

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 под 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 изучить механизмы 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 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 не ньютоновской жидкости под воздействием магнитного поля с использованием открытых пакетов OpenFOAM, Elmer и библиотеку связку 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 результатов в этой работе. Также понимание возникновения, протекания и подавления явления нестабильности возможно и не позволит решить проблему создания прототипов индукционных насосов, работающих выше 8 бар при расходе жидкости от  $3 \text{ } \text{м}^3/\text{с}$ , 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 в зависимости от чисел подобия для двухмерных и трехмерных случаев, при доработки и расширении 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, реализованный в программе с открытым кодом Elmer, используя гармоническую  $\langle A - \varphi \rangle$  формулировку. Расчет полей давления и скорости производился с помощью метода конечных объемов, который в большей степени подходит для численного расчета 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 температурные режимы в магнитной системе (катушки, магнитопровод и т.д.) производились в Elmer. В ходе анализа ряда явлений учитывались особенности гидродинамической задачи на магнитные процессы и влияние магнитного поля на потоки жидкости. 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 галия с бегущим магнитным полем, с помощью 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 дополнительной
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 его характеристики.
6. Количественная оценка влияния тепловых явлений на поведение потока жидкости в безразмерном прямоугольном канале.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

1. IEEE NW Russian Young Researchers 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 15 печатных изданиях, 0 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 15 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 15 — 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. В последующих главах сначала описывается общий принцип, позволяющий ..., а потом идёт апробация на частных примерах: ... и .... [here](#)

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

Электромагнитные процессы применяются во множестве промышленных процессах 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 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

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

где число Стоарда 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  $U$ ,  $\sigma$  - электропроводность среды и функция  $K_n$ , описывающая изменения давления в зависимости от скорости. После ряда математических преобразований можно записать значение магнитного числа Рейнольдса при котором возникает неустойчивость потока в зависимости от числа  $n$ , описывающее поведение потока в функции  $K_n$ ,

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

Из этих выражений можно сделать заключение, что увеличение магнитной индукции  $B = B_0/(j + R_m s)$  приведет к появлению неустойчивых потоков, где  $s$  скольжение магнитного поля. Следовательно, если варьировать давление с помощью магнитной индукции то это приведет к турбулентности и невозможности достигнуть требуемого диапазона характеристики на Рис. 1.

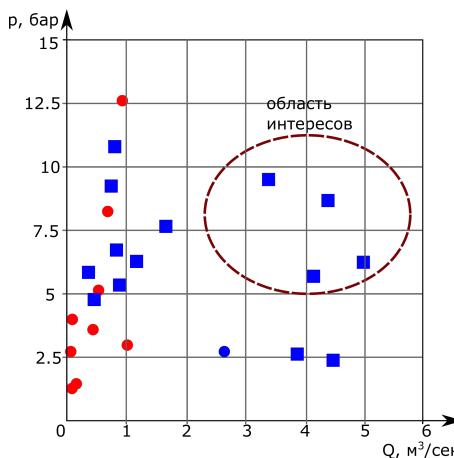


Рис. 1 — Сравнение разработанных конструкций механических (синий цвет) и индукционных насосов (красный цвет).

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 многокритериального анализа, который можно существенно упростить, используя  $\pi$ -теорему и теорию подобия. В этой работе исследования в большинстве случаев рассматриваются в безразмерном виде, используя 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 (1) и закона сохранения массы  $\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$  несжимаемых жидкостей совместно с электромагнитными усилиями  $\mathbf{F}$ .

