

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

ЗАЛОЗНЫЙ Владимир Иванович

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ  
СВОБОДНЫХ ГРАНИЦ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

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

Київ - 1983



00814742 (Q)

Робота виконана в Інституті

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
А.Ф.КОЛЕСНИЧЕНКО

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
В.Ф.РЕЗЦОВ

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
З.Х.БОРУКАЕВ

Ведущее предприятие - Донецкий государственный институт  
цветных металлов

Защита состоится 28.04 1983 г. в 11 час. на  
заседании специализированного совета Д 016.30.03 по защите  
диссертации при Институте электродинамики АН Украины по  
адресу: 252680, Киев - 57, проспект Победы, 56.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института электродинамики АН Украины.

Автореферат разослан 24.03 1983 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
доктор технических наук

В.С.ФЕЛИИ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время большое внимание уделяется созданию энергосберегающих технологий, которые основаны на использовании прикладной технической электродинамики. На ее основе создан ряд новых технологий. Появление и широкое использование в промышленности МГД насосов, МГД грануляторов, МГД сепараторов, устройств для перемешивания и транспортировки жидких металлов, электромагнитных кристаллизаторов - далеко не полный перечень базового оборудования для создания комплексных автоматизированных технологий при получении заготовок черных и цветных металлов высокого качества, для эффективного применения которых необходим их детальный электродинамический расчет.

Весьма перспективным направлением является создание электромагнитных систем, которые способны целенаправленным электромагнитным силовым воздействием устранить контакт расплавленного металла, представляющего собой агрессивную среду, с различного рода стенками, представляющие собой технологические звенья. Особенно остро эта проблема стоит в тех устройствах, где имеются подвижные части. Например, в системах получения листовой металлической заготовки с помощью машин непрерывного литья (МНЛ) валкового типа.

Специфика использования и режимов работы силовых электромагнитных систем для целей удержания жидкого металла обуславливает гидродинамические возмущения, приводящие к искажению форм свободных границ. Последнее обстоятельство вызывает повышенный интерес к исследованию структуры электромагнитных полей с учетом конкретных геометрических размеров и основных параметров, характеризующих данный физический процесс, и требует поиска технически приемлемых решений. Аналогичные задачи характерны и для других электротехнических устройств с жидкометаллическим рабочим телом.

Таким образом, анализ электромагнитных процессов при формировании свободных границ жидких металлов имеет большое народнохозяйственное значение, представляет существенный научный и практический интерес.

Настоящая работа выполнена в соответствии с планами Института электродинамики АН Украины в рамках Всесоюзной научно-технической программы "Провести экспериментальные работы, разработать техноло-

гию, создать оборудование для непрерывного литья тонких полос (толщиной 1-10 мм) для последующей холодной деформации и тонких слябов (толщиной 20-80 мм) для чистовой горячей прокатки" (постановление ГКНГ СССР № 202 от 29.08.87г., распоряжение Президиума АН УССР №1759 от 19.08.87г.), а также НИР "Разработать новые энерго- и материалосберегающие технологии силового и термического воздействия на металлы с помощью электромагнитного поля, создать электротехнические средства для их реализации", шифр темы "Ранг", номер гос. регистрации ОI.86.0032910.

Целью работы является исследование структуры электромагнитных полей и их влияние на формирование свободных границ жидких электропроводных сред методами математического и физического моделирования; разработка численно-аналитических методик, алгоритмов и программ для анализа электромагнитных процессов в МГД устройствах. Объектом практического приложения таких расчетных схем избран двухвалковый электромагнитный кристаллизатор (ДЭК) с магнитоуплотняемыми торцами.

