}$ на контакте расплава и тигля, который достигается при значении переходного теплового сопротивления $R_{II}^T \sim 10^{-2}$.

Заключение. Сокращённое изложение дано во вводной части автореферата. В заключении перечисляются основные результаты, полученные в диссертации, которые являются отражением выводов по каждой главе диссертации. Формулируются также нерешённые проблемы и направления дальнейших исследований.

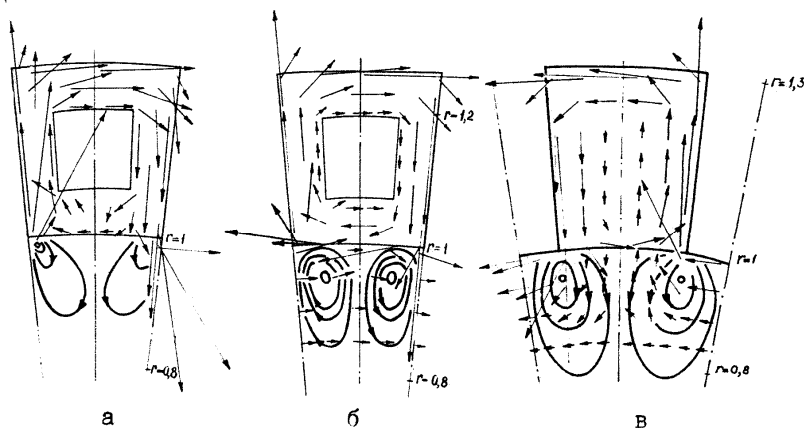


Рис. 6.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Павлов С.И. Расчет аксиально-симметричного электромагнитного поля.– В кн.: Тезисы докладов 1-ой студенческой конференции по гуманитарным и естественным наукам Прибалтийских республик и Белорусской ССР. Тарту; ТГУ, 1976, с. 59–60.

2. Микельсон Ю.Я., Якович А.Т., Павлов С.И. Численное исследование осреднённого МГД-течения в цилиндрической области с использованием рабочих гипотез для турбулентных напряжений. – Магнитная гидродинамика (МГД), 1978, №1, с. 51–58.

3. Якович А.Т., Павлов С.И. Численный эксперимент по расчёту скоростей и турбулентных напряжений для замкнутого осесимметричного МГД-течения.– В кн.: IX рижское совещание по МГД. Саласпилс: ИФ АН ЛатвССР, 1978, т. 1, с. 27–28.

4. Микельсон Ю.Я., Павлов С.И., Якович А.Т. Методика расчёта МГД-течения в произвольной осесимметричной области.– В кн.: IX рижское совещание по МГД. Саласпилс: ИФ АН ЛатвССР, 1978, т. 3, с. 73–74.

5. Якович А.Т., Павлов С.И. Некоторые конечно-разностные методы расчёта осесимметричного стационарного течения.– В кн.: Вопросы электродинамики и механики сплошных сред. Рига: ЛГУ им. П.Стучки, 1978, вып. 4, с. 44–62.

6. Микельсон Ю.Я., Павлов С.И., Якович А.Т. Методика численного расчёта осесимметричного МГД-течения в произвольной области.– В кн.: Электродинамика и механика сплошных сред. Рига: ЛГУ им. П.Стучки, 1980, с. 3–19.

7. Микельсон Ю.Я., Павлов С.И., Якович А.Т. Численное моделирование МГД-течения в области произвольной осесимметричной конфигурации.– МГД, 1980, №3, с. 73–80.

8. Микельсон Ю.Я., Якович А.Т., Павлов С.И. Численное моделирование МГД-процессов в индукционных электропечах.– В кн.: Применение токов высокой частоты в электротермии: Тезисы 9-ой Всесоюзной научно-технической конференции. Ленинград; ВНИИ ТВЧ, 1981, с. 121.

9. Микельсон Ю.Я., Павлов С.И., Якович А.Т. Расчёт формы свободной поверхности при аксиально-симметричном МГД-течении вязкой несжимаемой жидкости.– В кн.: X рижское совещание по МГД. Саласпилс: ИФ АН ЛатвССР, 1981, т. 3, с. 17–18.

10. Макарс Я.П., Павлов С.И., Якович А.Т. Численное и экспериментальное исследование динамики расплава для некоторого класса индукционных МГД-устройств.– В кн.: X рижское совещание по МГД. Саласпилс: ИФ АН ЛатвССР, 1981, т. 3, с. 19–20.

