

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 неустойчивых потоков проводящей немагнитной жидкости под воздействием бегущего магнитного поля в металлургических магнитогидродинамических насосах с учетом специфики их эксплуатации, а также исследовать влияние этих нестабильностей 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 ³/₁, 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. Исследование временных зависимостей пульсаций давления, градиента и распределения скорости в канале в зависимости от чисел подобия Ha, N, Rem, Re, используя «идеализированные» и «реальные» математические модели, позволит разрешить вопрос корректности применения различных

допущений и их влияния на нестабильность системы. Эти исследования позволили понять, какие явления (эффекты) и как сильно они влияют на возмущения потоков. Понимание влияния параметров магнитной системы на искажение магнитного поля и возникновения поперечных нестабильностей позволит понять причины снижения эффективностей МГД насосов. 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 гидродинамического 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 канала.

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 Engineering», Чехия, Кутна-Гора, 2017.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 0 печатных изданиях, 0 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

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.

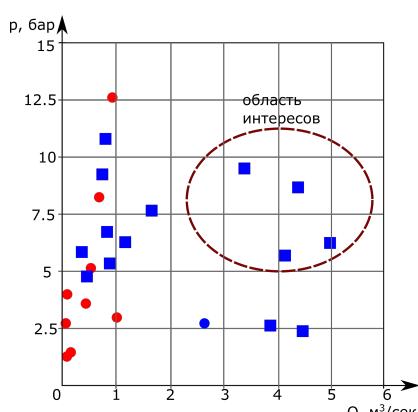


Рис. 1 — Сравнение разработанных конструкций механических (синий цвет) и индукционных насосов (красный цвет).

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.

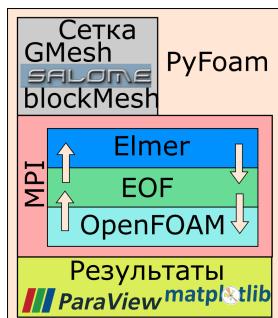


Рис. 2 – Структурная схема взаимодействия программ для расчета задач.

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>

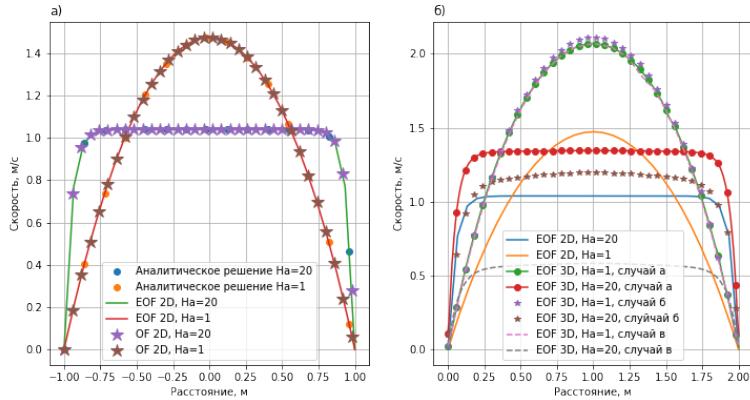


Рис. 3 — Сравнение распределения скорости между стенками перпендикулярными магнитному полю а) сравнение разных подходов к решению двухмерной постановки задачи при числах Гартмана 1 и 20; б) результаты полученные с помощью решателя EOF для двухмерной и трехмерной постановки задачи при числах Гартмана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

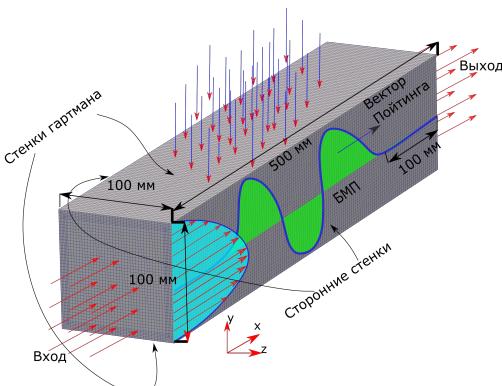


Рис. 4 — Описание модели.

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 $\text{grad}\varphi = 0$, а скорость не проскальзывает $\mathbf{U} = 0$. На входе канала задается граничное условие Пуазейлевское

распределение скорости из ранее рассчитанной модели без магнитного поля. Начальное условие для остальных переменных получено также из предварительного расчета без магнитного поля. На выходе задается граничное условие нулевого давления.