Исходя из сказанной цели решались следующие задачи:

1. Построение математической модели электромагнитных процессов в жидких проводниках при формировании их свободных границ.
2. Разработка алгоритмов расчета стационарных электрического и магнитного полей по торцам ДЭК на основе комбинированного использования метода частных решений и сеточного метода.
3. Обоснование и исследование электромагнитных систем формирования свободных границ жидкого металла по торцам ДЭК с учетом конструктивных особенностей и линейных размеров устройства.
4. Разработка математической модели анализа магнитогидродинамических процессов в жидком металле под воздействием объемных электромагнитных сил (ЭМОС) в торцевых зонах двухвалкового кристаллизатора.
5. Разработка пакетов программ, реализующих данные алгоритмы, расчёт магнитных давления и определение положения свободных поверхностей расплава на основе численных и физических экспериментов.
6. Исследование особенностей распределения джоулевого тепловыделения и его влияние на процесс кристаллизации в жидком металле.
7. Определение параметров источников питания систем удержания расплава электромагнитными полями на торцах ДЭК и выработка рекомендаций на их разработку.

Методы исследования. В теоретических и экспериментальных исследо-

ваниях использованы основные положения теории электрического и магнитного полей, магнитной гидродинамики, аналитические и численные методы решения уравнений для потенциалов электрического и магнитного полей, методы вычислительной математики, численный и физический эксперимент.

Научная новизна рассматриваемых в работе вопросов состоит в том, что впервые получено аналитическое решение задачи электромагнитного поля по торцам ДЭК в случае, когда электрический ток подводится к торцу одного вала и снимается с торца другого. Новыми являются методика определения положения свободных границ жидкого металла по торцам валкового кристаллизатора, которые испытывают действие электромагнитного поля. Это позволяет рассчитывать границы расплава в зависимости от параметров электромагнитных источников и линейных размеров ДЭК.

Разработана математическая модель анализа МГД явлений по торцам ДЭК для физических переменных. Электромагнитные давления определены методом последовательной верхней релаксации. Получены ранее неизвестные выражения для определения давления на границе, которые включают параметр релаксации. Эти выражения могут быть использованы для анализа физических процессов, описываемых аналогичными моделями. Исследованы кинематические структуры МГД потоков жидкого металла по торцам ДЭК в электромагнитном поле.

Полученные путем численного и физического моделирования электромагнитные характеристики в жидком металле ДЭК при различных электромагнитных ситуациях.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель электромагнитных процессов в жидком металле со свободными границами в области с билиндрической симметрией.
2. Новый подход к исследованию электромагнитных полей ДЭК с учетом его геометрических особенностей, основанный на раздельном моделировании их в межвалковом пространстве и теле вала.
3. Методика расчета электромагнитных полей в жидких электропроводных средах со свободными границами для различных электромагнитных ситуаций и изобретенных при участии автора магнитных систем.
4. Обоснование круга факторов, влияющих на процесс формирования замкнутых конфигураций жидкого металла в электромагнитном поле с помощью электромагнитных сил.

5. Алгоритмы расчета электромагнитных полей, МГД течений в жидком металле, основанные на использовании численно-аналитических методов.

6. Результаты численного и физического моделирования электромагнитных полей по торцам двухвалкового кристаллизатора для различных электромагнитных ситуаций.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в создании методики, алгоритмов и программ расчета распределения плотностей тока, магнитного поля, электромагнитных сил, давлений, поля скоростей в торцевых зонах валкового кристаллизатора и определение условий, при которых расплав удерживается от вытекания электромагнитным полем и формируется боковая кромка листовой заготовки.

Созданные в результате работы программы позволяют рассчитывать электромагнитные поля, обусловленные ими МГД процессы в расплавах при изменении геометрических размеров конструктивных элементов машин непрерывной разливки, что дает возможность использовать их в качестве основы при разработке математического обеспечения систем автоматизированного проектирования МГД устройств различного назначения.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты моделирования использованы при проектировании новых образцов МНЛЗ НИИ Тяжмаш ПО "Уралмаш". Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 472,3 тыс. руб. в год в ценах 1989 г.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены, обсуждены и одобрены на 6-м Международном конгрессе по чугуну и стали (г. Нагоя, Япония, 1990 г.), Международной конференции "Математическое моделирование в технологических процессах" (г. Сан-Диего, США, 1992 г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование в энергетике" (г. Киев, 1990 г.), Всесоюзной НТК "Прогрессивные процессы плавки и литья цветных металлов и сплавов" (г. Артемовск, 1989 г.), Всесоюзном НТС "Повышение качества плоского проката из тяжелых цветных металлов" (г. Москва, 1988 г.), Республиканском научно-техническом семинаре "Повышение эффективности электротехнических МГД устройств" (г. Киев, 1989 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Об-

Т

щий объем работы составляет 192 страницы, включая I таблицу по тексту, 48 рисунков, список литературы из 113 наименований.

### Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и основные задачи. Дана краткая характеристика работы, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен обзор существующих литературных источников по вопросам удержания жидкого металла в электромагнитном поле. Рассмотрены аспекты использования этого явления в технологических МГД-устройствах. Отмечено, что электротехническим устройствам с жидкометаллическим рабочим телом, находящимся под воздействием электромагнитного поля, свойственны электровихревые течения, которые играют важную роль в технологических процессах. В частности, циркуляция металла в электромагнитном поле приводит к подавлению роста дендритов, гомогенизации лигатур, выравниванию температур и др. С другой стороны, движение металла обуславливает неустойчивость свободных границ, возможное вовлечение в слиток шлаков, газов и т.п. Поэтому важной практической задачей является определение параметров МГД течений и приемлемость их для рассматриваемых технологических процессов. В связи с этим возникает повышенный интерес к исследованию структуры электромагнитных полей и особенностей его распределения в жидком металле.

Выполнен обзор существующих методов расчета электромагнитных и МГД полей. Отмечено, что область, занятая жидким металлом в этих устройствах, имеет сложную конфигурацию, и решение задачи поля не удастся получить в аналитическом виде. Обоснован комбинированный численно-аналитический подход к решению поля в сложных областях, который позволяет снизить погрешность расчетов и сэкономить ресурсы ЭВМ.

Вторая глава посвящена математическому моделированию электромагнитных процессов в жидком металле, помещенном в межвалковое пространство и испытывающем действие электромагнитного поля. В этой ситуации от источника тока стационарный электрический ток протекает от торца одного вала к торцу другого вала, замыкаясь через жидкий металл.

Электрическое поле в системе валок-жидкий металл характеризуется его потенциалом  $U(x, y, z)$ , который удовлетворяет уравнению Лапласа. Расчет поля в валке выполнен в цилиндрической системе координат согласно расчетной схеме, показанной на рис. I.

Уравнение для потенциала имеет вид

$$\frac{I}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial U}{\partial \rho} \right) + \frac{I}{\rho^2} \frac{\partial^2 U}{\alpha^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0; \quad (1)$$

Граничные условия

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \rho} \right|_{\rho=r_1} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial \rho} \right|_{\rho=R_0} = \begin{cases} j_n/\gamma; & \text{при } \alpha = 0 - \alpha_0 \\ 0; & \text{при } \alpha = \alpha_0 - 2\pi \end{cases}$$

(2)

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=0} = \begin{cases} j_0/\gamma; & \text{при } \rho = r_1 - r_2; \\ 0; & \text{при } \rho = r_2 - R_0; \end{cases} \quad \left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=l} = 0,$$

где  $j_0$  — плотность тока в токоподводящих шинах;  $\gamma$  — электропроводность валков;  $j_n$  — нормальная к поверхности валков составляющая плотности тока в расплаве.

Выполнив преобразования краевой задачи (1)–(2) в соответствии с методом разделения переменных, получим два независимых уравнения типа модифицированных уравнения Бесселя, а именно:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left( \rho \frac{da_m^{(n)}}{d\rho} \right) - \left( \frac{n^2 \pi^2}{1^2} + \frac{m^2}{\rho^2} \right) a_m^{(n)} = \Phi(\rho); \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left( \rho \frac{db_m^{(n)}}{d\rho} \right) - \left( \frac{n^2 \pi^2}{1^2} + \frac{m^2}{\rho^2} \right) b_m^{(n)} = \Psi(\rho), \quad (4)$$

где  $\Phi(\rho), \Psi(\rho)$  известные функции.

