

На правах рукописи



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Смольянов Иван Александрович'.

Смольянов Иван Александрович

**Численное моделирование неустойчивых течений
жидкости под воздействием магнитного поля**

Специальность 05.09.01 —
«Электромеханика и электрические аппараты»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург — 2021

Работа выполнена в Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Сарапулов Сергей Федорович

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,**
доктор физико-математических наук,
профессор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник
Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным
длинным длинным названием,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования с длинным
длинным длинным длинным названием

Защита состоится **DD mmmmmmmm YYYY** г. в XX часов на заседании
диссертационного совета **Д 123.456.78** при **Название учреждения** по адресу:
Адрес.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке **Название библиотеки**.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
учреждения, просьба направлять по адресу: **Адрес**, ученому секретарю
диссертационного совета **Д 123.456.78**.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmm2021** года.
Телефон для справок: **+7 (0000) 00-00-00**.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 123.456.78,
д-р физ.-мат. наук

Фамилия Имя Отчество

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Исследование поведения жидкости в магнитным полем является сложной задачей из-за высокой нелинейности уравнений, описывающих физические законы для этой задачи. Развитие численного моделирования позволяет проводить уникальные эксперименты по исследованию нестабильностей, которые невозможно воспроизвести в физическом эксперименте. Полученные результаты позволяют оценить количественно и качественно воздействия ряда магнитогидродинамических эффектов на поведение потока жидкости. Эти знания дополнят классическую теорию МГД, разработанную с рядом допущений.

Целью данной работы является изучение механизмов возникновения, подавления и протекания турбулентных потоков проводящей немагнитной жидкости под воздействием бегущего магнитного поля в металлургических магнитогидродинамических насосах с учетом специфики их эксплуатации, а также исследование влияния неустойчивых режимов на основные характеристики магнитогидродинамических насосов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать алгоритм расчета связанных задач магнитного, гидродинамического и температурного полей для потоков жидкости в каналах.
2. Провести верификацию данного алгоритма с помощью тестовых задач и экспериментальных данных.
3. Исследовать характер течений проводящей жидкости под воздействием бегущего магнитного поля с помощью идеализированных и упрощенных численных моделей.
4. Оценить влияние неравномерного профиля скоростей на распределение электромагнитных усилий.
5. Исследовать влияние наличия неустойчивых потоков на основные характеристики индукционных насосов.
6. Рассмотреть влияние термогравитационной конвекции на состояние потоков.

Научная новизна:

1. Разработан программный код для реализации алгоритмов по расчету гидродинамических процессов несжимаемой неньютоновской жидкости под воздействием магнитного поля с использованием открытых пакетов OpenFOAM, Elmer и библиотеки связки между ними EOF-library.
2. Также разработан алгоритм расчета потоков проводящей жидкости мультидисциплинарных задач естественной конвекции для сжимаемых и несжимаемых жидкостей под воздействием

- гармонического магнитного поля с возможностью учитывать фазовый переход одно- и двухкомпонентных сплавов.
3. Разработанные программные процедуры по реализации численных расчетов магнитогидродинамических процессов были верифицированы на экспериментальной установке перемешивателя металла с помощью бегущего магнитного поля и численными тестовыми задачами, такими как вариации задачи Гартмана.
 4. Был разработан код-обертка для автоматизации настройки моделей с возможностью проведения параметрических исследований, автоматической обработки результатов, проведения предварительных расчетов для начальных условий и рядом дополнительных опций, позволяющих существенно экономить время настройки модели.
 5. Было выполнено оригинальное исследование возникновение неустойчивых состояний потока жидкости под воздействием бегущего магнитного поля в диапазоне чисел Гартмана от 0 до 8000, Стюарта от 0 до 100, Рейнольдса от 100 до 55 000, магнитного Рейнольдса от очень малых значений до десятков. В данном исследовании сравниваются результаты распределения потока скоростей под идеализированным и неидеализированным магнитными полями. Проведен анализ влияния неустойчивых режимов на расходо-напорную характеристику линейного индукционного насоса.
 6. Проведена оценка влияния потоков естественной конвекции на основные потоки вызванные разницей давлений на входе и выходе и приложенным внешним магнитным полем в безразмерном прямоугольном канале находящемся. Это исследование выполнено для безразмерных чисел Гартмана, Стюарта, гидродинамического и магнитного Рейнольдса.

Практическая значимость Процесс и подходы к расчетам и проектированию МГД-устройств могут быть изменены и доработан на основе полученных в этой работе результатов. Также понимание возникновения, протекания и подавления явления нестабильности возможно и не позволит решить проблему создания прототипов индукционных насосов, работающих выше 8 при расходе жидкости от $3 \text{ m}^3/\text{s}$, но предоставит возможность посмотреть на нее под другим углом и открыть новые подходы к ее решению. Разработанные рекомендации в процессе проекта по настройке моделей задач магнитной гидродинамики позволят снизить требования к вычислительной технике. Проведенный сравнительный анализ влияния краевых эффектов на поведение потока позволяет понять какие особенности необходимо учитывать в математических моделях. Один из ключевых факторов к пониманию снижения эффективности МГД насосов это осознание возникновения

и умение предсказывать неустойчивые состояния гидродинамической системы, которому уделяется большая часть этой работы. Впервые, в работе представлены карты состояний потока жидкости от чисел подобия для двухмерных и трехмерных случаев, доработка и расширение этих карт состояний в будущем позволит значительно облегчить и ускорить процесс проектирования МГД-устройств.

Методология и методы исследования.