Для оценки влияния магнитного эффекта на поведение потока, были разработаны четыре модели в которых искусственным образом исключались те или иные магнитные эффекты. Продольный краевой эффект (входа-выхода) был исключен из модели искусственным занижением электропроводности в расчетах для получения распределения плотности тока, но с пренебрежимо малыми значениями для того чтобы они вызывали влияние на общее поле. Затем при расчете поля скоростей член усилий делятся на понижающий коэффициент. Влияние поперечного краевого эффекта изменялось за счет умножение, компонент плотности, которые не создают тяговые усилия, на нулевые значения. Для этого были разработаны модели, в которых рассматривались следующие случаи:

1. Случай 1 – идеализированное бегущее магнитное поле, влияние индуцированных токов не учитывается (эффект входа-выхода), действует только тяговая компонента усилий;

2. Случай 2 – влияние индуцированных токов учитывается и действует только тяговая компонента усилий;
3. Случай 3 – влияние индуцированных токов не учитывается и действуют все три компоненты электромагнитных усилий;
4. Случай 4 – не идеализированное бегущее магнитное поле, влияние индуцированных токов учитывается, действуют все три компоненты усилий.

На Рис. 5 показаны графики удельной скорости вдоль линий в центре канала между стенками перпендикулярные (Рис. 5, а) и параллельные (Рис. 5, б) магнитным линиям для случая 1. Модель рассчитывалась для постоянного числа Рейнольдса 54500 и варьируется число Гартмана от 0 до 7377 и Стюарда от 0 до 10. Обратные потоки существенно снижают эффективное сечение канала, что приводит к повышению гидродинамической нагрузки. Можно заметить ускорение потока (небольшие пиковые значения скорости) у гармоновских стенок при малых значениях Стюарда от 0 до 5, в то время как на этих же числах Стюарта между другими стенками это ускорение отсутствует. При числах Стюарта больше значения 4 образуются обратные потоки у стенок параллельных магнитному нулю, а у гармоновских стенок ускорение. Можно отметить, что значения удельной скорости обратных потоков меньше, чем ускорения, но дистанция их распространения значительно больше. Пиковые значения увеличиваются при увеличении числа Стюарда. Одним из механизмов появления обратных течений является закон сохранения массы, что в среднем через сечение должно пройти одинаковое количество объема жидкости. Значительная разница скорости между пиковыми значениями приводит к увеличению градиента давления между этими точками и как следствие к неустойчивым состояниям и возникновению турбулентностей. Тurbulentные течения характеризуются большой кинетической энергией, которая может разрушать футеровку канала, вызывать сильные механические воздействия и мешать протеканию жидкости через сечение канала.

Распределение поля скорости имеет максимальные значения в случае 3 (рис. 6), когда учитываются все составляющие плотности тока и не учитываются эффекты индукции. Это можно объяснить величиной и распределением сил в жидкости, поскольку индуцированные токи не компенсируют электромагнитное поле источника. Следует подчеркнуть, что во всех случаях наблюдается нелинейная зависимость пикового значения от числа Стюарта, а также тенденция к установившемуся значению в середине канала, как в идеальном эксперименте (случай 1 и Рис. 5). Этот факт демонстрирует, что существует верхний предел числа Стюарта, когда дальнейшее увеличение напряженности электромагнитного поля нецелесообразно и не влияет на ускорение в большей части поперечного канала. Профили скорости боковой стенки в

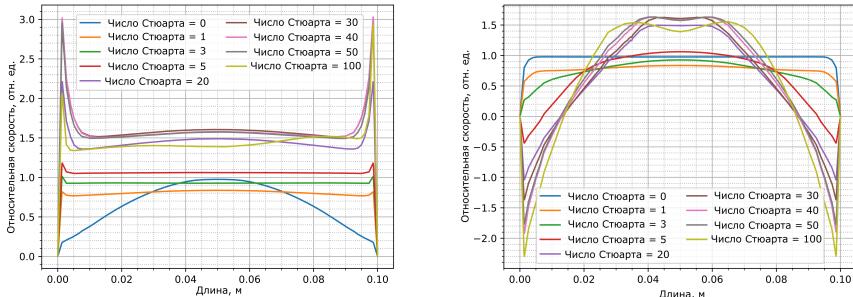


Рис. 5 — Распределение скорости между стенками: а) перпендикулярные магнитному полю и б) параллельные магнитному полю в центре канала.

разных случаях демонстрируют схожие характерные значения скорости, в отличие от профилей скорости у стенки Гартмана на рис. 6. Обратные потоки формируются так же, как и в случаях идеального эксперимента. Этот факт является нежелательным вторичным эффектом, поскольку обратные потоки уменьшают полезное поперечное сечение канала и влияют на перекачивание металла, но различные случаи электромагнитного воздействия не влияют на величину как в идеальном эксперименте. Этот факт показывает, что существует верхний предел числа Стюарта, когда дальнейшее увеличение напряженности электромагнитного поля нецелесообразно и не влияет на ускорение в большей части поперечного сечения канала. Следовательно, ускорение потока жидкости вызывается только бегущим магнитным полем. Эффекты индукции либо ослабляют, либо усиливают его.

