

Академия наук Украины
Институт электродинамики

На правах рукописи

ЭРКЕНОВ Наурузби Хусейнович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ
В МГД УСТРОЙСТВАХ

Специальность 05.09.05 - "Теоретическая электротехника"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1992

Работа выполнена в Институте электродинамики АН Украины

Научный руководитель - канд. техн. наук, старший научный
сотрудник ГОРИСЛАВЕЦ Ю.М.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Кравченко А.Н.;

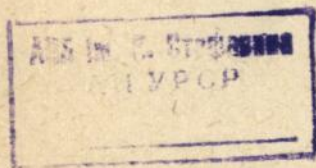
кандидат технических наук
Борукаев Зелимхан Харитонович

Ведущее предприятие - Киевский политехнический институт

Защита диссертации состоится "23" декабря 1992 г. в _____ час.
на заседании специализированного Ученого совета Д 016.30.03
в Институте электродинамики АН Украины по адресу:
252600, Киев-57, проспект Победы, 56, тел. совета 446-91-15

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
электродинамики АН Украины .

Автореферат разослан "20" ноября 1992 г.



ЛНБ України ім.В.Стефаника



00814396 (V)

Ученый секретарь
специализированного Ученого совета,
доктор технических наук

В.С.Федук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в различных областях народного хозяйства все более широкое применение находят электро-технологические устройства с жидкометаллическим рабочим телом, принцип действия которых базируется на использовании магнитогидродинамических (МГД) явлений. Относительная простота их конструктивного исполнения, отсутствие вращающихся деталей, возможность активного целенаправленного воздействия на жидкий металл (ЖМ) силами электромагнитного происхождения обусловили дальнейшие исследования, направленные на разработку и создание новых, перспективных МГД устройств.

Принципиально важное значение приобретает использование их в металлургической промышленности. Именно благодаря применению МГД методов стало возможным решение таких задач, как повышение качества выплавляемых металлов и сплавов, получение материалов с наперед заданными свойствами, очистка расплава от неметаллических включений и т.д.

Без математического моделирования электромагнитных процессов в ЖМ этих устройств, позволяющего априори оценить преимущества и недостатки различных конструктивных решений, невозможно создать высокоэффективные МГД устройства. Вместе с тем, необходимость выполнения многовариантных численных экспериментов на ЭВМ с целью исследования зависимостей распределения электромагнитного поля (ЭМП), электромагнитных сил (ЭМС) и электромагнитных давлений (ЭМД) в ЖМ от геометрических размеров и конфигурации расчетных областей, расположения внешних источников ЭМП и ферромагнитных сердечников по отношению к объему с ЖМ требуют разработки экономичных алгоритмов и программ.

Реферируемая работа посвящена решению перечисленных задач. Научные и практические результаты, положенные в ее основу, получены в процессе выполнения научно-исследовательских работ Института электродинамики АН Украины: "АРГОС" (по постановлению Президиума АН Украины от 25.II.83 г.), "РАНГ" (по постановлению ГКНТ № III от 2I.II.85 г.) и многих хозяйственных договоров.

Цель работы и задачи исследования. Целью настоящей работы является разработка эффективных и экономичных математических ме-

толов, алгоритмов и программ расчета электромагнитного поля, электромагнитных сил и электромагнитных давлений в жидком металле МГД устройств для плавки, очистки и гранулирования жидких металлов, а также исследование на их основе зависимостей распределения этих величин от геометрических форм, размеров и взаимного расположения основных элементов (индуктора, жидкого металла, ферромагнитных сердечников) этих устройств.

Указанная цель достигнута в процессе решения следующих основных задач.

1. Создать математическую модель, алгоритм и программу расчета ЭМП на основе комбинированного метода.

2. Разработать алгоритм и программу расчета ЭМП методом интегральных уравнений в осесимметричной системе индуктор - жидкий металл - ферромагнетик.

3. Исследовать влияние геометрических параметров расчетных областей, взаимного расположения индукторов, объемов с ЖМ и ферромагнитных сердечников на распределение ЭМП, ЭМС и ЭМД в тигельных МГД устройствах.

4. Исследовать распределения ЭМП и ЭМС с учетом вращательного движения металла в канальных МГД устройствах.

5. Определить влияние интенсивности внешнего магнитного поля и формы сечения каналов на уровни ЭМД в жидком металле МГД устройств с кондукционным подводом тока в канал.

Методы исследования. Математические модели численного расчета ЭМП в МГД устройствах основаны на комбинированном методе граничных элементов - конечных разностей и методе интегральных уравнений. Редукция соответствующих уравнений в алгебраические выполнена интегро-интерполяционным методом и на основе метода полного осреднения. Сходимость итерационных процессов в вычислительных алгоритмах, соответствующих интегральным уравнениям, устанавливалась путем численных экспериментов на ЭВМ, а в комбинированном методе - с помощью аппарата функционального анализа. Достоверность полученных результатов расчета вихревых токов в проводящей среде (ЖМ) проверялась сопоставлением с экспериментально полученными данными на физических моделях.