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{U} - (\nu + \nu_t) \Delta \mathbf{U} = -\nabla \frac{p}{\rho} + \frac{\mathbf{F}}{\rho}, \quad (1)$$

В уравнении (1)  $\mathbf{U}$  скорость,  $\nu$  - кинематическая вязкость,  $\nu_t$  – турбулентная кинематическая вязкость,  $\rho$  – плотность и  $p$  – давление. Для задач рассматриваемых в пятой части уравнения момента и сохранения массы записываются для сжимаемой жидкости, а также добавляются уравнения энергии для расчета тепловых процессов и агрегатного состояния вещества. Эти уравнения разрешаются в программе с открытой лицензией OpenFOAM. Электромагнитные усилия вычисляются с помощью метода конечных элементов в программе Elmer. Уравнение описывающее магнитное поле записывается в гармоническом виде (2):

$$\Delta \underline{\mathbf{A}} - j\omega \mu \sigma \underline{\mathbf{A}} - \mu \sigma \nabla \varphi + \mu \sigma (\mathbf{U} \times \nabla \times \underline{\mathbf{A}}) = -\mu \underline{\mathbf{J}}, \quad (2)$$

Для параметрических исследований, автоматической настройки моделей, создания стеки и расчетной области, а также обработки результатов была написана библиотека PyRunOF на языке Python и доступная в открытом доступе на репозитории GitHub<sup>1</sup>. Эта библиотеку позволяет автоматически создавать расчетную область с помощью пакетов GMesh, Salome и blockMesh для конкретных задач, задавать начальные и граничные условия, переносить их из других моделей, определять параметры исследования, запускать на расчет мультифизические модели с помощью библиотеку EOF-library, а также производить обработку результатов. Блок схема алгоритма указана на Рис. 2

Разработанная процедура решения уравнения и предлагаемые модели были верифицированы с помощью Аналитического решения, полученного для вариации задачи Гартамана в двухмерной постановке и встроенным решателем «mhdFoam» в программе OpenFOAM. Также были проведены сравнения распределения скорости двухмерных и трехмерных моделей с различными граничными условиями с целью показать важность учитывать полную размерность модели и правильность выбора ГУ. Эти результаты показаны на Рис. 3, где случаи: (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. В этой части работы также производится сравнение результатов с

---

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

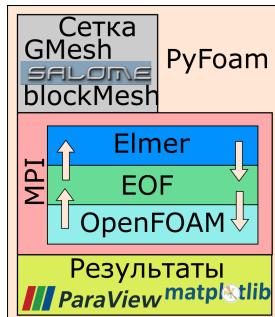


Рис. 2 — Структурная схема взаимодействия программ для расчета задач.

представленными процедурами решения с результатами полученными в коммерческих пакетах Comsol и ANSYS для вариации задачи Гартмана в прямоугольном канале см. Таблицу 1. Также приводится верификация модели

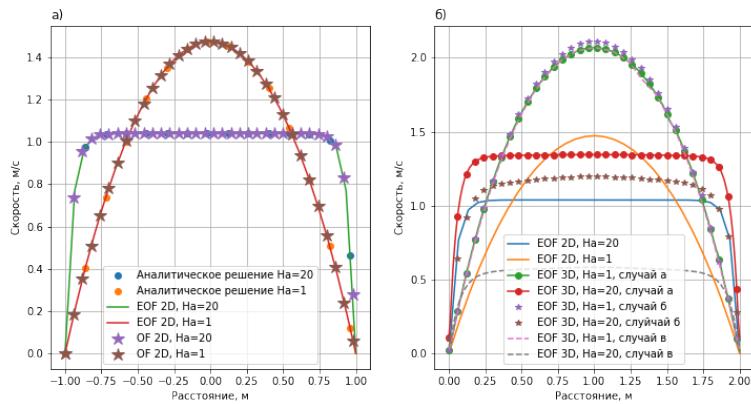


Рис. 3 — Сравнение распределения скорости между стенками перпендикулярными магнитному полю а) сравнение разных подходов к решению двухмерной постановки задачи при числах Гартмана 1 и 20; б) результаты полученные с помощью решателя EOF для двухмерной и трехмерной постановки задачи при числах Гартмана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

**Третья глава** посвящена исследованию влияния магнитных эффектов на поведения потока в различных режимах работы. Для этого были разработаны модели, в которых рассматривались следующие случаи:

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 мни	-	48 мин	-
ANSYS	40 мин	-	30 мин	-

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.