Рассматриваемая проблема является мультидисциплинарной задачей и требует совместного анализа магнитного поля, гидродинамики и, в ряде задач, термических явлений. Расчет магнитных полей проводился с помощью метода конечных элементов, реализованного в программе с открытым кодом Elmer и использованием гармонической $A - \varphi$ формулировки. Расчет полей давления и скорости производился с помощью метода конечных объемов, который в большей степени подходит для численного решения уравнений Навье-Стокса, используя специализированную программу с открытой лицензией для гидродинамических расчетов OpenFOAM. Температурные поля и фазовый состояния вещества, связанные с потоками жидкости, рассчитывались в OpenFOAM, а расчеты температурных режимов в магнитной системе (катушки, магнитопровод и т.д.) производились в Elmer. В ходе анализа ряда явлений учитывались особенности влияние гидродиномического процессов на магнитные и наоборот. Для осуществления данной опции был реализован обмен данными с помощью message pass interface технологии, используя библиотеку EOF-library. Программы Elmer и OpenFOAM являются бесплатными продуктами с открытым кодом, но у них отсутствуют графические интерфейсы, а также встроенные инструменты преднастройки и постобработки результатов моделей, поэтому для решения данной проблемы была написана библиотека PyFoamRun для настройки моделей, запуске их на расчет, проведения параметрических исследований, автоматизированного создания сеток модели, обработки результатов и ряда других опций. Верификация разработанного кода была проведена с помощью сравнения подобных моделей, реализованных в программах Comsol Multiphysics на основе метода конечных элементов, и Ansys на основе метода конечных объемов с помощью интерфейса магнитная гидродинамика. Также эти модели были верифицированы на экспериментальной установке МГД-перемешивателя жидкого галлия с бегущим магнитным полем и путем сравнения поля скоростей, измеряемого доплеровским датчиком.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Верифицированные численные модели для расчета связанных задач гидродинамики, магнитного и температурного полей и возможностью учета фазового перехода, разработанные на основе метода конечных элементов и объемов.

2. Алгоритмы для расчета связанных задач в открытых пакетах с возможностью автоматической настройки модели с помощью дополнительного кода-обертки.
3. Полученные закономерности влияния магнитных краевых эффектов на устойчивость потока жидкости и возникающих из-за них гидродинамических явлений.
4. Соотношения, описывающие устойчивость потока жидкости в прямоугольных каналах в зависимости от чисел подобия.
5. Результаты влияния неустойчивых режимов работы магнитогидродинамических насосов на основные их характеристики.
6. Количественная оценка влияния тепловых явлений на поведение потока жидкости в в безразмерной постановки задачи для прямоугольном канале.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. IEEE NW Russian Young Researches in Electrical and Electronics and Electronic Engineering Conference, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 2017, 2018, 2019, 2020.
2. XXII Зимняя школа по механике сплошных сред, ИМСС УРО РАН, г. Пермь, 2021
3. XIX International UIE Congress on Evolution and New Trends in Electrothermal Processes, Пльзень, Чехия, 2021.
4. X International Conference Electromagnetic processing of materials, Рига, Латвия, 2021.
5. Четвертая Российская конференция по магнитной гидродинамике (РИМГД-21), ИМСС УРО РАН, Пермь, 2021.
6. International Symposium on Heating by Electromagnetic Source (HSE-19), Padua, Italy.
7. XXI Международная научная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 2019.
8. Международная конференция «Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий», Екатеринбург, 2017, 2020.
9. Всеросийская конференция «Наука. Технология. Инновации», Новосибирск, 2018.
10. VI Международный симинар «European Seminar on Computing», Пльзень, Чехия, 2018.
11. Международная конференция «Computational Problems of Electrical Engineerin», Чехия, Кутна-Гора, 2017.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 21 печатных изданиях, 21 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 21 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 21 — в тезисах докладов.

Диссертационная работа была выполнена финансовой поддержке РФФИ, проект «Численное исследование влияния нестабильности потоков жидкого металла под воздействием бегущего магнитного поля», номер 20-38-90237.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена теоретическим основам применения электромагнитных явлений, исследования неустойчивых состояний потока в и возможности упрощения процесса исследования с помощью теории подобия.

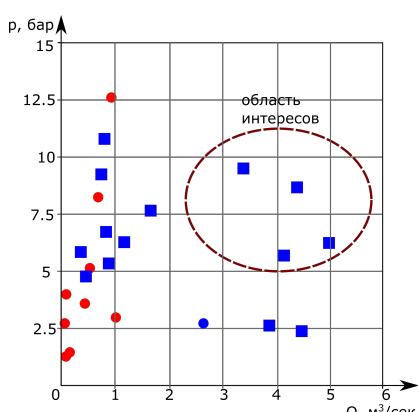


Рис. 1 — Сравнение разработанных конструкций механических (синий цвет) и индукционных насосов (красный цвет).

неустойчивыми, вызывают обратные течения, вихри потока жидкости, пульсации давления с двойной частотой магнитного поля и ряд других эффектов. Условие возникновения неустойчивых потоков можно выразить через производные разности давлений магнитного поля $\Delta \tilde{p}(\tilde{Q}) = \frac{1-\tilde{Q}}{1+Rm^2(1-\tilde{Q})^2}$ и разности гидродинамического $\Delta \tilde{p} = \tilde{Q}^n/N_s$ от расхода жидкости \tilde{Q} , записанные в безразмерном виде