Научная новизна. Разработан комбинированный метод граничных элементов - конечных разностей для численного расчета ЭМП в осесимметричной системе индуктор-массивное электропроводное тело.

Получена теоретическая оценка погрешности и сходимости метода. Впервые на основе этого метода выполнен расчет ЭМП в индукционных тигельных МГД устройствах. Исследованы зависимости распределения ЭМС в жидком металле, а также уровни электромагнитного давления в местах установки фильера от геометрических размеров тигля, индуктора и их взаимного положения.

На основе метода вторичных источников разработан алгоритм и программа расчета ЭМП в индукционных канальных МГД устройствах с вспомогательной электромагнитной системой (катушками), создающей вращательное движение ЖМ в каналах. Получено распределение плотности вихревых токов, электромагнитных сил и скорости вращательного движения ЖМ в цилиндрическом канале.

Разработан алгоритм и программа расчета ЭМП в МГД устройствах с кондукционным подводом ^{тока} в канал. Установлены графические зависимости ЭМД от интенсивности внешнего постоянного магнитного поля и формы сечения канала.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в разработке эффективных и экономичных алгоритмов и программ для расчета ЭМП, ЭМС и ЭМД в МГД устройствах на базе комбинированного метода граничных элементов - конечных разностей и метода вторичных источников, что позволило сформулировать рекомендации для создания оптимальных конструкций таких устройств.

Реализация результатов работы. Результаты расчетно-теоретического исследования и рекомендации по проектированию МГД устройств (грануляторов, индукционных канальных печей) используются на Красноярском металлургическом заводе, НПО "Энергия" (г. Москва), ПО "Ленцветмет" (г. Санкт-Петербург).

Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составляет около 177,5 тысяч рублей в год.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены:

1. На двенадцатом Рижском совещании по магнитной гидродинамике, г. Саласпилс, 1987 г.
2. На третьей Республиканской научно-технической конференции "Интегральные уравнения в прикладном моделировании", г. Одесса, 1989 г.
3. На Всесоюзной конференции "Физика и техника монодисперсных систем" 18-21 октября 1988 г. МЭИ, г. Москва.
4. На Республиканском семинаре "Повышение эффективности

электроэнергетических МГД устройств", г. Киев, 1989 г.

5. На международном симпозиуме *Symposium on Liquid Metal Magnetohydrodynamics*, Riga, , 1988 г.

6. На международной конференции *Proceedings of the Six International Iron and Steel Congress*, 1990 г. Японии.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 15 публикациях, в том числе: 6 статьях, 2 препринтах, 5 тезисах докладов, 1 научном отчете, 1 авторском свидетельстве.

На защиту выносятся:

1. Комбинированный метод граничных элементов-конечных разностей для расчета электромагнитного поля в осесимметричной системе индуктор-немагнитное электропроводное тело.

2. Алгоритм расчета установившихся синусоидальных и нестационарных ЭМП в массивных электропроводных телах.

3. Методика вычисления магнитной индукции на основе интегральных соотношений.

4. Математическая модель и алгоритм расчета ЭМП в индукционных канальных МГД устройствах с учетом индуцированных за счет движения JM токов.

5. Результаты численного моделирования ЭМП, ЭМС и ЭМД в жидком металле МГД устройств для плавки, очистки и гранулирования жидких металлов.

• Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 243 страницах машинописного текста, 48 иллюстраций, одного приложения на 9 страницах и списка использованной литературы, включающего 130 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны исследуемые в работе МГД устройства и принципы их функционирования. Такими устройствами являются широко используемые в настоящее время в промышленности индукционные тигельные и канальные печи, а также сравнительно новые, в основном разработанные в Институте электродинамики АН Украины, МГД устройства: индукционные канальные печи с вращательным движением металла в канале, индукционные тигельные и канальные МГД грануляторы, МГД грануляторы с внешним магнитным полем и кондукционным подводом тока в канал. Здесь также сформулированы цель и задачи

диссертационной работы.

В первой главе диссертации выполнен анализ работ, посвященных численному моделированию электромагнитных полей в электропроводных средах. Рассмотрены наиболее распространенные подходы к решению этой проблемы. Выделены достоинства и недостатки методов интегральных уравнений (МИУ), конечных разностей (МКР) и существующих в настоящее время гибридных (комбинированных) методов. На основании проведенного анализа делается вывод о перспективности последних, сочетающих в себе лучшие качества МИУ, МКР и МКЭ в едином алгоритме. При этом выбор базовых методов должен быть продиктован структурой краевой (начально-краевой) задачи, что позволит разработать рациональный вычислительный процесс.