В процессе решения уравнений (3,4) потенциал электрического

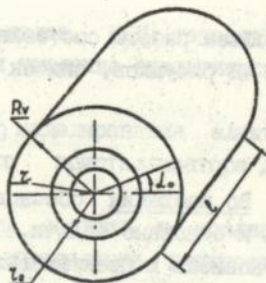


Рис. I

поля представлен в виде суммы рядов Фурье, коэффициентами в которых являются линейные комбинации модифицированных функций Бесселя первого и второго рода  $m$ -го порядка:

$$U = 0.5 a \sum_{n=0}^{\infty} a_0^{(n)} \cos \frac{n\pi z}{l} + a \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} a_m^{(n)} \cos \frac{n\pi z}{l} \cos m\alpha + \sum_{n=0}^{\infty} b_m^{(n)} \cos \frac{n\pi z}{l} \sin m\alpha \right], \quad (5)$$

где  $a = \sqrt{\frac{2}{l}}$ ;

Расчет поля в межвалковом пространстве выполнен в билиндрической системе координат, когда уравнение для электрического потенциала имеет вид

$$\frac{\operatorname{ch}\tau + \cos\sigma}{d} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial \sigma^2} \right) = 0, \quad (6)$$

а граничные условия для области ABCD, показанной на рис.2, запишутся следующим образом:

$$U \Big|_{\tau=\tau_0} = U_0; \quad \frac{\partial U}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\sigma_0} = 0; \quad U \Big|_{\tau=\tau_0} = 0, \quad (7)$$

где  $\tau, \sigma$  - координаты билиндрической системы,  $U_0$  - электрический потенциал на поверхности вала. Плотности тока в валке и расплаве получены по известному соотношению  $j = -\gamma \operatorname{grad} U$ .

Вычисление плотностей тока выполнено с помощью ЭВМ, причем для вычисления суммы рядов Фурье использовано 25 их членов, что соответствует погрешности 0.5%.

Распределение индукции магнитного поля в расплаве определе-

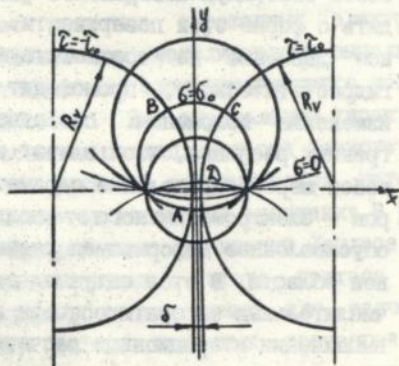


Рис.2.

но путем численного интегрирования по распределенным источникам в соответствии с выражением

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{j \times i_r}{r^2} dV, \quad (8)$$

где  $i_r$  — единичный вектор, направленный от точки интегрирования к точке наблюдения;  $r$  — расстояние между этими точками;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха.

После определения  $B$  в расплаве рассчитана плотность распределения электромагнитных сил  $f$

$$f = j \times B, \quad (9)$$

а затем и давления в расплаве по условиям магнитогадростатики путем численного интегрирования электромагнитных сил

$$P_{ЭМ} = \int_x f_x dx + \int_y f_y dy + \int_z f_z dz + \text{const.} \quad (10)$$

Получены характеристики распределения электромагнитных давлений в жидком металле, которые в интегральном плане отражают распределение  $j$ ,  $B$ , и  $f$ , и представлены на рис.3. Сравнивая положение этих кривых и линии  $mH$ , характеризующей гидростатическое давление, можно судить о возможности компенсации сил тяжести силами электромагнитного происхождения. Точки пересечения этой линии с линиями электромагнитных давлений характеризуют равновесие действующих в металле массовых сил. Совокупность таких точек представляет собой свободную поверхность металла, а их координаты позволяют судить о форме этой поверхности. В тех случаях, когда электромагнитное давление не соответствует гидростатическому, происходит изменение положения свободной границы расплава, что влечет за собой перераспределение параметров электромагнитного поля, обусловленное деформацией расчетной области. В этой ситуации вычислительный алгоритм основан на выполнении итерационных расчетов. Вычисления ведутся до выполнения

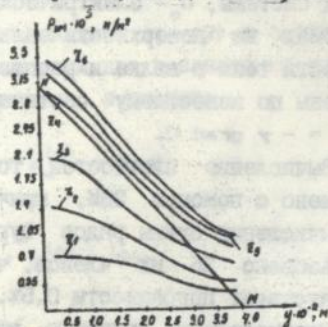


Рис. 3.