Электромагнитные процессы применяются во множестве промышленных процессов металлургии, ядерной энергетики, термоядерного синтеза и т.д. Одна из основных современных проблем в этих областях — это точность предсказания устойчивости потока жидкости под воздействием магнитного поля. Например, при проектировании индукционных насосов в диапазоне показанном, на Рис. 1, возникают сильные турбулентные течения. Эти течения существенно влияют на показатели установки, снижают срок службы и приводят к аварийным режимам. С точки зрения гидродинамики такие режимы, их называют

$$\frac{\partial(\Delta\tilde{p})}{\partial\tilde{Q}} > \frac{\partial(\Delta\tilde{p})}{\partial\tilde{Q}},$$

где число Стюарда определяется $N = \frac{\sigma B_0^2 U L}{2K_n}$ с помощью характерных значений пространства L_0 , магнитной индукции B_0 , скорости магнитного поля U , σ - электропроводность среды и функция K_n , описывающая изменения давления в зависимости от скорости. После ряда математических преобразований можно записать условие неустойчивости с помощью неравенства, используя магнитное число Рейнольдса R_m (1) и параметры гидродинамической системы, описывающиеся удельным расходом \tilde{Q} и функция поведения потока K_n , где n зависит от поведения потока.

$$R_m > \frac{1}{1 - \tilde{Q}} \sqrt{\frac{n + (1 - n)\tilde{Q}}{(n + 1)\tilde{Q} - n}}. \quad (1)$$

Из выражения $B = B_0/(j + R_m s)$ для бегущего магнитного поля со скольжением s можно заключить, увеличение давления за счет повышения магнитной индукции приведет к неустойчивым режимам потока жидкости. В таких режимах возникают сильные обратные течения, значительные колебания давления и ряд других эффектов опасных для эксплуатации установки и делающих невозможным достигнуть требуемого диапазона характеристики изображенных на Рис. 1.

В этой части работы обсуждаются механизмы появления неустойчивости потоков, и что турбулентные течения описываются критическими значениями параметров, а их изменением во времени и пространстве, что делает возможным прийти к одному и тому же режиму работы различными способами, обойдя зоны в которых возникают турбулентные течения. Эти исследования требуют многоокритериального анализа, который можно существенно упростить, используя π -теорему и теорию подобия. В этой работе исследования в большинстве случаев рассматриваются в безразмерном виде, с использованием числа подобия Рейнольдса $Re = U_0 L_0 / \nu$, Гартмана $Ha = B_0 L_0 \sqrt{\sigma/\rho\nu}$, Стюарта и магнитного Рейнольдса, а также их вариации для ряда задач и типа магнитного поля.

Вторая глава посвящена разработке процедуры решения уравнения момента (2) и закона сохранения массы $\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$ несжимаемых жидкостей совместно с электромагнитными усилиями \mathbf{F} .

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{U} - (\nu + \nu_t) \Delta \mathbf{U} = -\nabla \frac{p}{\rho} + \frac{\mathbf{F}}{\rho}, \quad (2)$$

В уравнении (2) переменные обозначаются следующими символами \mathbf{U} скорость, ν – кинематическая вязкость, ν_t – турбулентная кинематическая вязкость, ρ – плотность и p – давление. Для задач массо- и теплопереноса

рассматриваемых данной работе уравнения момента (2) и сохранения массы записываются для модели сжимаемой жидкости, а также добавляются уравнение энергии для расчета тепловых процессов и условия агрегатного состояния фракции. Эти все уравнения разрешаются в программе с открытой лицензией OpenFOAM. Электромагнитные усилия в 2 вычисляются с помощью метода конечных элементов в программе Elmer. Во всех задачах магнитное поле представляется в гамоническом виде и описывается $A - \varphi$ формулой в комплексном виде с помощью векторного \underline{A} и скалярного φ магнитного потенциала, как

$$\Delta \underline{A} - j\omega\mu\sigma\underline{A} - \mu\sigma\nabla\varphi + \mu\sigma(\mathbf{U} \times \nabla \times \underline{A}) = -\mu\mathbf{J}, \quad (3)$$

где μ - абсолютная магнитная проницаемость среды, σ – электропроводность, ω – угловая частота.

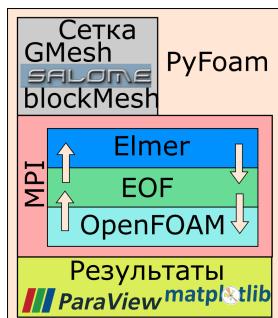


Рис. 2 – Структурная схема взаимодействия программ для расчета задач.

Исследование механизмов возникновения неустойчивых режимов потока жидкости требует большого количества перебора параметров и изменение настроек модели. Также работа с программами с открытой лицензией требует большого количества рутинных манипуляций с текстовыми файлами для настройки модели. С целью экономии времени для настройки модели, осуществления параметрических исследований и сокращения рутинных операций была написана библиотека PyRunOF на языке Python и доступная в открытом доступе на репозитории GitHub¹. Основные ее возможности –

это создавать расчетную область и дискретизировать ее с помощью пакетов Salome, Gmesh или встроенной утилиты blockMesh в OpenFOAM; задавать начальные и граничные условия, переносить их из результатов других моделей; определять параметры исследования, запускать на расчет мультифизические модели с помощью библиотеку EOF-library, а также производить обработку результатов в программе ParaView или python библиотеке matplotlib. Блок–схема алгоритма работы этой библиотеки указана на Рис. 2.