Во второй главе диссертации излагаются два варианта такого подхода к расчету ЭМП в областях с открытой границей. Концептуально они идентичны и отличаются только выбором неизвестных переменных и способом определения дискретных граничных значений.

За неизвестные переменные в первом варианте приняты напряженность электрического поля \vec{E} в электропроводной среде и напряженность магнитного поля \vec{H} по границе расчетной области Γ [3].

Математическая формулировка задачи расчета ЭМП в осесимметричной системе индуктор-массивное электропроводное тело (установившийся синусоидальный процесс) относительно этих переменных имеет следующий вид:

Интегральное выражение вдоль границы Γ области D_m (рис.1)

$$0,5 \vec{H}(\rho) = \iint_{D_m} [\delta_m \nabla G] ds_m - \int_{\Gamma} \{ [\vec{n} \vec{H}] \nabla G + (\vec{n} \vec{H}) \nabla G \} dl_m, \quad (1)$$

$\vec{E}(\rho, z) = 0$ на оси симметрии (OD) и уравнение внутри этой области

$$\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{E}}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + j\omega \mu_0 \vec{E} = 0, \quad (2)$$

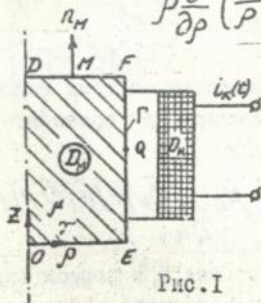


Рис.1

где $\delta_m(\rho, z)$ – плотность тока в катушке, $G(\theta, m)$ – функция Грина уравнения Лапласа, \vec{n} – орт нормали к Γ , $\vec{E} = \rho \vec{E}$. Связь между (1) и (2) устанавливается с помощью уравнения $\text{rot} \vec{E} = -j\omega \mu_0 \vec{H}$.

В области D_m применяется локально-

одномерный метод (ЛОМ) для решения системы двух двумерных вещественных уравнений эквивалентных (2). При этом по направлению координатных осей выполняется матричная прогонка, определяется вектор с компонентами E_x, E_y в \bar{D}_M . Далее численным интегрированием согласно (1) по границе Γ вычисляются дискретные значения компонент вектора напряженности \vec{H} в граничных узлах разностной сетки. По уточненным граничным значениям \vec{H} внутри области D_M и на ее границе, снова определяются E_x, E_y и т.д. Процесс продолжается до выполнения критерия сходимости итераций "область-граница".

Второй вариант комбинированного метода изложен применительно к расчету нестационарного электромагнитного поля [12]. Хотя в диссертационной работе рассматриваются только гармонические величины, позволяющие сводить исходные уравнения поля к уравнению Гельмгольца, с теоретической и практической точек зрения представляется интерес исследование эффективности и экономичности метода применительно к анализу переходных процессов.

В этом случае начально-краевая задача формулируется относительно функции $\hat{A} = \rho A$ и состоит:

из уравнения в области D_M (рис.1)

$$\gamma \frac{\partial \hat{A}}{\partial t} = \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{1}{\mu \rho} \frac{\partial \hat{A}}{\partial \rho} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \hat{A}}{\partial z} \quad (3)$$

и граничных условий

$$\frac{\partial \hat{A}}{\partial n} = f(\rho, z, t) \quad - \text{ на границе } \Gamma, \quad (4)$$

$$\hat{A}(0, z, t) = 0 \quad - \text{ на оси симметрии.} \quad (5)$$

Начальное условие -

$$\hat{A}(\rho, z, 0) = 0. \quad (6)$$

Функция $f(\rho, z, t)$ определяется решением системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), аппроксимирующей граничное интегральное выражение:

$$0,5 A(Q) = \int_{\Gamma} \left[A \frac{\partial G}{\partial n_M} - G \frac{\partial A}{\partial n_M} \right] dl_M + \mu_0 \iint_{D_M} \delta_M(t) G(Q, P) dS_P. \quad (7)$$

Вычислительный процесс базируется, так же как и в первом варианте, на простых итерациях. При этом в \bar{D}_M реализуется локально-од-

номерный метод, определяются дискретные значения векторного потенциала A внутри и на границе области. Используя последние, уточняются граничные условия согласно (7) и т.д. до выполнения критерия сходимости.

В работе получены теоретические оценки погрешности метода. Доказана теорема, согласно которой погрешность определяется тремя основными величинами: погрешностью дискретизации интегрального и дифференциального операторов, а также погрешностью итерационного процесса, сходящегося со скоростью геометрической прогрессии со знаменателем $C\Delta\tau$, где C - коэффициент независимой от параметров h , τ - конечно-разностной сетки.

Благодаря высокой экономичности метода оказалось возможным расчет установившегося синусоидального процесса проводить путем установления решения начально-краевой задачи. Численные эксперименты показали, что решение устанавливается с точностью 3-5% за три периода.

