

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

На правах рукописи



**Смольянов Иван Александрович**

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

2. 4. 4. Электротехнология и электрофизика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург — 2022

Работа выполнена на кафедре электротехники Уральского энергетического института в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Сарапулов Сергей Федорович**

Официальные оппоненты: **Хацаюк Максим Юрьевич**,  
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ  
ВО «Сибирский федеральный университет»,  
г. Красноярск, профессор кафедры  
«Электротехника»

**Федин Максим Андреевич**,  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ  
ВО «Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», г. Москва, профессор  
кафедры «Электроснабжение промышленных  
предприятий и электротехнологий»

**Скриган Илья Николаевич**,  
кандидат технических наук, ФГАОУ ВО  
«Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)», ассистент  
кафедры «Электротехнологическая и  
преобразовательная техника»

Защита состоится 15 июня 2022 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.09.23 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=3514>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» «\_\_\_\_\_» 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Хальясмаа Александра Ильмаровна

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Принцип механического воздействия на жидкие металлы используется в металлургической и ядерной промышленности, в разработках измерительной техники, ядерном синтезе и многих других приложениях. Ключевыми задачами в металлургии являются транспортировка металла, плавка, кристаллизация, перемешивание металлов. Эти процедуры влияют на качество изготавливаемого металла, например, перемешивание металла в процессе кристаллизации позволяет получать измельчение зерна металла, гомогенизацию распределение примесей и повышение прочности конечного изделия.

Современные сплавы и сверхчистые металлы являются важными ключевыми элементами многих технических продуктов. Запуск новых типов реакторов требует модернизации охлаждающих систем, в которые необходимо встраивать бесконтактные насосы, способные создавать большое давление при высоком расходе перекачиваемого металла. Современные технологические процессы предполагают высокую точность управления параметрами жидких металлов, что ставит новые вызовы перед измерительной техникой. Эти задачи не всегда могут быть решены с помощью стандартных инженерных подходов, основанных только на эмпирических знаниях и/или теории электромагнетизма и электротехники. Такие подходы слабо учитывают влияние турбулентных потоков в расчетах, а их влияние играет важную роль во многих современных технологиях. Линейная и нелинейная теории устойчивости не позволяют с достаточной точностью предсказывать переход потока от ламинарного режима к турбулентному. Теоретически переход плоскопараллельного потока должен наступать при числе Рейнольдса больше 5772, но эксперимент показал, что турбулентность возникает при числе Рейнольдса 1000. Проведение эксперимента осложняется агрессивностью металла, его непрозрачностью и высокими температурами. Поэтому возникает необходимость в разработках численных моделей, которые способны с достаточной точностью прогнозировать поведение подобных систем. Решение этих практических задач требует фундаментального изучения механизмов неустойчивости потоков жидкости.

**Степень разработанности темы.** Вопросами исследования процессов в электропроводящей жидкости под воздействием внешних магнитных полей занимаются научные коллективы под руководством Кириллова И.Р. (НИИЭФА), Тимофеева В.Н. и Хацаюка М.Ю. (СФУ), Фрик П.Г. и Колисниченко И.В. (ИМСС УрО РАН), Waake E. (Leibniz University Hannover), Jakovičs A. (University of Latvia),

Krasnov D. (Technische Universität Ilmenau), Zikanov O. (University of Michigan-Dearborn).