Верификация рассматриваемых в работе моделей и алгоритмов решений уравнений магнитной гидродинамики была проведена с помощью сравнения с результатами полученными аналитическим способом и встроенной процедурой решения «mhdFoam» в программе OpenFOAM

¹<https://github.com/TreeDa93/PyRunOF>

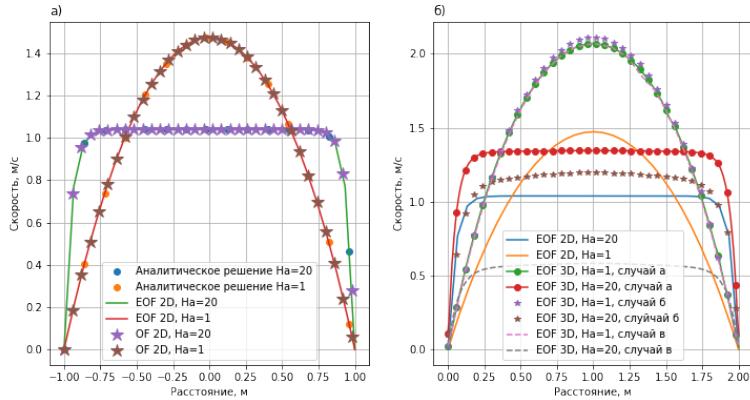


Рис. 3 — Сравнение распределения скорости между стенками перпендикулярными магнитному полю а) сравнение разных подходов к решению двухмерной постановки задачи при числах Гартмана 1 и 20; б) результаты полученные с помощью решателя EOF для двухмерной и трехмерной постановки задачи при числах Гартмана 1 и 20.

для вариации задачи Гартамана в двухмерной постановке Рис. 3, а. Важность учета всех размерностей пространства и корректного выбора граничных условий в моделях показана с помощью сравнения распределения скорости двухмерных и трехмерных моделей для случаев (см. Рис. 3), б: (а) – все стенки изолированные; (б) – стенки, перпендикулярные направлению магнитного поля, обладают бесконечной проводимостью, а стенки, параллельные магнитному полю, изолированы; (в) – все стенки обладают бесконечной проводимостью. Производительность рассматриваемого кода сравнена с расчетами полученными в программах полученными в коммерческих пакетах Comsol и ANSYS (Таблицу 1). Помимо оценки производительности был проведен анализ точности получаемых результатов с помощью сравнения с результатами из коммерческих программ для тестовых задач и данных из эксперимента для трехфазного перемешивателя, в котором скорость измеряется доплеровским датчиком.

Третья глава посвящена исследованию влияния магнитных эффектов на поведения потока в различных режимах работы в прямоугольном канале 100мм x 100мм x 500 мм (см. Рис. 4). Размер канала выбран для удобства расчета безразмерных чисел, а результаты могут быть масштабированы с высокой точностью на другие размеры каналов. На расстоянии 100 мм от каждой стенки действует магнитное поле перпендикулярное направлению движения жидкости.

Таблица 1 — Сравнение времени расчета задачи потока проводящей жидкости в прямоугольном канале под воздействием магнитного поля в различных численных пакетах

Программный пакет	2 ядра	4 ядра	8 ядер	12 ядер
OpenFOAM	250 сек	132 сек	89 сек	93 сек
Библиотека EOF	1992 сек	1080 сек	757 сек	639 сек
Comsol	250 мин	-	48 мин	-
ANSYS	40 мин	-	30 мин	-

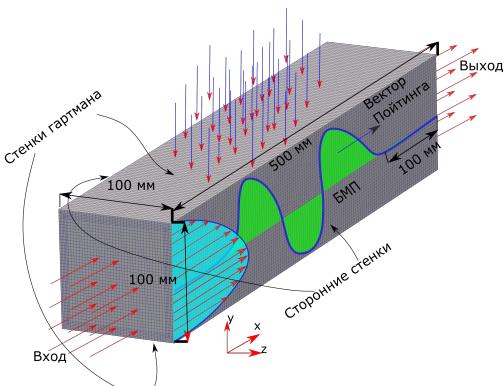


Рис. 4 — Описание модели.

Магнитное поле описывается уравнением $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 e^{j(\omega t - \varphi - \alpha x)}$. Для имитации конечности магнитной системы магнитное поле отсутствует на расстоянии 100 мм от входа и выхода канала. В модели стенки рассматриваются идеально изолированными $\text{grad}\varphi = 0$ для электрического тока и без проскальзывания $\mathbf{U} = 0$ для потока жидкости. На входе канала задается граничное условие

Пуазейлевское распределение скорости из ранее рассчитанной модели без магнитного поля. Начальные значения для остальных переменных заданы из предварительного расчета без магнитного поля. На выходе задается граничное условие нулевого давления. Для сравнения влияния продольного и поперечно краевых эффектов на поведение потока, были разработаны четыре модели:

1. Случай 1 – идеализированное бегущее магнитное поле. Влияние индуцированных токов на изменение общей магнитной индукции не учитывается (эффект входа-выхода в особенности не учитывается). В расчетах участвуют только компоненты плотности токов, создающие тяговые усилия (продольный краевой эффект не учитывается);
2. Случай 2 – Влияние индуцированных токов на изменение общей магнитной индукции учитывается (эффект входа-выхода в особенности учитывается). В расчетах участвуют только компоненты плотности токов, создающие тяговые усилия (продольный краевой эффект не учитывается);

3. Случай 3 – Влияние индуцированных токов на изменение общей магнитной индукции учитывается (эффект входа-выхода в особенности не учитывается). В расчетах участвуют все три компоненты плотности токов, создающие усилия по трем направлениям (продольный краевой эффект учитывается);
4. Случай 4 – неидеализированное бегущее магнитное поле, учитывается поперечный и продольный краевой эффект.

Продольный краевой эффект был исключен из модели искусственным занизением электропроводности в расчетах для получения распределения плотности тока, но с пренебрежимо малыми значениями для влияния на общее магнитное поле. Затем при расчете поля скоростей в уравнении момента (2) член усилий увеличивается в количестве раз на сколько была снижена электропроводность.