УСЛОВИЯ

$$\left| z_i^{n+k} - z_i^n \right| \leq \epsilon, \quad (\text{II})$$

где  $z_i^n$ ,  $z_i^{n+k}$  — координаты свободной поверхности в  $i$ -той точке на  $n$ -ой итерации;  $k=1, 2, \dots$ . Применение изложенной методики позволяет упростить машинную реализацию этапа определения электромагнитных полей, локальных и интегральных силовых электромагнитных характеристик и положение свободных границ в электротехнических устройствах с жидкометаллическим рабочим телом. В этой главе выполнены расчеты параметров электромагнитного поля и определено положение свободных границ при различных уровнях металла в валковом кристаллизаторе.

На рис. 4 показано расчетные положения свободных границ жидкого металла (сплошная линия) и полученные на физической модели (пунктирные линии).

Третья глава посвящена анализу электромагнитных процессов в жидком металле, который испытывает действие скрещенных электрического и магнитного полей. Математическое моделирование выполнено с использованием скалярных потенциалов электромагнитного поля. Расчет выполнен с помощью метода сеток. Для определения характеристик электромагнитного поля обоснован подход, который базируется на использовании методов расчета режимов электрических сетей. Здесь реализован модифицированный метод контурных уравнения. В работе показано, что погрешность аппроксимации уравнений Лапласа и Пуассона для потенциалов при использовании этого подхода не превышает погрешности других методов, используемых для расчета электромагнитных полей, например, метода конечных разностей. В этой главе разработаны алгоритмы расчета трехмерных электромагнит-

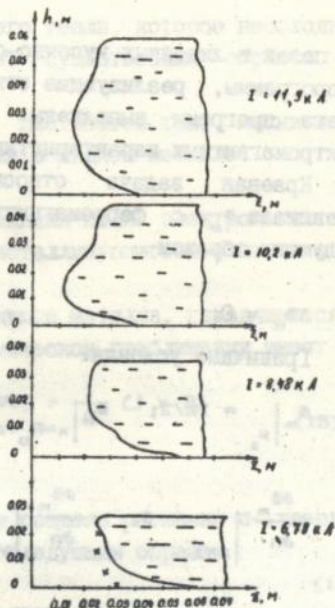


Рис. 4.

ных полей в линейных кусочно-однородных средах. А также разработаны программы, реализующие эти алгоритмы. С помощью созданного пакета программ выполнены многовариантные численные расчеты электромагнитных характеристик в жидком металле.

Краевая задача относительного магнитного скалярного потенциала  $\Phi_m$  с ферромагнитными торцами валков формулируется следующим образом

$$\Delta \Phi_m = 0; \quad (12)$$

Граничные условия:

$$\Phi_m \Big|_{s_1} = Iw/2; \quad \Phi_m \Big|_{x=R_0+\Delta/2} = Iw/4; \quad \frac{\partial \Phi_m}{\partial n} \Big|_{z=0} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Phi_m}{\partial n} \Big|_{z=1} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_m}{\partial n} \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_m}{\partial n} \Big|_{y=R_0+\delta} = 0;$$

где  $Iw$  — намагничивающая сила катушек;  $s_1$  — поверхность валков;  $R_0$  — радиус валков;  $\Delta$  — толщина заготовки;  $\delta$  — расстояние на котором выполнено условие  $\partial \Phi_m / \partial n \cong 0$ .

Расчет электрического поля выполнен аналогично для его потенциала  $U$ , а именно:

$$\Delta U = 0; \quad (14)$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \begin{cases} \pm I/\gamma s, & \text{где } s \text{ — площадь контактов токоподвода и} \\ & \text{токосъема; } I \text{ — подведенный ток; } \gamma \text{ — электро-} \\ & \text{проводность;} \\ 0, & \text{на остальной поверхности расплава.} \end{cases}$$

Результаты решения этих задач позволили определить оптимальные электромагнитные параметры для удержания жидкого металла по торцам валкового кристаллизатора и выбрать необходимые источники питания.