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 создать усилия. При расчете усилий плотности тока умножаются на понижающий коэффициент. Влияние поперечного краевого эффекта изменялось за счет умножение, компонент плотности, которые не создают тяговые усилия, на нулевые значения. Исследуемая область представляет собой прямоугольный канал 100мм x 100мм x 500 мм с Пузейлевским распределением скорости в начальный момент времени (Рис. 4). Начальные условия для задачи скорости получены из предварительного расчета этого канала без магнитного поля. На расстоянии 100 мм от каждой стенки действует магнитное поле перпендикулярное направлению движения потока жидкости. Магнитное поле описывается уравнением  $\underline{B} = \underline{B}e^{j(\omega - \varphi - \alpha x)}$ .

В этой части работы рассматривается поток жидкости для постоянного числа Рейнольдса 54500 и варьируется число Гартмана от 0 до 7377 и Стюарда от 0 до 100. На Рис. 5 представлены зависимости относительная скорость, как скорость, деленная на максимум скорости на входе. В этом эксперименте наблюдалось сглаживание профиля относительной скорости по всей длине линии. Наблюдается незначительное ускорение потока в слое Гартмана (небольшие пики на профиле скорости) при малых значениях числа Стюарта от 0 до 5. Пиковые значения увеличиваются при увеличении числа Стюарта. Следует отметить, что линейное увеличение силы Лоренца при сохранении

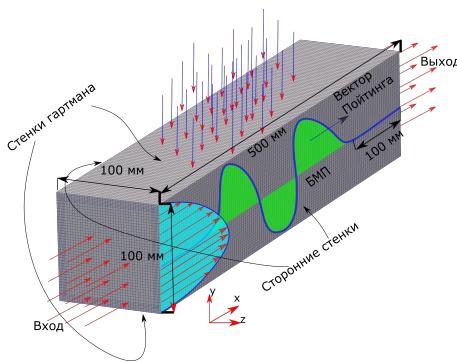


Рис. 4 — Описание модели.

постоянной силы инерции приводит к нелинейной зависимости между скоростью потока и числом Стюарда. Линейное поведение пиковых значений наблюдалось только для небольшого числа Стюарта. Кроме того, существует критическое значение числа Стюарта, когда пиковые значения уменьшаются. Важно отметить, что эти пики отсутствуют в классических задачах Гартмана с пульсирующим магнитным полем. Профиль относительной скорости показан на рис. 5 вдоль линии между боковыми стенками в центре канала. Этот профиль демонстрирует замедление потока, когда пики скорости движутся в направлении, противоположном общему потоку, когда число Стюарта больше 3–4. Предполагается, что эти потоки вызваны градиентом давления из-за пики в области слоев Гартмана, как показано на рис. 5. Кроме того, член силы Лоренца  $(\mathbf{U} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$  влияет на ускорение потока в пристенной области. Этот член намного больше в слоях Гартмана, чем в боковых слоях, поскольку магнитное поле ориентировано перпендикулярно стенке Гартмана. Кроме того, величина и направление силы Лоренца, вызванной бегущим магнитным полем, зависят от отношения скорости магнитного поля к проводящей среде. Обратное замедление потока жидкости в боковых слоях вызвано не вторичными эффектами магнитного поля, а большим гидродинамическим градиентом. Этот градиент формируется гидродинамическими эффектами, такими как ускорение потока в слое Гартмана. Отметим, что влияние продольного торцевого эффекта в центре канала минимально.