На Рис. 5 показаны графики удельной скорости вдоль линий в центре канала между стенками перпендикулярными (Рис. 5, а) и параллельными (Рис. 5, б) магнитным линиям для идеализированного бегущего магнитного поля (случай 1). Результаты показаны для постоянного числа Рейнольдса 54500, числа Гартмана и Стюарда варьируется от 0 до 7377 и от 0 до 100, соответственно. Можно заметить ускорение потока (небольшие пиковые значения скорости) у стенок перпендикулярных магнитному полю (гартмоновские) при малых значениях Стюарда от 0 до 5, в то время как на этих же числах Стюарта у стенок параллельных магнитному полю это ускорение отсутствует. Потоки с противоположной по значению скоростью основному потоку образуются у стенок параллельных магнитному полю, а у гартмоновских стенок значительное ускорение потока при числах Стюарда больше четырех. Обратные потоки существенно снижают эффективное сечение канала, что приводит к повышению гидродинамической нагрузки. Можно отметить, что значения удельной скорости обратных потоков меньше, чем ускорения,

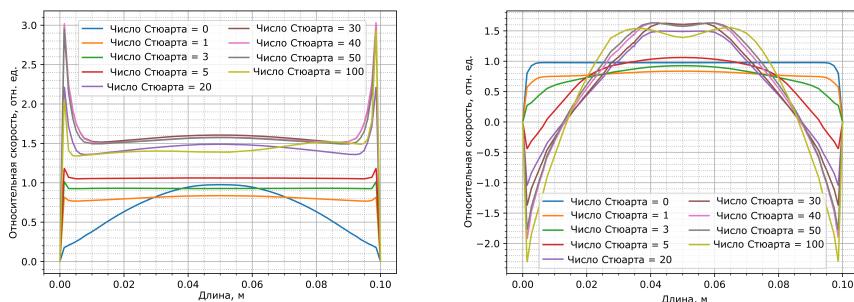


Рис. 5 — Распределение скорости между стенками: а) перпендикулярными магнитному полю и б) параллельными магнитному полю в центре канала.

но дистанция их распространения значительно больше., что приводит к сужению эффективного сечения в плоскости перендикулярной магнитному полю.

Удельная скорость максимальная в случае 3 (рис. 6), когда не учитывается влияние индуцированных токов на магнитное поле и учитывается поперечный краевой эффект во всем исследуемом диапазоне чисел Стюарда. Обратные потоки формируются так же, как и в случаях идеального эксперимента. Можно наблюдать, что величина обратных течений практически не зависит от краевых эффектов, но зависит от значения числа Стюарда. Ускорение потока около гармоновских стенок и скорость ядра потока существенно зависят от воздействий краевых эффектов и от числа Стюарда. Из этого можно сделать вывод, что магнитные эффекты в большей степени воздействуют на профиль скорости возле стенок перендикулярных магнитному полю, а обратные потоки у стенок параллельных магнитному полю образуются как следствие изменения профиля у гармоновских стенок. Также стоит отметить, что результаты в случае 2 (влияние только ундущированных токов) и случай 4 (все эффекты учитываются) не значительно расходятся. Из этого можно сделать вывод, о том что наибольший вклад в формировании профиля скоростей вносит продольный краевой эффект. А если сравнить результаты из случая 3 и случая 1, можно наблюдать, что скорость выше во всем профиле скоростей с наличием поперечного краевого, чем в случае идеального магнитного поля.

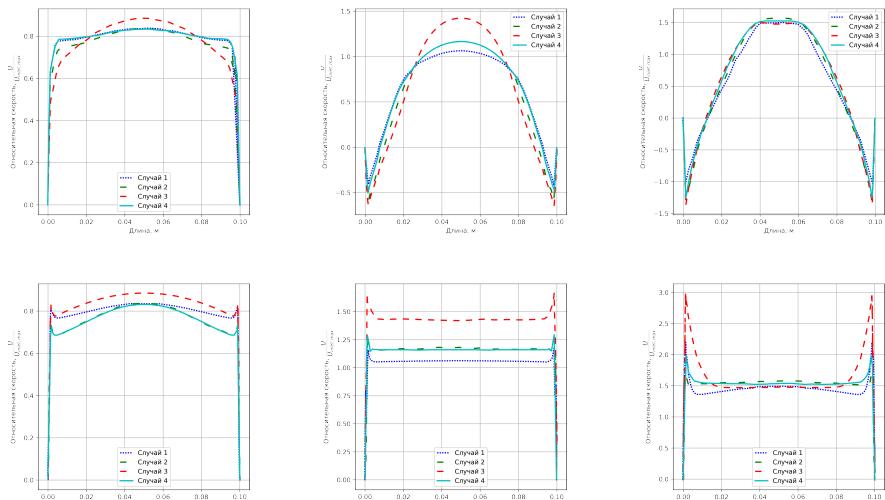


Рис. 6 — Распределение скорости между стенками перендикулярными и параллельными магнитному полю для чисел Стюарта а) 1, б) 5, в) 20

Пиковые значения скорости изменяются линейно от числа Стюарда только в диапазоне его малых значений. При больших числах Стюарда эта зависимость становится не линейной и начинает снижаться при числах стюарда больше 40, а также прослеживается тенденция к установившемуся значению в середине канала. Этот факт демонстрирует, что существует верхний предел числа Стюарда, когда дальнейшее увеличение магнитной индукции нецелесообразно и не влияет на ускорение в большей части поперечного канала.