Третья глава диссертации посвящена численному анализу распределения ЭМП, ЭМС и ЭМД в жидком металле индукционных тигельных МГД устройств, конструкции которых схематически изображены на рис.2. Они представляют собой различные типы тигельных МГД грануляторов, принцип действия которых основан на резонансном распаде истекающих из фильер (отверстий) струй жидкого металла под действием периодических электромагнитных сил.

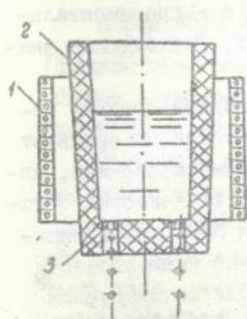


Рис.2 а)

Каждый из них состоит из цилиндрического индуктора, 1, внутри которого расположен тигель 2 с жидким металлом. В дне тигля монтируются фильеры 3 (рис.2а и б), либо фильерный насадок 4 с отверстиями на его боковой поверхности (рис.2в). Тигель гранулятора может выполняться с внутренним проходным отверстием, в котором с целью увеличения электромагнитной связи между индуктором и жидким металлом располагается ферромагнитный сердечник (рис.2б). На рис.2в условно показан также фильтр 6 из песно-керамики, установленный в тигле в тех случаях, когда необходимо очищать жид-

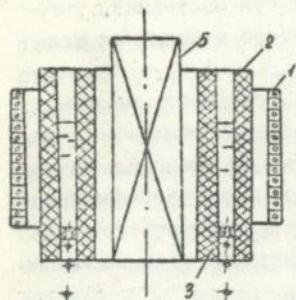


Рис. 2 б)

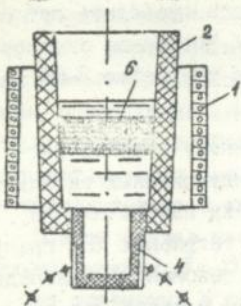


Рис. 2 в)

кий металл (например, алюминий) от немагнитических включений.

Расчет ЭМП в МГД устройствах, представленных на рис. 2а и 2в, выполнен на основе комбинированного метода ГЭКР, а в системе с ферромагнитным сердечником (рис. 2б) - методом интегральных уравнений. При этом ступенчатая расчетная область, соответствующая гранулятору с горизонтальным истечением струи (рис. 2в), достраивалась до прямоугольника. Единобразие алгоритма и высокая вычислительная технологичность метода обеспечивалась сохранением параболического типа дифференциального уравнения относительно функции потока A во всей прямоугольной области за счет введения искусственной проводимости γ_0 . Значение ее в непроводящих подобластях (пеночермика, воздух), подбираемое путем численных экспериментов при $\gamma_0 \rightarrow 0$, принято $10^{-4} - 10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$.

Достоверность машинных результатов (распределение плотностей токов в жидком металле, коэффициент трансформации) устанавливалась путем сопоставления с экспериментальными данными, полученными на физических моделях. Расхождения значений этих величин не превышают 10%.

Определение индукции магнитного поля при решении полевых задач методом граничных элементов - конечных разностей не вызывает затруднений и проводится по простейшим разностным выражениям, аппроксимирующим производные по переменным ρ и z от векторного потенциала A . В тех случаях, когда привлекается ММУ, дифференцирование приводит к громоздким формулам и усилению сингулярности интегралов в них. Эти затруднения в работе обходятся следующим образом [7]. В центрах элементарных площадок D_{Ml} ($1 \leq l \leq N_M$, N_M - число дискретизации), на которые разбивается расчетная область D_M , записываются конечно-разностные аппроксимации частных производных от A . Подставив в них выражение для A , получаем векторно-матричное представление компонент V_ρ, V_z , коэффициенты матриц которых имеют следующую структуру

$$a_{rk} = \frac{M_0}{2\pi \Delta Z \sqrt{\rho_r}} \iint_{D_{MK}} [T(\rho_r, z_r; M) - T(\rho_r, z_r^*; M)] dS_M, \quad (8)$$

где $T(Q, M)$ - ядро интегрального уравнения. Аналогичный вид имеют и остальные элементы матриц. В результате удается сохранить единую вычислительную схему как для определения коэффициентов СЛАУ, в которую редуцируются исходные ИУ, так и коэффициентов матриц, входящих в формулы для \vec{B} .

Расчет электромагнитных сил, возникающих в результате взаимодействия вихревых токов в жидком металле с результирующим магнитным полем рассматриваемых систем, выполнен по следующим формулам:

$$f_p = \delta B_z [\cos(\psi_0 - \psi_{B_z}) + \cos(2\omega t + \psi_0 + \psi_{B_z})]; \quad (9)$$

$$f_z = \delta B_p [\cos(\psi_0 - \psi_{B_p}) + \cos(2\omega t + \psi_0 + \psi_{B_p})],$$

где δ , B_p , B_z - эффективные значения, ψ - соответствующие фазовые углы.