Описанные выше явления связаны с нестабильностью потока и повышенным гидродинамическим сопротивлением, что приводит к увеличению турбулентной кинетической энергии и появлению вихрей. Хотя скорость поддерживалась постоянной на входной поверхности, сила инерции потока увеличивалась из-за сил в центре канала. Это показывает невозможность бесконечного увеличения электромагнитной силы без учета гидродинамических явлений, возникающих в таких системах, как это было показано во многих предыдущих исследованиях, посвященных электродинамическим подходам.

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

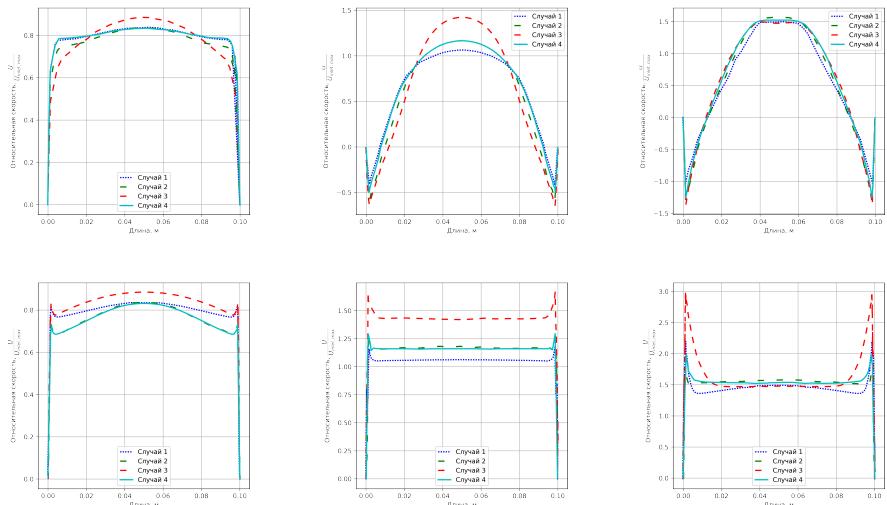


Рис. 6 — Распределение скорости между стенками перпендикулярными и параллельными магнитному полю для чисел Стюарта а) 1, б) 5, в) 20

поля с той же скоростью. Таким образом, бегущее магнитное поле приводит в движение результирующий турбулентный поток.

В случаи 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.

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)

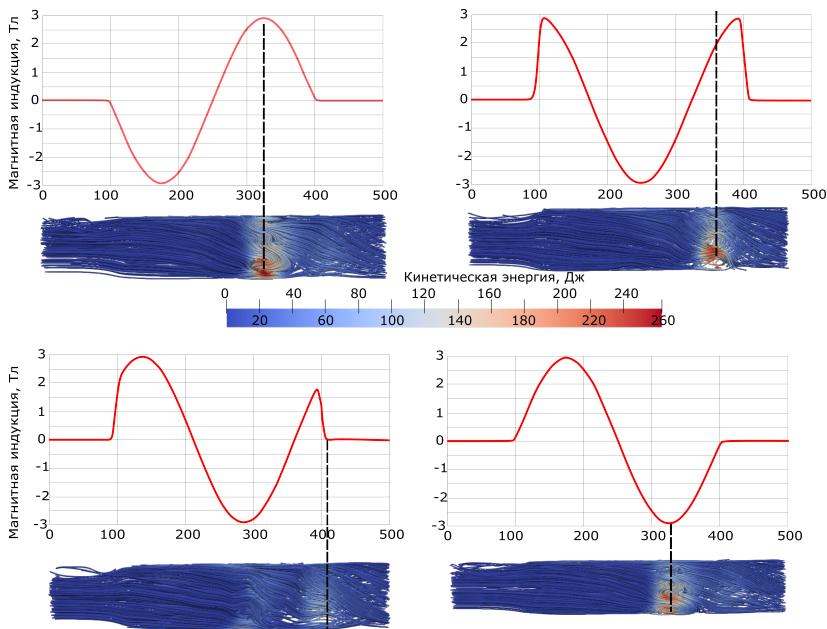


Рис. 7 — Движение вихря потока вслед за бегущим полем.

В четвертой главе проведен анализ влияния тепловых процессов на поведение потока жидкости в прямоугольном канале. Хорошо известный факт, что коэффициент полезного действия в электромагнитных насосах не высокий, поэтому большая часть энергии преобразуется в тепловую. В данной работе анализируется влияние тепловых явлений на поведение потока. На Рис. 11 показаны распределения скорости в зависимости от разницы температур между стенками, к которым приложено магнитное поле. Также на этих графиках анализируется влияние Джоулевого нагрева с помощью сравнения распределения скорости. Показано, что Джоулем нагрев значительно воздействует на профиль скорости, чем на распределение температур. 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. Чем выше разница температур между стенками, тем сильнее влияние джоулевова тепла на скорость потока.