Значительная разница скорости между пиковыми значениями приводит к увеличению градиента давления между этими точками и как следствие к неустойчивым состояниям и возникновению турбулентностей. Возникающая нестабильность течения имеет свой характер, определяемый временем и пространством. На рис 7 линии тока скорости отмечены значениями кинетической энергии в разные моменты времени и значениями плотности магнитного потока бегущего магнитного поля по длине канала. Вихрь потока возникает в области максимальной кинетической энергии и движется в направлении бегущего магнитного поля с той же скоростью. Таким образом, бегущее магнитное поле приводит в движение результирующий турбулентный поток.

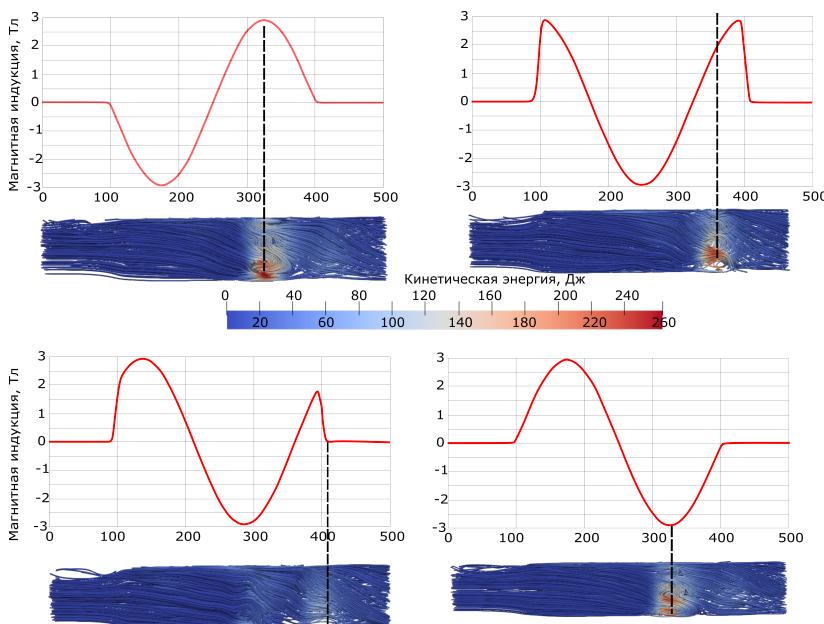


Рис. 7 — Движение вихря потока вслед за бегущим полем.

В случае с идеализированным магнитным полем возникают два двухмерных вихря на входе активной зоны канала у стенок (см. выделено красным цветом на Рис. 8) даже при отсутствии существенного влияния продольного краевого эффекта. Эти два вихря затухают со временем за счет движения по направлению скорости потока. Возникновение и затухание носит периодический характер с половиной периода магнитного поля. Также возникают существенные обратные потоки за счет образования двухмерных вихрей у стенок канала. Количество вихрей изменяется со временем от одного до двух.

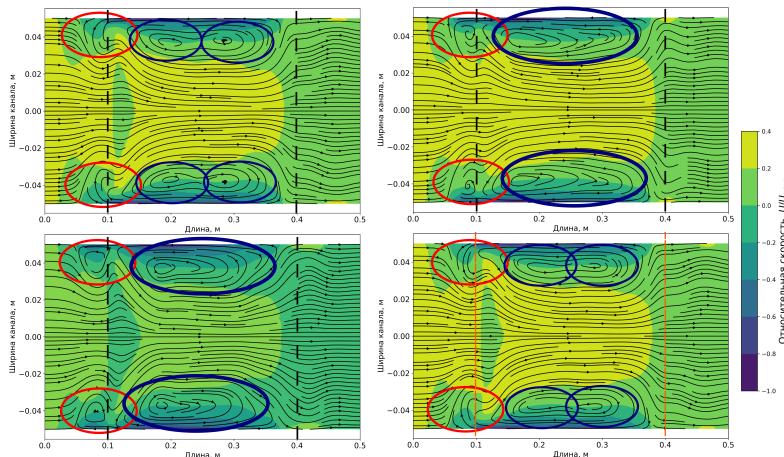


Рис. 8 — Формирование вихрей в идеализированном случае.

На основе полученных результатов влияния магнитных эффектов на потоки жидкости были построены напорно-расходные характеристики насоса для различных чисел подобия (Рис. 9). При увеличении магнитного числа Рейнольдса характеристика становится S-образной так как при малых его значениях стремится к прямой линии. Это утверждение справедливо и в классической теории электромеханики если принять аналогию магнитного числа Рейнольдса с добротностью. Вид гидродинамической внешней нагрузки влияет на магнитные усилия и важно правильно описывать систему при проектировании таких установок. Также для этих характеристик были проанализированы картины поля скоростей на основе которых построена карта состояний потока для разных чисел подобия (см. Рис. 10)

Турбулентные течения характеризуются большой кинетической энергией, которая может разрушать футеровку канала, вызывать сильные механические пульсации металла, мешать протеканию жидкости через

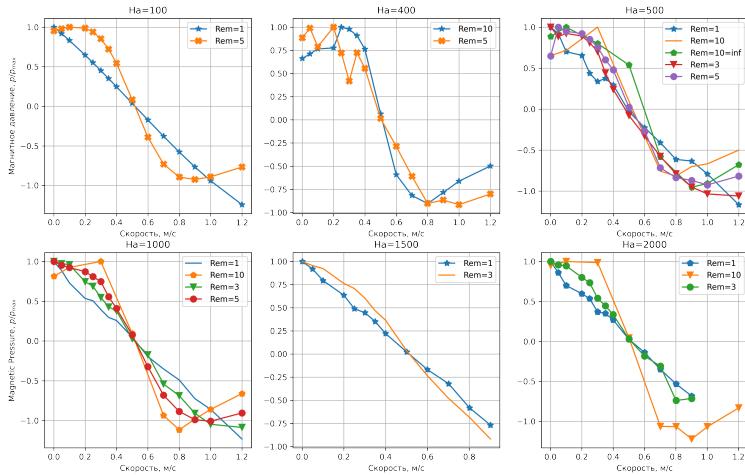


Рис. 9 — Магнитное давление в зависимости от расхода жидкости.