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

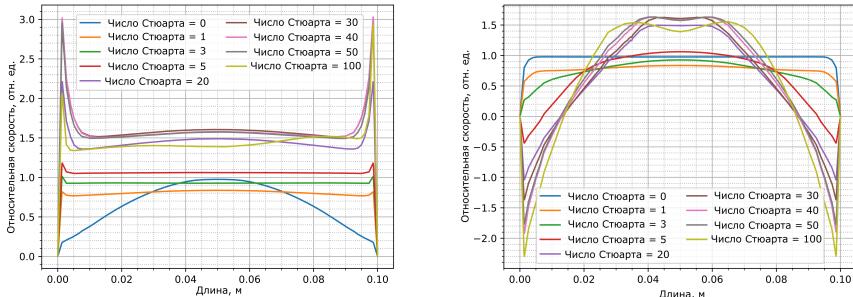


Рис. 5 — Распределение скорости между стенками: а) перпендикулярные магнитному полю и б) параллельные магнитному полю в центре канала.

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 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

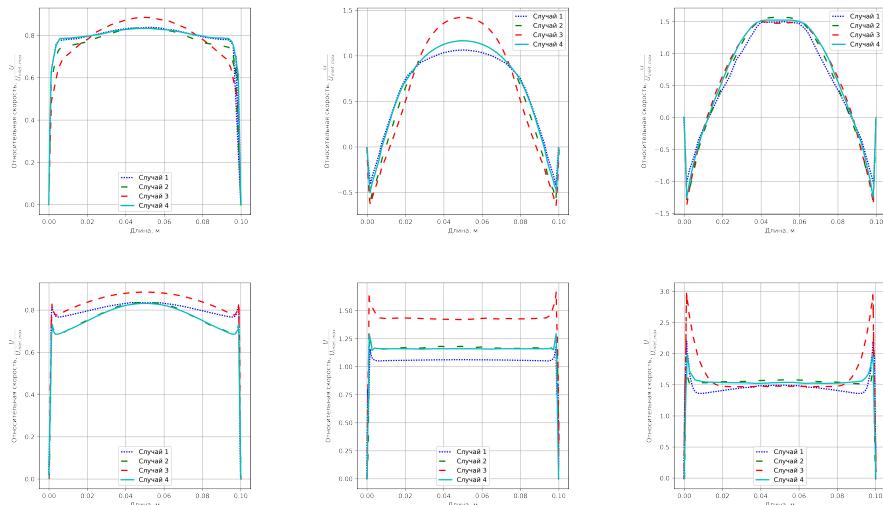


Рис. 6 — Распределение скорости между стенками перпендикулярными и параллельными магнитному полю для чисел Стюарта а) 1, б) 5, в) 20

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.

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. 10). 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.

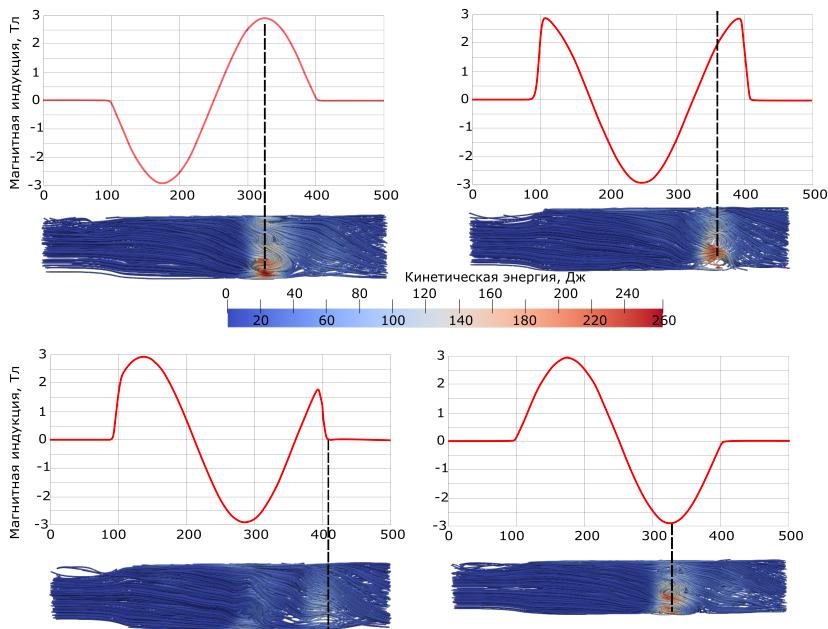


Рис. 7 — Движение вихря потока вслед за бегущим полем.