Здесь также рассмотрено термическое действие электрического тока в жидком металле и его влияние на процесс кристаллизации. Численные расчеты подтвердили, что джоулево тепловыделение в

металле составляет не более 5% от всего тепла, которое необходимо отобрать и, следовательно, не влияет существенным образом на процесс кристаллизации.

Приведены результаты расчетов плотностей токов, магнитного поля, электромагнитных сил и давления в жидком металле.

В четвертой главе рассмотрено влияния поля электромагнитных сил на МГД течения в жидкой части кристаллизующегося слитка, отливаемого в валковом кристаллизаторе.

Уравнение Навье-Стокса для жидкого металла, находящегося в электромагнитном поле, в электродинамическом приближении имеет вид:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \operatorname{div}(\nu_T \nabla \mathbf{v}) + \frac{1}{\rho} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \quad (15)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0.$$

Граничные условия на поверхности раздела расплава с твердой коркой и свободной границе запишутся следующим образом

$$\mathbf{v} = 0, \quad (16)$$

где  $\mathbf{v}$  - вектор скорости;  $t$  - время;  $p$  - давление;  $\mathbf{j}$  - вектор плотности тока;  $\mathbf{B}$  - индукция магнитного поля;  $\rho$  - плотность расплавленного металла;  $\nu_T$  - коэффициент турбулентной вязкости.

Решение задачи (15) - (16) выполнено методом установления. Основная идея его заключается в том, что вместо стационарной задачи решается нестационарная задача до того момента, пока результаты ее решения не будут меняться в пределах заданной точности. Система нестационарных уравнений решена методом расщепления. Идея метода, как известно, состоит в сведении многомерного нестационарного уравнения сохранения импульса к цепочке одномерных нестационарных уравнений.

Метод расщепления позволяет использовать как явные, так и неявные схемы. Однако, для задач с учетом вязкости распространены неявные схемы, и, следовательно, они использованы в данной работе.

Повышение быстродействия вычислительной процедуры достигается путем преобразования уравнений (15), в результате этого получено уравнение Пуассона для давления в виде:

$$\Delta P = -\rho \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + 2 \frac{\partial U}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial y} \right] - |j \operatorname{rot} B|. \quad (17)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} z = 0; z = 1; U = v = 0; P = P_0 + P_{3Л} + P_\sigma; \\ y = 0; U = 0,1 \text{ м/с}; U = 0; P = P_0 + P_{3Л} + P_\sigma; \\ y = h; U = v = 0; \frac{\partial P}{\partial n} = \nu_T \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}; \end{aligned} \quad (18)$$

где  $P_0$  - атмосферное давление;  $P_{3Л}$  - электромагнитное давление на поверхности;  $P_\sigma$  - давление поверхностного натяжения.

Решение задачи (17)-(18) выполнено методом последовательной верхней релаксации. Определение давления  $P$  на границе и внутренних узлах выполнено по единообразным формулам, содержащим параметр релаксации  $\omega$ .

Расчет поля скоростей и давлений ведется в два этапа. На первом определяется поле скоростей на предыдущем временном шаге, а затем по вычисленным скоростям - давления в узлах сетки. Системы уравнений для определения поля скоростей методом расщепления имеют вид:

$$\left\{ \begin{aligned} 0.5 \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial y} + 0.5 \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \nu_T \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + 0.5 \frac{1}{\rho} (j \times B)_y \end{aligned} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 0.5 \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial z} + 0.5 \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \nu_T \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + 0.5 \frac{1}{\rho} (j \times B)_z \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} 0.5 \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial y} + 0.5 \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \nu_T \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + 0.5 \frac{1}{\rho} (j \times B)_y \end{aligned} \right. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 0.5 \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial z} + 0.5 \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \nu_T \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + 0.5 \frac{1}{\rho} (j \times B)_z \end{aligned} \right.$$

Приемлемость разработанного алгоритма и достоверность вычислений с помощью численного эксперимента путем дробления шага расчетной сетки. Установление решения стационарной задачи по расчету поля скоростей с точностью  $\epsilon \leq 0,1\%$  происходит за 180 - 200 шагов с

интервалом по времени  $5 \cdot 10^{-4}$  с на основании выполнения условия в виде

$$\max_{i,j} |(U_{i,j}^{n+k} - U_{i,j}^n), (v_{i,j}^{n+k} - v_{i,j}^n)| \leq \epsilon, \quad (21)$$

где  $i, j$  - номера точек.