сечение канала и приводить к ряду других нежелательных явлений. Одним из механизмов появления обратных течений является закон сохранения массы $\operatorname{div} \mathbf{U} = 0$, который описывает, что среднее значение через заданное сечение должно быть равно постоянному числу. Следовательно, если локально в сечении происходит увеличении скорости, в другом месте должна быть просадка скорости для сохранения постоянной средней скорости в сечении канала. Эти результаты могут быть использованы в проектировании индукционных насосов при решении проблемы неустойчивости системы и устранения обратных потоков.

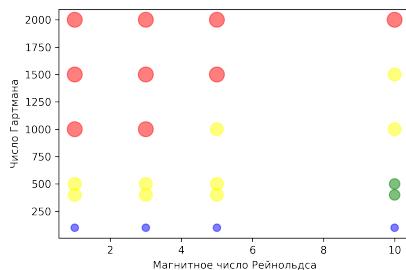


Рис. 10 — Картина возникновения вихрей. Синий цвет – устойчивое ламинарное состояние, зеленый – локальные возмущения, желтый – локальные устойчивые вихри, красный – сильная неустойчивость.

В четвертой главе проведен анализ влияния тепловых процессов на поведение потока жидкости в прямоугольном канале с аспектным соотношением ширины и высоты равным 2. Постановка задачи аналогичная описанной в третьей части этой работы с добавлением граничных условий для температуры. Задается постоянная разность температур между стенками перпендикулярными магнитному полю, а остальные стенки рассматриваются как теплоизолированные. На Рис. 11 показаны распределения скорости вдоль линии в центре канала между стенками перпендикулярными (а) и параллельными (б) магнитному полю для разницы 0, 10 и 30 температур между стенками без воздействия на канал магнитного поля, с воздействием магнитного поля, но без учета тепловыделения и с учетом тепловыделения. Эти результаты рассчитаны для числа Гартмана 100, магнитного Рейнольдса 10, гидродинамического числа Рейнольдса 10000 и числа Стюарта 1. Помимо распределения скорости в работе построены температурные картины. Разница между результатами с учетом источника нагрева и без составляет около 5 %, а для распределения температур не превыше 0.01 %, но даже это не значительное изменение приводит к значительным колебаниям скорости потока жидкости. Большее влияние на распределение температур вносит наличие массо переноса из-за лоренцевских сил. Чем выше разница температур между стенками, тем сильнее влияние джоулева тепла на скорость потока.

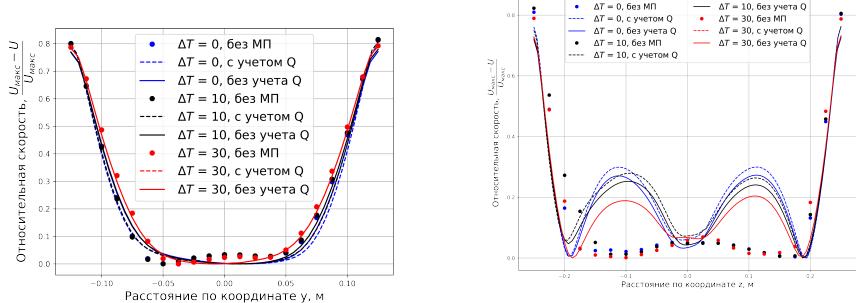


Рис. 11 — Относительная скорость между стенками (а) перпендикулярными и (б) параллельными магнитному полю с различными значениями разницы температур между перпендикулярными стенками

Важность этого исследования объясняется значительными градиентами температуры входной жидкости (в металлургии при разливки магния разница температур достигает 100 °C) низким КПД (менее 20 %) электромагнитных насосов, как следствие высоким тепловыделением. В

последующих работах интерес вызывает подобные исследования для низких чисел магнитного Рейнольдса и высоких значениях Гартмана, также учет числа Прандтля и неравномерности магнитного поля из-за особенностей конструкций катушек.

В пятой главе проведены исследования по чувствительности сетки и модели турбулентности на точность результатов. Даются рекомендации по выбору модели турбулентности для оптимального соотношения между временем расчета и точностью результатов. Также обсуждаются процедуры разделения уравнения момента на уравнения для давления и скорости используя PIMPLE и PISO циклы для их решения. Рассматривается возможность снижения количества уравнений за счет корректной настройки сетки.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе анализа неустойчивых состояний было показано важность учета трехмерных моделей и адекватный выбор моделей турбулентности для расчета потоков жидкости в каналах, находящийся под воздействием магнитного поля.
2. Численные исследования показали, что температурное поле влияет на распределение скорости при определенных значениях числа Прандтля. Краевые эффекты магнитного поля вносят не только отрицательное действие, но в ряде случаев могут улучшить поведение потока.
3. Для выполнения поставленных задач был созданы процедуры решения связанных мультидисциплинарных задач на основе программ с открытым кодом. Для упрощения процедуры расчетов был написан код с опциями автоматической настройки моделей, сетки, обработки результатов и ряда других возможностей.