Вид гидродинамической внешней нагрузки влияет на магнитные усилия и важно правильно описывать систему при проектировании таких установок.

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 Джоулев 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 джоулева тепла на скорость потока.

В пятой главе проведены исследования по чувствительности сетки и модели турбулентности на точность результатов

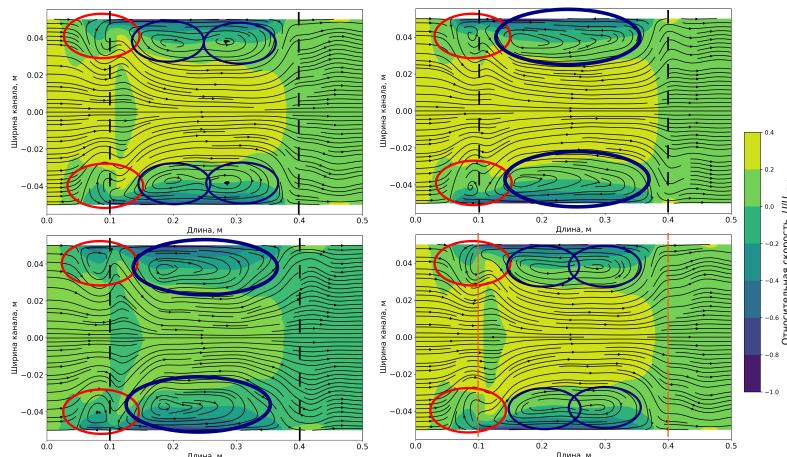


Рис. 8 — Формирование вихрей в идеализированном случае.

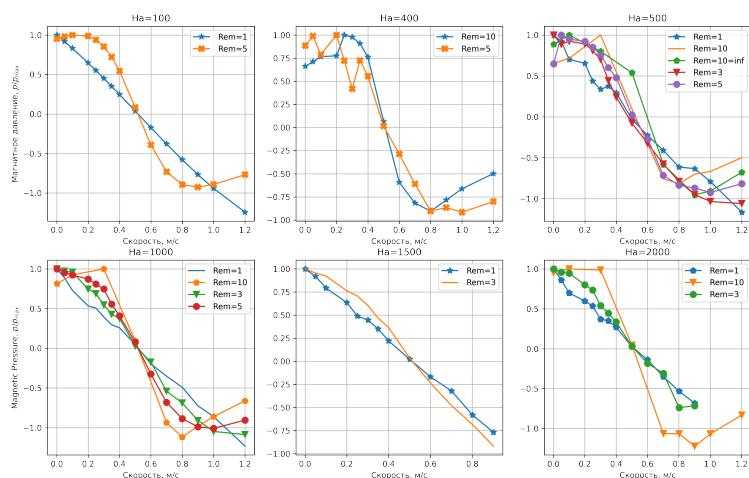


Рис. 9 — Магнитное давление в зависимости от расхода жидкости.