На рис.5 представлен характер МГД течений в расплаве и эпора скоростей в случае возникновения электромагнитных сил от взаимодействия вертикального электрического тока и горизонтального магнитного поля.

В этой главе рассмотрено также физическое моделирование электромагнитных процессов по торцам ДЭК. С этой целью изготовлены модельный стенд и опытная установка ВК. Достоверность принятых математических моделей и результатов их расчета подтверждается удовлетворительным совпадением с исследованиями на физических моделях.

В приложении приведены документы, подтверждающие практическое использование результатов работы, и расчет ожидаемого экономического эффекта от их внедрения.

#### Основные выводы по работе

1. Выполнен анализ электромагнитных процессов в жидком металле МГД устройств с бидлиндрической симметрией в электродинамическом приближении. С учетом разницы электропроводностей материала валков и расплава моделирование электромагнитных полей в валке и межвалковом пространстве выполнено раздельно. Погрешность такой идеализации не превышает 10%, что удовлетворительно для инженерных вычислений поля электромагнитных сил и джоулевых тепловыделений в кристаллизующихся металлах.

2. Решена линейная краевая задача распределения потенциала электромагнитного поля по торцам ВК. В результате получены аналитические выражения для плотностей тока в жидком металле и

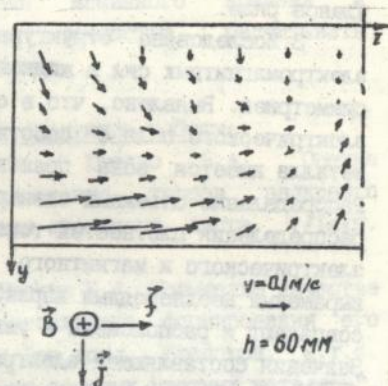


Рис. 5.

теле валька. Решение представлено в виде суммы бесконечного ряда, члены которого являются произведением линейных комбинаций модифицированных функций Бесселя и тригонометрических функций. Для получения точности решения  $\epsilon \leq 0,5\%$  достаточно взять не более 25 членов ряда.

3. Исследована структура электромагнитного поля и поля электромагнитных сил в жидком металле в области с бидицилиндрической симметрией. Выявлено, что в случае взаимодействия горизонтального электрического поля с собственным магнитным в области жидкого металла имеется зона практически однородного магнитного поля. Распределение объемных электромагнитных сил определяется законом распределения плотностей тока. В случае взаимодействия скрещенных электрического и магнитного полей их распределения носят явно выраженный неоднородный характер, причем зоны их высоких значений совпадают и расположены в узкой части межвалькового пространства. Значения составляющей электромагнитных сил  $f_x$  на два порядка ниже остальных. Это обстоятельство позволяет моделировать МГД течения в двухмерной области.

4. Разработана методика расчета электромагнитного поля в жидких электропроводных средах с деформирующейся под действием электромагнитных сил границей. Расчитанные по предложенной методике электромагнитные характеристики и положения свободных границ жидкого металла имеют удовлетворительное совпадение с экспериментальными результатами.

5. Исследованы распределения джоулева тепловыделения в расплаве и выполнены инженерные оценки его влияния на тепловые процессы. Зоны максимальных их значений находятся в узкой части межвалькового пространства. В результате установлено, что джоулева диссипация энергии не превышает 5% теплоты фазового перехода и не может оказать существенного влияния на ход процесса кристаллизации.

6. На основании анализа поля электромагнитных сил и процесса удержания жидкого металла в электромагнитном поле, сопоставления экспериментальных и расчетных данных предложено технические решения установок, реализующих электромагнитное формирование боковых поверхностей непрерывнолитых листовых заготовок с использованием ферромагнитных вставок в конструкцию

валков-кристаллизаторов.