Соответствующие составляющие имеет и электромагнитное давление, которое в предположении гидростатического приближения (без учета движения ЖМ) вычислено следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{постоянная составляющая } \bar{P} &= \int_{L_1} \bar{f}_p d\rho + \int_{L_2} \bar{f}_z dz; \\ \text{переменная составляющая } \beta &= \int_{L_1} \hat{f}_p d\rho + \int_{L_2} \hat{f}_z dz. \end{aligned} \quad (10)$$

Пределы интегрирования в (10) устанавливаются в каждом конкретном случае с учетом формы сечения жидкого металла и места, в котором необходимо знать электромагнитное давление.

На основе разработанных алгоритмов составлены пакеты программ на алгоритмическом языке Фортран IV. Каждый шаг вычислительного процесса (один вариант анализа) заканчивается выдачей на печать (экран) распределения плотности вихревых токов, индукции магнитного поля, постоянных и переменных составляющих электромагнитных сил и электромагнитного давления, а также мощности джоулевого тепловыделения.

Расчетные модели тигельных МГД устройств представлены на рис. 3, где схематически приведены грануляторы с вертикальным

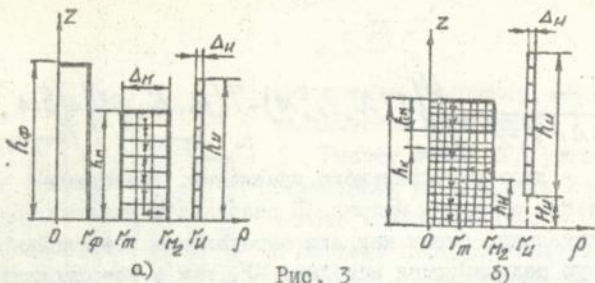


Рис. 3

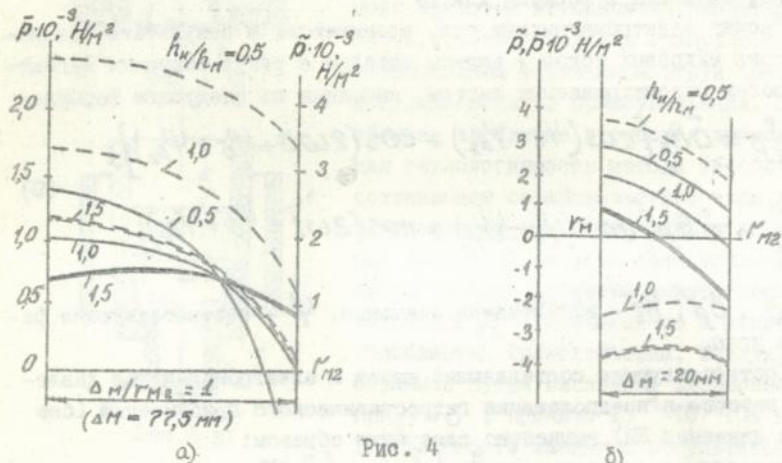


Рис. 4

(рис.3а) и горизонтальным (рис.3б) истечениями струй жидкого металла). Электромагнитное давление в первом случае определено на дне тигля ($Z = 0$), во втором - на боковой поверхности насадки. Пути интегрирования в формулах (10) показаны на этих рисунках стрелками.

В результате проведенных серийных расчетов получены зависимости (рис.4) постоянной \bar{P} (сплошные линии) и переменной \tilde{P} (пунктирные линии) составляющих электромагнитного давления, позволяющие определить скорость истечения струй ЖМ и условия их распада (дробления) на частицы равных размеров. Кривые 4а, б и в соответствуют устройствам, представленным на рис.2а, б и в соответственно.

Установлены также зависимости мощности джоулевого тепловыделения P от геометрических соотношений h_n/r_m , h_p/r_m , h_n/r_n .

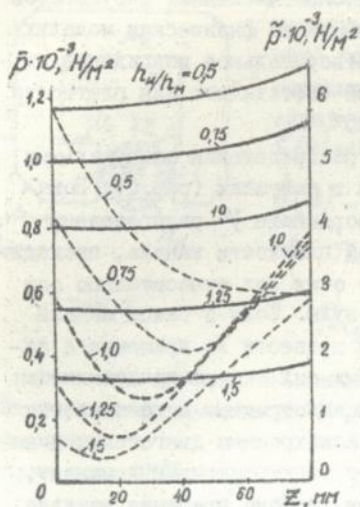


Рис. 4, в)

H_m/H_{max} (см. рис. 3б), где H_{max} - максимальная высота металла над фильтром при самом нижнем его расположении в тигле. Установлено, что при гранулировании металлов и сплавов, рабочая температура которых не превышает 700°C , выделяемое джоулево тепло компенсирует тепловые потери в окружающую среду и нет необходимости дополнительного обогрева тигля. Если же по условию работы требуемая температура выше, то следует использовать МГД грануляторы с ферромагнитным сердечником, либо предусмотреть дополнительный обогрев.