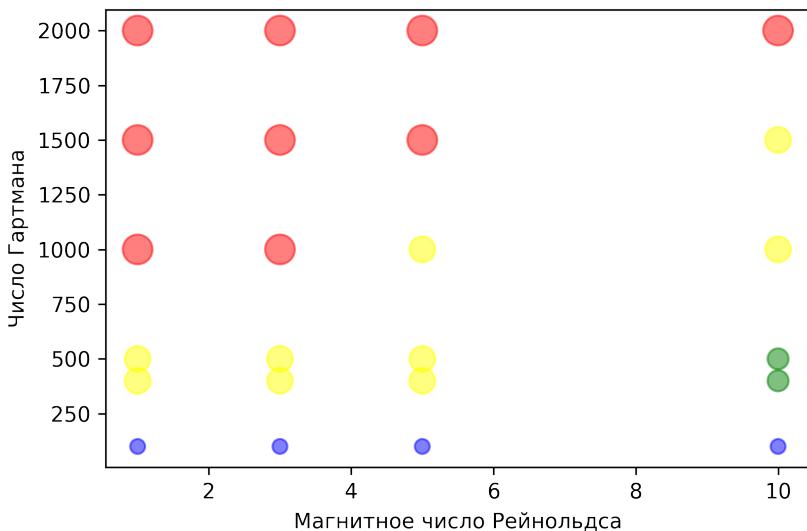


Рис. 10 — Картина возникновения вихрей. Синий цвет – устойчивое ламинарное состояние, зеленый – локальные возмущения, желтый – локальные устойчивые вихри, красный – сильная неустойчивость.

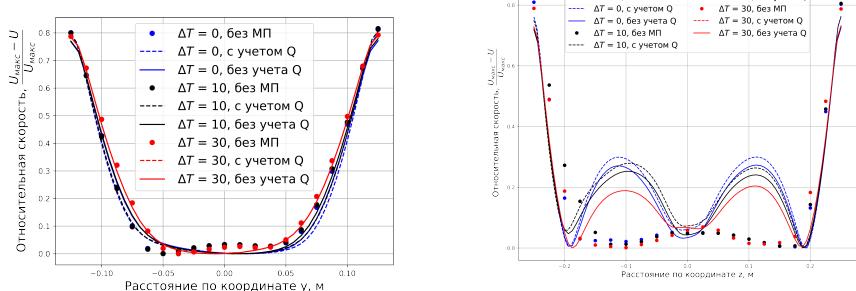


Рис. 11 — Относительная скорость между стенками (а) перпендикулярными и (б) параллельными магнитному полю с различными значениями разницы температур между перпендикулярными стенками

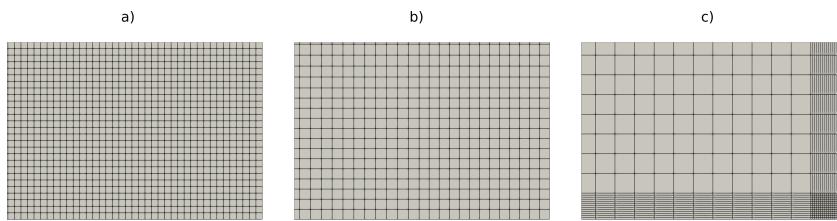


Рис. 12 — Варианты сеток: а) однородная мелкая сетка ( $80 \times 80 \times 200$ );  
б) однородная более крупная сетка ( $50 \times 50 \times 100$ ); б) неоднородная более  
крупная сетка ( $50 \times 50 \times 100$ )