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 обсуждается процедуры разделения уравнения момента на уравнения для давления и скорости

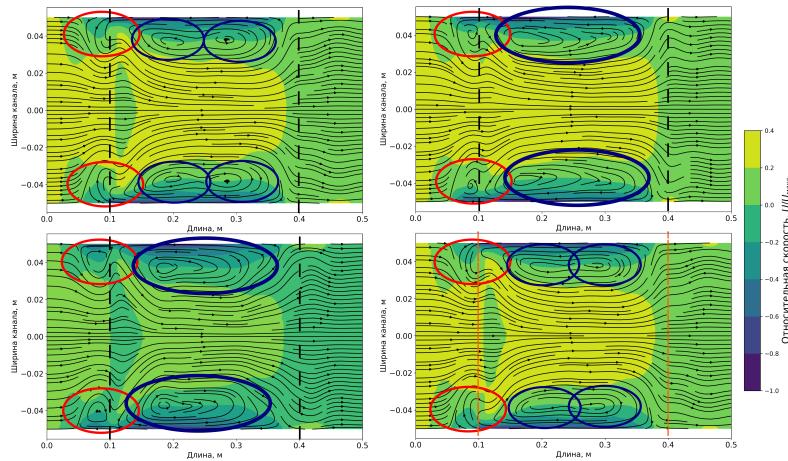


Рис. 8 — Формирование вихрей в идеализированном случае.

используя PIMPLE и PISO циклы для их решения. Рассматривается возможность снижения количества уравнений за счет корректной настройки сетки.

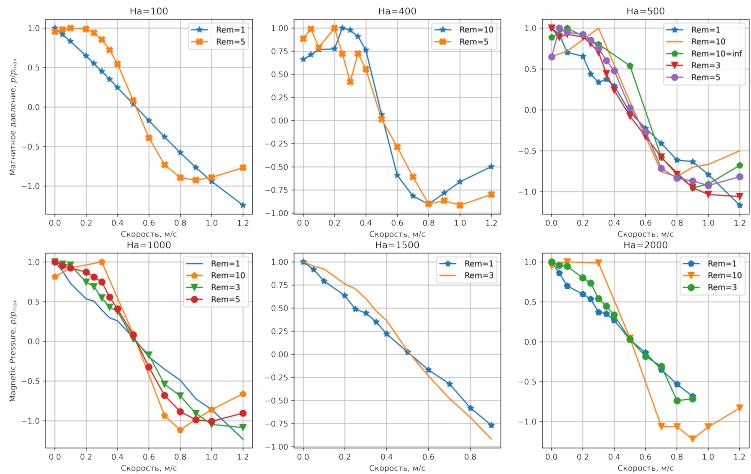


Рис. 9 — Магнитное давление в зависимости от расхода жидкости.

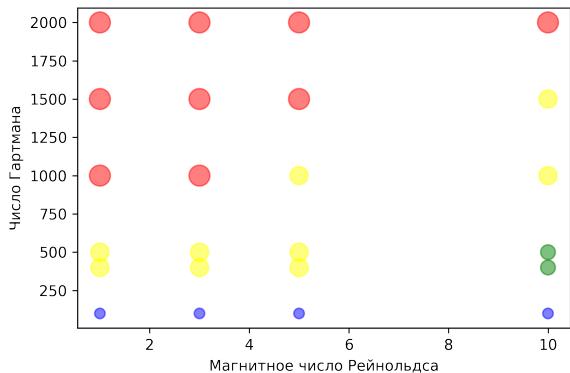


Рис. 10 — Картина возникновения вихрей. Синий цвет – устойчивое ламинарное состояние, зеленый – локальные возмущения, желтый – локальные устойчивые вихри, красный – сильная неустойчивость.

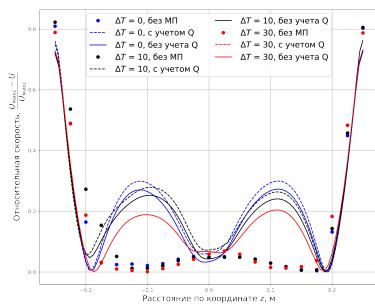
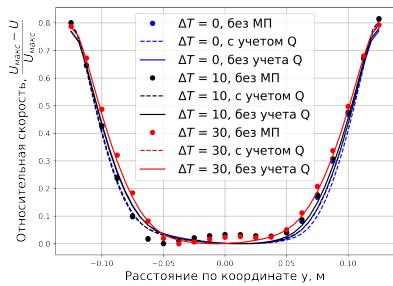


Рис. 11 — Относительная скорость между стенками (а) перпендикулярными и (б) параллельными магнитному полю с различными значениями разницы температур между перпендикулярными стенками

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 возможностей.

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 _____