Четвертая глава диссертации посвящена моделированию электромагнитных процессов в индукционных канальных МГД устройствах.

К ним относятся индукционные канальные печи, устройства для непрерывного МГД рафинирования, а также канальные МГД грануляторы. В общем случае расчетная модель этих устройств представляет собой канал 1 с ЖМ, многovitковый индуктор 2 и замкнутый магнитопровод 3 (рис. 5). В индукционных канальных печах и в устройствах для МГД рафинирования с целью создания вращательного движения металла в каналах служат дополнительные катушки 4.

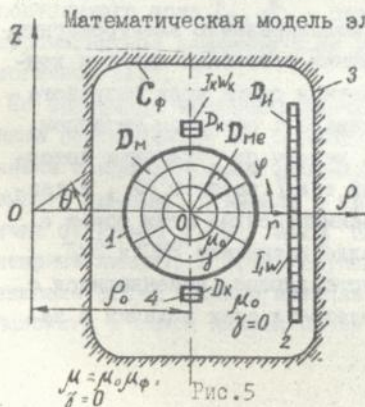


Рис. 5

Математическая модель электромагнитных процессов в таких МГД устройствах, сформулированная на основе МКУ, состоит из интегральных уравнений, описывающих распределение электрического поля \mathcal{E} в ЖМ и связанных токов \vec{O} на границе магнитопровода, а также эмпирической зависимости для скорости движения металла в цилиндрическом канале [5].

В результате численного решения этих уравнений получено распределение электрического тока, электромаг-

нитных сил и скорости вращательного движения в поперечном сечении цилиндрического канала печи. Сравнение численных результатов с экспериментальными данными, полученными на физических моделях и промышленных печах, показало удовлетворительное совпадение их между собой. Расхождения этих значений составляют: для плотности тока - менее 10%, для скорости - до 25%.

Получены графические зависимости распределения азимутальных электромагнитных сил от величины тока в катушках (рис.6). Показано, что при $I_c \times W_k = 0$ силы f_{φ} по координате φ распределены симметрично относительно диаметральной плоскости канала, проходящей через $\varphi = 0$ и π . Поэтому момент этих сил относительно оси канала равен нулю. Если в таком канале жидкий металл привести во вращение с помощью сторонних сил, то распределение становится несимметричным и по аналогии с однофазным асинхронным двигателем в канале возникает электромагнитный момент, направленный в сторону вращения металла.

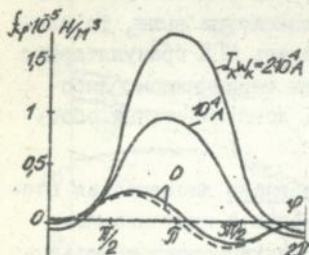


Рис.6

В отсутствие дополнительных катушек модель, представленная на рис.5, соответствует каналному МГД гранулятору. Для этого случая были найдены распределения ЭМП, ЭМС и ЭМД в жидком металле такого устройства. На основании вычислительного эксперимента установлено, что максимальные значения давления (как постоянной, так и переменной во времени составляющих) достигаются на противоположной со стороны индуктора поверхности канала, где и целесообразно устанавливать фильтры.

Пятая глава диссертации посвящена моделированию электромагнитных процессов в МГД грануляторах с внешним магнитным полем и кондукционным подводом тока в канал. Расчетная схема этих устройств (рис.7) состоит из электропроводного канала 1 с жидким металлом, помещенный в зазор электромагнита 2. К каналу от отдельных источников питания подводится синусоидальный ток I частоты ω , а также постоянный ток I_0 . В результате взаимодействия этих токов с магнитным полем системы, в жидком металле возникает ЭМС и ЭМД, имеющие постоянную и две переменные составляющие, изменяющиеся с частотами ω и 2ω [8]. Анализ распределения этих величин в за-

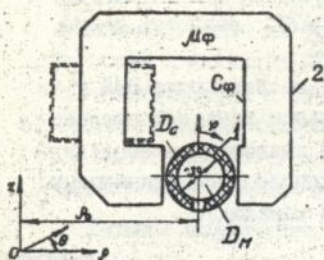


Рис. 7

висимости от формы сечения канала и интенсивности внешнего постоянного магнитного поля выполнен на основе численного решения системы интегральных уравнений вида:

$$\dot{E}(Q) + j\lambda_0 T_{kk} f \dot{E} = -j\lambda_0 T_{k\varphi} \dot{\sigma} + \frac{U}{2\pi r \rho_0} \quad (II)$$

$$\dot{\sigma}(Q) - \alpha S_{\varphi} C_{\varphi} \dot{\sigma} = \alpha T_{\varphi k} f \dot{E},$$

где $T_{kk} \dot{E} = \iint_D f(M) \dot{E}(M) dS_M,$

$$T_{k\varphi} \dot{\sigma} = \int \dot{\sigma}(M) T(Q, M) dl_M \text{ и т.д.,}$$

U - напряжение на канале (неизвестная величина).