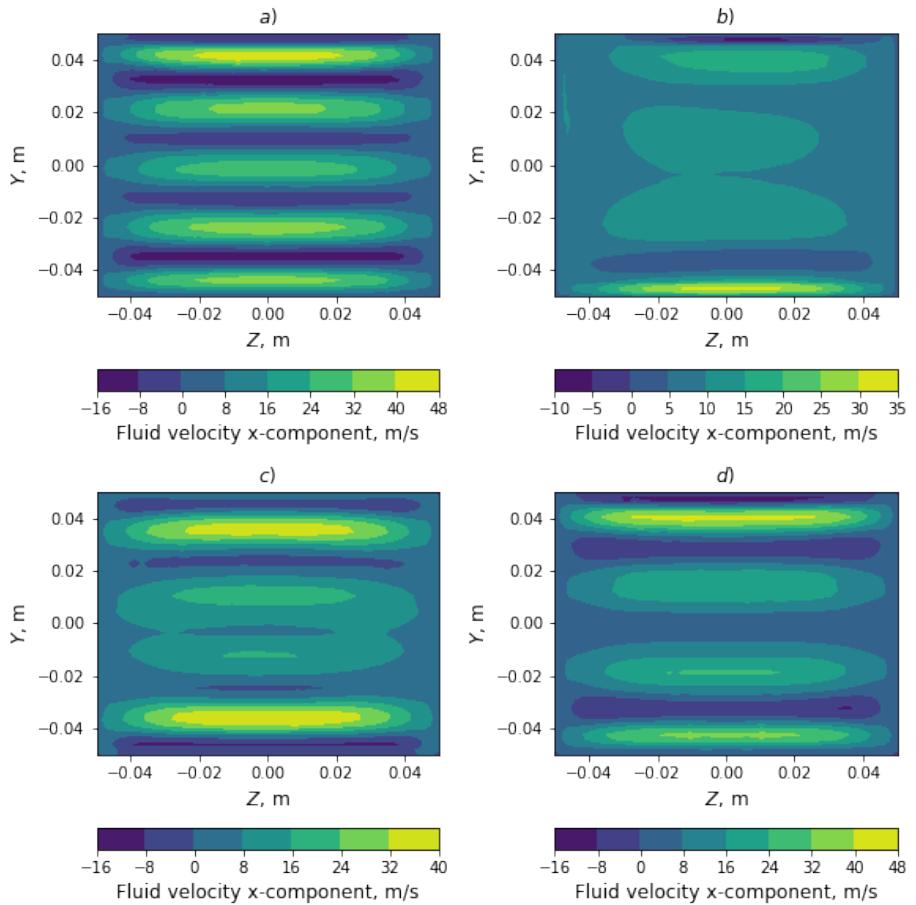


Рис. 13 — Распределение скорости в поперечном сечении на выходе из активной зоны магнитного поля: а) однородная мелкочастистая LES; б) неоднородная более крупная сетка LES; в) однородная более крупная сетка LES; г) равномерная более грубая сетка  $k - \omega$  SST;

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.

## 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] I. Smolianov, E. Shmakov и J. Vencels. — «Numerical analysis of liquid flows exposed to travelling magnetic field. 1. idealized numerical experiment». — В: *Magnetohydrodynamics* 57.1 (2021), с. 105—119. — doi: 10.22364/mhd.57.1.9.
- [3] 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». — В: *Magnetohydrodynamics* 57.1 (2021), с. 121—132. — doi: 10.22364/mhd.57.1.10.
- [4] E. Shvydkiy и др. — «Numerical modeling of the travelling magnetic field stirrer for liquid lithium». — В: *Magnetohydrodynamics* 53.4 (2017), с. 707—713. — doi: 10.22364/mhd.53.4.12.
- [5] F. Sarapulov и др. — «Numerical simulation of double side linear induction pump for liquid magnesium». — В: *Magnetohydrodynamics* 53.4 (2017), с. 603—609. — doi: 10.22364/mhd.53.4.2.
- [6] K. Bolotin и др. — «Numerical simulation of the electromagnetic stirrer adapted by using magnetodielectric composite». — В: *Magnetohydrodynamics* 53.4 (2017), с. 723—730. — doi: 10.22364/mhd.53.4.14.

- [7] Kirill E. Bolotin и др. — «Numerical simulation of electromagnetic processes of the modernized MHD-pump for dispensing molten aluminium 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] «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.
- [12] 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, EIConRus 2020*. — 2020, — C. 862—866. — ISBN: 9781728157610. — DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039053.
- [13] 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.

- [14] N. V. Tarchutkin и I. A. Smolyanov. — «Machine learning application for magnetohydrodynamic pump research». — B: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — Т. 950. — 1. — 2020. — doi: 10.1088/1757-899X/950/1/012019.
- [15] 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, — С. 685–688. — ISBN: 9781509004454. — doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448275.

*Смольянов 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 \_\_\_\_\_