**Целью** данной работы является изучение механизмов возникновения турбулентных потоков в проводящей немагнитной жидкости под воздействием бегущего магнитного поля и исследование влияния неустойчивых режимов на основные характеристики магнитогидродинамических насосов. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать алгоритмы расчета связанных задач магнитного, гидродинамического и температурного полей для потоков жидкости в каналах.
2. Верифицировать разработанные алгоритмы с помощью тестовых задач и экспериментальных данных и выработать рекомендации для настройки численных моделей.
3. Разработать инструмент для автоматизации процедур настройки численных моделей в программах с открытой лицензией.
4. Оценить влияние электромагнитных явлений на поведение потока проводящей жидкости в прямоугольных каналах.
5. Исследовать влияние турбулентных течений в индукционных насосах на расходно–напорную характеристику.
6. Разработать карту состояний потока жидкости в прямоугольных каналах под действием бегущего магнитного поля.
7. Рассмотреть влияние термогравитационной конвекции на поведение потоков жидкости в прямоугольных каналах под действием бегущего магнитного поля.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые разработаны алгоритмы для расчета численных моделей в программах с открытой лицензией OpenFOAM, Elmer и при помощи библиотеки EOF-library для обмена данными между ними. Уникальность этих алгоритмов заключается в реализованной возможности изменять условия запуска расчета электромагнитной задачи в математической модели, а не в самом алгоритме.
2. Разработана библиотека на языке Python для автоматизации настройки моделей в численных программах с открытым кодом OpenFoam и Elmer.
3. Реализована уникальная математическая модель для расчета задач магнитной гидродинамики с возможностью исключать из расчетов электромагнитные эффекты. На основе этой модели впервые проведены численные исследования по оценке поперечного и продольного краевых эффектов по отдельности друг от друга на поведение потока.
4. Выведен безразмерный критерий с учетом аспектного соотношения ширины и высоты прямоугольного канала для

анализа устойчивости состояний потоков жидкости в нем. На основе этого критерия было показано, что увеличение ширины канала ослабляет влияние электромагнитных эффектов в областях между активной и краевыми зонами.

5. Проведен анализ влияния неустойчивых режимов на расходно-напорную характеристику линейного индукционного насоса в диапазоне чисел Гартмана от 0 до 8000, Стюарта от 0 до 100, Рейнольдса от 100 до 55 000, магнитного числа Рейнольдса от  $4\pi 10^{-7}$  до 10.
6. Проведена классификация пространственных структур вихрей, образующихся в связи с воздействием бегущего магнитного поля на поток жидкости в прямоугольном канале. На основании этой классификации построена карта возникновения вихревых течений в диапазоне магнитного числа Рейнольдса от  $4\pi 10^{-7}$  до 10 и числа Гартмана от 100 до 2000.
7. Впервые проведена оценка влияния термогравитационных эффектов и учета джоулева тепла на потоки проводящей жидкости в прямоугольном канале под действием бегущего магнитного поля. Эти исследования выполнены при значениях числа Гартмана 100, гидродинамического числа Рейнольдса  $10^4$ , магнитного числа Рейнольдса 10 и числа Стюарта 10.

**Теоретическая и практическая значимость.** Понимание возникновения, протекания и подавления неустойчивых состояний потоков жидкости позволит приблизиться к решению задачи разработки прототипов конструкций индукционных насосов, работающих выше 8 бар при расходе жидкости от  $3 \text{ м}^3/\text{с}$ . Проведенный сравнительный анализ влияния краевых эффектов на поведение потока позволил понять, какие особенности необходимо учитывать в математических моделях для инженерной практики. Разработанные карты состояний потока жидкости позволят избежать нежелательных режимов работы магнитогидродинамических устройств без проведения дополнительных исследований и расчетов. Результаты влияния аспектного соотношения ширины и высоты канала на пространственную структуру вихрей позволят упростить процедуру выбора типа конструкции индукционного насоса в процессе проектирования. Результаты влияния термогравитационных эффектов наглядно показывают в каких условиях необходимо учитывать температурные режимы. Предлагаемые подходы могут быть применены для решения большого спектра практических задач.

Алгоритмы для расчета численных моделей могут быть использованы как в инженерной практике, так и в научных исследованиях. Разработанные в диссертационной работе рекомендации по настройке численных моделей для расчета задач течения проводящей жидкости под воздействием магнитного поля позволяют снизить требования к

вычислительной технике. Выработанные критерии для оценки масштаба сетки позволят будущим исследователям разрабатывать оптимальные численные модели с точки зрения вычислительных ресурсов персонального компьютера. Разработанная библиотека «PyRunOF» позволяет проводить параметрические исследования, автоматизировать процедуры обработки результатов и настройки модели, что существенно сокращает время на осуществление рутинных процедур.