7. На основе предложенной математической модели разработаны численные алгоритмы и пакеты программ для анализа электромагнитных процессов в жидком металле по торцам ДЭК, которые позволяют с приемлемыми затратами машинного времени и удовлетворительной для практики точностью рассчитывать характеристики в реальных МГД устройствах.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Залозный В.И., Колесниченко А.Ф., Ющенко Б.А. Оценка эффективности электромагнитного уплотнения торцов валкового кристаллизатора для непрерывной отливки стального листа. // Техн. электродинамика. - 1988, - №3, с. 15-17.

2. Колесниченко А.Ф., Залозный В.И., Ющенко Б.А. Повышение качества тонкого листа металла путем электромагнитного формирования его торцов в валковом кристаллизаторе // Тез. докл. Всесоюз. н.т.с. "Повышение качества плоского проката из тяжелых цветных металлов", Москва, 1988, с. 16.

3. Залозный В.И., Колесниченко А.Ф., Ющенко Б.А. Электромагнитное формирование торцевых границ металлического листа, отливаемого в валковом кристаллизаторе. // Тез. докл. Всесоюз. н.т.с. "Прогрессивные процессы плавки и разливки цветных металлов и сплавов", Москва, 1989, с. 12.

4. Гориславец Ю.М., Колесниченко А.Ф., Ющенко Б.А., Эркенюв Н.Х., Волченко С.А., Залозный В.И. Магнитогидродинамические системы плавки и непрерывной разливки металлов. // Препринт №872, ИЗД АН УССР, Киев, 1990, 18с.

5. Залозный В.И. Моделирование электромагнитных процессов в торцевых зонах валкового кристаллизатора. // Тез. докл. Всесоюз. н.т.с. "Математическое моделирование в энергетике", ч.2, Киев, 1990, с. 128.

6. A.F. Kolesnichenko, B.A. Yushchenko, V.I. Zalozny. Electromagnetic retention of steel melt on the faces of the roll mould. // The Sixth International Iron and Steel Congress. Vol.4, Steelmaking 2, Nagoya, Japan, 1990. p.p.446-453.

7. A.F. Kolesnichenko, N.Kh. Ehrkenov, V.I. Zalozny Numerical simulation of velocity fields in the liquid phase of the metallic

ingot cast in the electromagnetic two-roll mould.//Magneto-hydrodynamics in Process Metallurgy Ed. by J.Szekely, J.W.Evans, K.Blazek, N.El-Kaddan, TMS, 1991, p.197-201.

8.Залозный В.И., Колесниченко А.Ф., Эркенов Н.Х., Ющенко Б.А. Численное моделирование поля скоростей в жидкой фазе металлического слитка, испытывающего действие электромагнитных сил.//Техн. электродинамика. №4, 1992, с.10-17.

9.Бутенко А.Л., Залозный В.И., Сторожук А.И., Ющенко Б.А. Расчет плотностей тока в торцах валкового кристаллизатора. //Преобразование параметров электрической энергии в энергетических и технологических установках. - Сб. научн. тр., Киев, 1991, с.143-144.

10.А.с. № 1692724, МКИ В22Д11/06. Устройство для непрерывного литья металлической листовой заготовки. /Беренов А.Д., Залозный В.И., Колесниченко А.Ф. и др./

11.А.с. № 1692725, МКИ В22Д11/06. Устройство непрерывного литья металлической листовой заготовки. /Беренов А.Д., Залозный В.И., Колесниченко А.Ф. и др./

Вклад автора. В работах [I-4, 6-9] написанных в соавторстве, автору принадлежит идея раздельного моделирования электромагнитных полей в телах с бицилиндрической симметрией, а именно, в межвалковом пространстве и непосредственно в теле вала. Разработка численно-аналитического метода расчета этой системы. Автором также обоснована методика итерационного определения положения свободных границ жидкого металла в условиях изменяющейся расчетной области. Алгоритмы и программы для расчета электромагнитных полей, используя методы расчета режимов электрических цепей в работах [2,3,6], разработаны совместно с Ющенко Б.А. Участие автора в [10,11] определяется согласно справок о творческом участии.

*В.И.М.*

Подписано к печати 16.03.1993г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная Усл.-печ.лист.1,0,Уч.-изд.лист 1,0.  
Тираж 100. Заказ 319. Бесплатно

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

465399

AB 27076

**AB 27.076**