Электромагнитные силы в ЖМ устройства вычисляются по следующим формулам:

постоянные ЭМС -

$$\tilde{f}_r = \dot{\sigma}_0 B_{0z} + \dot{\sigma} B_z \cos(\psi_\sigma - \psi_{B_z}); \quad (I2)$$

$$\tilde{f}_z = \dot{\sigma}_0 (B_\theta + B_{\theta p}) + \dot{\sigma} B_p \cos(\psi_\sigma - \psi_{B_p}); \quad (I3)$$

амплитудные значения переменных ЭМС частоты ω -

$$\tilde{f}_{rm} = \sqrt{2} |\dot{\sigma}_0 \dot{B}_z + \dot{\sigma} \dot{B}_{0z}|; \quad \tilde{f}_{zm} = \sqrt{2} |\dot{\sigma}_0 \dot{B}_p + \dot{\sigma} (B_\theta + B_{\theta p})|; \quad (I4)$$

амплитудные значения переменных составляющих ЭМС частоты 2ω -

$$\tilde{f}_{rpm} = \dot{\sigma} \dot{B}_z, \quad \tilde{f}_{zpm} = \dot{\sigma} \dot{B}_p, \quad (I5)$$

где B_θ - индукция внешнего поля; $B_{\theta p}(z)$ - составляющие индукции от постоянного тока I_0 , $\dot{\sigma}_0$ - плотность тока, соответствующая I_0 . Электромагнитное давление в ЖМ канала определяется по формулам, аналогичным (I0).

На основании численных расчетов установлено следующее. Постоянная составляющая \bar{P} и амплитуда переменной составляющей \tilde{P} в канале с прямоугольным сечением на боковой стенке изменяются по высоте линейно. В канале с круглым сечением зависимость этих величин от φ ($-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$) и B_θ близка к линейному (рис. 8, \bar{P} - пунктирные линии). В обоих случаях максимальные воздействия на истекающие струи жидкого металла можно получить, если фильтры расположить в самой нижней части каналов. Вклад переменного дав-

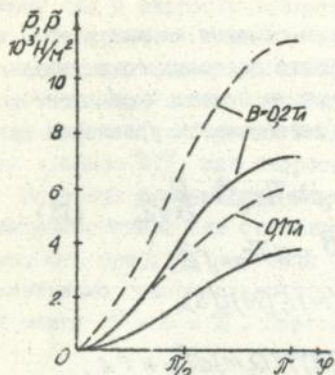


Рис. 8

ления \tilde{P} удвоенной частоты 2ω в общем случае давление при $V_g \neq 0$ является несущественным.

Установлено, что составляющие ЭМД \bar{P} и \tilde{P} в прямоугольном канале в несколько раз превышают аналогичные составляющие в круглом канале (при одинаковых значениях тока в каналах).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый комбинированный метод численного расчёта синусоидальных установившихся и нестационарных электромагнитных полей в массивных электропроводных телах с осевой симметрией. Сочетание лучших качеств методов расщепления многомерных дифференциальных уравнений на цепочку одномерных и граничных элементов в едином алгоритме позволило разработать экономичный вычислительный процесс расчёта ЭМП в открытых областях.
2. Выполнены теоретические исследования точности и сходимости метода. Установлено, что его точность определяется погрешностью дискретизации дифференциальных и интегральных операторов, а также погрешностью итерационного процесса область-граница, сходящегося со скоростью геометрической прогрессии, знаменатель которой $ch\tau$ (h, τ - параметры конечно-разностной сетки).
3. Путем проведения вычислительных экспериментов получены зависимости электромагнитного давления, мощности тепловыделения в жидком металле от взаимного положения тигля и индуктора, толщины металла, наличия ферромагнитной среды, положения фильтрующего элемента в тигле индукционных тигельных МГД грануляторов.
4. Разработаны математическая модель и алгоритм расчёта ЭМП в индукционных канальных МГД устройствах с учетом индуцированных за счет движения ЭМ токов. Получены зависимости распределения электромагнитных сил и скорости движения ЭМ в каналах этих устройств.
5. Выполнено исследование влияния формы сечения канала с кусочно-

постоянной проводимостью, интенсивности внешнего постоянного магнитного поля на уровне электромагнитного давления в жидком металле канального МГД гранулятора с кондукционным подводом синусоидального и постоянного токов в канал.