Публикации автора по теме диссертации

- [1] Ivan Smolyanov, Fedor Sarapulov и Fedor Tarasov. — «Calculation of linear induction motor features by detailed equivalent circuit method taking into account non-linear electromagnetic and thermal properties». — В: *Computers and Mathematics with Applications* 78.9 (2019), с. 3187–3199. — doi: 10.1016/j.camwa.2019.05.015.
- [2] И.А. Смольянов и др. — «Верификация пакетов для расчета течений жидкости в канале при действии внешнего магнитного поля». — В: *Вычислительная механика сплошных сред* 3.1 (2018), с. 322–332.
- [3] I. Smolianov, E. Shmakov и J. Vencels. — «Numerical analysis of liquid flows exposed to travelling magnetic field. 1. idealized numerical

- experiment». — B: *Magnetohydrodynamics* 57.1 (2021), c. 105—119. — DOI: 10.22364/mhd.57.1.9.
- [4] I. Smolianov, E. Shmakov и J. Vencels. — «Numerical analysis of liquid flows exposed to travelling magnetic field. 2. mhd instabilities due to magnetic end effects». — B: *Magnetohydrodynamics* 57.1 (2021), c. 121—132. — DOI: 10.22364/mhd.57.1.10.
- [5] E. Shvydkiy и др. — «Numerical modeling of the travelling magnetic field stirrer for liquid lithium». — B: *Magnetohydrodynamics* 53.4 (2017), c. 707—713. — DOI: 10.22364/mhd.53.4.12.
- [6] F. Sarapulov и др. — «Numerical simulation of double side linear induction pump for liquid magnesium». — B: *Magnetohydrodynamics* 53.4 (2017), c. 603—609. — DOI: 10.22364/mhd.53.4.2.
- [7] K. Bolotin и др. — «Numerical simulation of the electromagnetic stirrer adapted by using magnetodielectric composite». — B: *Magnetohydrodynamics* 53.4 (2017), c. 723—730. — DOI: 10.22364/mhd.53.4.14.
- [8] Ф. Н. Сарапулов и др. — «Математическое моделирование линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения». — В: *Электротехника* 62.4 (2019), с. 58—63. — DOI: 10.17213/0136-3360-2019-1-39-43.
- [9] А. Смольянов И. и Ф. Н. Сарапулов. — «Магнитные детализированные схемы замещения для расчета электромагнитных полей линейного асинхронного двигателя». — В: *Вопросы электротехнологии* 20.3 (2018), с. 46—55.
- [10] Ф. Н. Сарапулов и А. Смольянов И. — «Исследование тягового линейного асинхронного двигателя конвейрного поезда». — В: *Известия высших учебных заведений. Электромеханика* 62.1 (2019), с. 39—43. — DOI: 10.17213/0136-3360-2019-1-39-43.
- [11] F.N. Sarapulov, I.A. Smolyanov и F.E. Tarasov. — «Study of the linear induction motor with bimetallic secondary element». — B: *ACTA TECHNICA CSAV* 63.2 (2018), c. 205—220.
- [12] K. E. Bolotin и др. — «Numerical study of the possibility of using cement inserts in electromagnetic stirring application». — B: *ACTA TECHNICA CSAV* 63.5 (2018), c. 709—720.
- [13] Evgeniy I. Shmakov, Ivan A. Smolyanov и Nikolay V. Tarchutkin. — «Calculation of Magnetic Field of Induction Pump Using Open Source Software». — B: *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EICConRus 2020*. — 2020, — C. 862—866. — ISBN: 9781728157610. — DOI: 10.1109/EICConRus49466.2020.9039053.

- [14] Ivan A. Smolyanov. — «Comparison of Different Approaches to Calculate Magnetic Field of Moving Magnets for Liquid Metal Stirring». — B: *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020*. — 2020, — C. 878—882. — ISBN: 9781728157610. — doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039017.
- [15] N. V. Tarchutkin и I. A. Smolyanov. — «Machine learning application for magnetohydrodynamic pump research». — B: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — T. 950. — 1. — 2020. — doi: 10.1088/1757-899X/950/1/012019.
- [16] Ivan A. Smolyanov и Pavel Karban. — «Optimal design of MHD pump». — B: *12th International Conference ELEKTRO 2018, 2018 ELEKTRO Conference Proceedings*. — 2018, — C. 1—4. — ISBN: 9781538647592. — doi: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398325.
- [17] Ivan A. Smolyanov и др. — «Shape optimization of laboratory induction pump». — B: *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*. — T. 2018-Janua. — 2018, — C. 793—798. — ISBN: 9781538643396. — doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317210.
- [18] «The problem of determining the position of the metal in levitation melting». — B: *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*. — T. 2018-Janua. — 2018, — C. 799—802. — ISBN: 9781538643396. — doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317211.
- [19] Kirill E. Bolotin и др. — «Numerical simulation of electromagnetic processes of the modernized MHD-pump for dispensing molten aluminum from the stationary induction furnace». — B: *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017*. — 2017, — C. 1488—1490. — ISBN: 9781509048656. — doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910855.
- [20] Ivan A. Smolyanov и др. — «Research electromechanical characteristics of magnetohydrodynamic pump». — B: *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017*. — 2017, — C. 1590—1593. — ISBN: 9781509048656. — doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910877.
- [21] E. L. Shvidkiy и др. — «Simulation of continuous casting process with electromagnetic influence to the ingot liquid phase». — B: *Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016*. —

2016, — C. 685—688. — ISBN: 9781509004454. — DOI: 10 . 1109 /
EIConRusNW.2016.7448275.

Смолъянов Иван Александрович

Численное моделирование неустойчивых течений жидкости под воздействием
магнитного поля

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано в печать _____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____