11. Павлов С.И., Тир Л.Л., Якович А.Т. Численное моделирование движения металла в индукционной печи с холодным тиглем.– В кн.: X

рижское совещание по МГД. Саласпилс: ИФ АН ЛатвССР, 1981, т. 3, с. 21–22.

12. Павлов С.И., Якович А.Т. К определению высоты и формы мениска в индукционной электропечи в гидростатическом приближении.– В кн.: Электродинамика и механика оплошных сред. Применение численных методов. Рига: ЛГУ им. П. Стучки, 1981, с. 56–69.

13. Павлов С.И., Якович А.Т. Методика расчёта формы свободной поверхности при осесимметричном МГД-течении вязкой несжимаемой жидкости.– В кн.: Электродинамика и механика сплошных сред. Применение численных методов. Рига: ЛГУ им. П. Стучки, 1981, с. 70–77.

14. Микельсон Ю.Я., Павлов С.И., Якович А.Т. Численное исследование влияния формы тигля, индуктора и мениска на МГД-течение в индукционных электропечах.– В кн.: Применение МГД в металлургии и литейном производстве: Тезиса докладов 2-ой Всесоюзной научно-технической конференции. Киев: ИПЛ АН УССР, 1981, т. 1, с. 21–26.

15. Павлов С.И., Якович А.Т. Влияние мениска на циркуляцию расплава в индукционной электропечи.– МГД, 1981, №3, с. 104–109.

16. Павлов С.И., Тир Л.Л., Якович А.Т. Математические модели и методика расчёта электромагнитного поля и движения расплава в индукционной печи с холодным тиглем.– В кн.: Электродинамика и механика сплошных сред. Математическое моделирование. Рига: ЛГУ им. П.Стучки, 1982, с. 3–19.

17. Гельфгат А.Ю., Павлов С.И. Аналитический расчёт электромагнитного поля и движения расплава в зоне контакта с холодным тиглем индукционной печи.– В кн.: Электродинамика и механика сплошных сред. Математическое моделирование. Рига: ЛГУ им. П.Стучки, 1982, с. 20–29.

18. Якович А.Т., Павлов С. И. Комплекс программ для численного моделирования электромагнитных, гидродинамических и тепловых полей в аксиально-симметричных металлургических установках с замкнутым течением жидкого металла.– Рига, 1983.– 3 с. (Информ. листок о науч.-техн. достижениях /ЛатНИИ НТИ: № 83-11, серия 50.41).

19. Клявинь Я.Я., Павлов С.И., Туркс Э.В. Численное моделирование движения жидкого металла при электромагнитном воздействии на затвердевающий непрерывный слиток.– В кн.: Математическое моделирование процессов затвердевания металлов и сплавов. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1983, с. 96–97.

20. Павлов С. И. О выборе метода численного расчёта движения расплава в индукционной тигельной печи.– В кн.: Электродинамика и механика сплошных сред. Промышленные процессы и устройства. Рига: ЛГУ им. П. Стучки, 1983, с. 3–21.

21. Павлов С.И., Якович А.Т. Численное моделирование осесимметричного течения проводящем жидкости при подводе скрещенных индукционного и кондукционного токов.– В кн.: XI рижское совещание по МГД. Саласпилс: ИФ АН ЛатвССР, 1984, т. 1, с.67–70.

22. Клявинь Я.Я., Павлов С.И., Туркс Э.В. Численное исследование электромагнитного воздействия на струю расплава в кристаллизаторе машины непрерывного литья.– В кн.: XI рижское совещание по МГД. Саласпилс: ИФ АН ЛатвССР, 1984, т. 2, с. 119–122.

23. Никифорова Н.В., Павлов С.И., Тир Л.Л. Методика расчёта МГД-течения расплава в индукционной печи с холодным тиглем.– В кн.: XI рижское совещание по МГД. Саласпилс: ИФ АН ЛатвССР, 1984, т. 2, с. 223–226.

24. Никифорова Н.В., Павлов С.И., Тир Л.Л. Расчёты электромагнитных, энергетических и гидродинамических характеристик индукционной печи с холодным тиглем (двухмерная модель).– МГД, 1984, № 2, с. 101–110.

ПАВЛОВ Сергей Иванович

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМКНУТОГО ТЕЧЕНИЯ
ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати	22.10.1984 г.	ЯТ 09293	Ф/б 60x84/16.
Бумага № 1.	1,3 физ.печ.л.	1,2 усл.печ.л.	1,0 уч.-изд.л.
Тираж 120 экз.		Зак. № 1601	Бесплатно

Отпечатано в типографии, Рига 226050, ул. Вейденбаума, 5,
Латвийский государственный университет им.П.Стучки