6. Проведенные исследования позволили сформулировать рекомендации по конструктивному исполнению МГД устройств, обеспечивающие эффективную и надежную их работу.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:


1. Елинов В.И., Гориславец Ю.М., Темеров А.А., Эркенов Н.Х. Полидисперсные МГД течения в каналах индукционных печей для плавки алюминиевых сплавов // Тез. докл. XII Рижского совещания по МГД. Саласпилс. - 1987. Ч.2. - С.203-206.
2. *Blinov V.I., Ehrkenov N.Kh., Gorislavets Yu.M., Kolesnichenko A.F. a.o. Liquid metal flows with polydispersed solid and gaseous inclusions. Proc. of IUTAM Symp. on Liquid Metal Magn, Riga 16-20 May, 1988, pp.91-96.*
3. Горбатюк М.Ф., Гориславец Ю.М., Эркенов Н.Х. Комбинированный интегро-разностный метод расчета электромагнитного поля // Тез. докл. третьей Республиканской научно-технической конференции. Одесса, Ч.Ш, 1989. - С.41-42.
4. *N.Kh.Ehrkenov, Yu.M.Gorislavets, A.F.Kolesnichenko, N.V.Lysak. Theoretical derivation of electromagnetic field for MHD Granulators. Proc. of The Sixth Inter. Iron and Steel Congress, Nagoya, pp.422-423*
5. Гориславец Ю.М., Эркенов Н.Х. Электромагнитное поле индукционной печи с вращательным движением жидкого металла в каналах. Техническая электродинамика. - 1990, № 2, С.15-20.
6. Гориславец Ю.М., Эркенов Н.Х. Магнитное давление в жидком металле индукционных МГД грануляторов канального типа. Техническая электродинамика. - 1988, № 6, С.21-27.
7. Гориславец Ю.М., Эркенов Н.Х. Расчет магнитного давления в индукционных МГД грануляторах тигельного типа. Техническая электродинамика. - 1988, № 3, С.9-15.
8. Гориславец Ю.М., Эркенов Н.Х. Расчет магнитного давления в канале МГД гранулятора с внешним магнитным полем. Техническая электродинамика. - 1990, № 5, С.25-30.

АНБ им. В. Стефанюка
АН УРСР

9. Гориславец Ю.М., Эркенов Н.Х. Расчет магнитного давления в жидком металле индукционных МГД грануляторов тигельного типа. - Киев, 1988 (Препринт Ин-та электродинамики АН УССР, № 567), - 30с.
10. Гориславец Ю.М., Эркенов Н.Х. Магнитное давление в жидком металле тигельных МГД грануляторов с ферромагнитным сердечником. Сб. науч. тр. - К.: Наукова думка, 1988, С. 43-49.
11. Гориславец Ю.М., Колесниченко А.Ф., Ещенко Б.А., Эркенов Н.Х. и др. Магнитогидродинамические системы плавки и непрерывной отливки металлов. - Киев, 1990 (препринт Института электродинамики АН УССР, № 672). - 17 с.
12. Подольцев А.Д., Эркенов Н.Х. Комбинированный метод граничных элементов-конечных разностей для расчета вихревых токов в осесимметричных телах. Известия вузов. Электромеханика, 1991, № 4, С. 12-18.
13. Разработать новые энерго- и материалосберегающие технологии силового и термического воздействия на металлы с помощью электромагнитного поля. Отчет НИР. Институт электродинамики АН УССР, 1986, № гос. регистрации 01.86.0032910
14. А.с. № 1405975. Устройство для получения гранул из металлических расплавов. Бундя А.П., Гориславец Ю.М., Колесниченко А.Ф., Эркенов Н.Х. и др. - Опубл. 30.06.88. Бюл. № 24.
15. Бундя А.П., Гориславец Ю.М., Граудул В.Н., Колесниченко А.Ф., Эркенов Н.Х. МГД-грануляторы для получения монодисперсных частиц из металлических расплавов // Тез. докл. Всесоюз. конф. Физика и техника монодисперсных систем, г. Москва, 18-21 окт. 1988 г., с. 26-28.

Личный вклад автора

В работах [1,2,3-13] автору принадлежат разработка математических моделей, алгоритмов и программ анализа электромагнитных процессов МГД устройств, а также участие в анализе результатов вычислительных экспериментов; в [3,12] - идея метода, теоретическая оценка его погрешности и сходимости, разработка алгоритма и программы; в [14,15] - численное исследование электромагнитных процессов устройства для получения гранул из металлических расплавов.



ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Подписано к печати 11. 11. 1992. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ. лист. /С Уч.-изд. лист
Тираж /20. Заказ /203. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

U68.962

AB 26.056

AB 26.056