**Методология и методы исследования.** 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 фазовые состояния вещества, связанные с потоками жидкости, рассчитывались в OpenFOAM, а расчеты температурных режимов в магнитной системе (катушки, магнитопровод и т. д.) производились в Elmer. Обмен данными между ними реализован с помощью библиотеки EOF-library с использованием параллельного интерфейса передачи сообщений (MPI).

Для упрощения работы с этими программами была написана библиотека «PyRunOF» на языке Python для настройки моделей, запуска их на расчет, проведения параметрических исследований, автоматизированного создания сеток модели, обработки результатов и ряда других опций.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Верифицированные численные модели, разработанные на основе методов конечных элементов и объемов для расчета связанных задач гидродинамики, магнитного и температурного полей с возможностью учета фазового перехода.
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 МГД насосов на основные их характеристики.
6. Количественная оценка влияния тепловых явлений на поведение потока жидкости в безразмерной постановке задачи для прямоугольного канала.

**Достоверность** результатов проведенных исследований подтверждается сравнением результатов расчета, полученных различными методами с данными экспериментов и результатами других авторов.

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

1. IEEE Conference of Russia Young Researches in Electrical and Electronic Engineering, 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 (РМГД-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. Всероссийская конференция «Наука. Технология. Инновации», Новосибирск, 2018.
10. VI Международный семинар «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 19 научных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, и входящих в международные базы цитирования Scopus и WoS.

Диссертационная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект «Численное исследование влияния неустойчивости 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, формулируется

цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена обзору применений теоретических знаний о электромагнитных явлениях на практике, обоснованию важности исследований неустойчивых состояний потока и основным подходам к упрощению процесса исследования, используя теорию подобия.

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, в индукционных насосах в диапазоне давлений (выше 8 бар) и расхода жидкости (от 3 м<sup>3</sup>/с), возникают сильные турбулентные течения. Эти течения существенно влияют на показатели установки, снижают их срок службы и приводят к аварийным режимам. Также турбулентные течения приводят к возникновению обратных потоков, что влияет на эффективность процесса перекачки металла. Это осложняет задачу разработки конструкции индукционного насоса, способного работать в таких режимах.

Большое количество параметров влияет на поведение потока. Поэтому используют теорию подобия физических явлений для снижения количества исследуемых переменных. Условия возникновения неустойчивости потока можно записать в выражениях чисел подобия. В случаях, когда используется теория подобия, необходимо четко представлять физический смысл рассматриваемого явления.

При всем многообразии возникающих причин появления турбулентных течений в практических задачах магнитной гидродинамики, их можно условно классифицировать по физической природе происхождения: электромагнитной, термической и гидродинамической природы. Гидродинамические, электромагнитные и термические явления приводят к возникновению градиента давлений, который в свою очередь вызывает закручивание потоков жидкости. Таким образом, действие всех этих явлений можно обобщить тем, что они приводят к увеличению давлений в пространстве. Турбулентные течения возникают в локальной области и распространяются в пространстве и времени при достаточном конечном возмущении на них. Условие наличия достаточного возмущения для возникновения турбулентных течений анализируют с помощью баланса кинетических и диссипативных энергий.

**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) переменные обозначаются следующими символами  $\mathbf{U}$  – скорость,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\nu_t$  – турбулентная кинематическая вязкость,  $\rho$  – плотность и  $p$  – давление. Для задач массотеплопереноса рассматриваемых в данной работе, уравнение момента (1) и закон сохранения массы записываются для модели сжимаемой жидкости, а также добавляются уравнение энергии для расчета тепловых процессов и условия агрегатного состояния фракции. Все эти уравнения решаются в программе с открытой лицензией OpenFOAM. Электромагнитные усилия в (1) вычисляются с помощью метода конечных элементов в программе Elmer. Во всех задачах магнитное поле представляется в гармоническом виде и описывается  $A - \varphi$  формулировкой уравнения магнитного поля в комплексном виде с помощью векторного  $\underline{\mathbf{A}}$  и скалярного  $\underline{\varphi}$  магнитного потенциала, как

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

где  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость среды,  $\sigma$  – электропроводность,  $\omega$  – угловая частота.

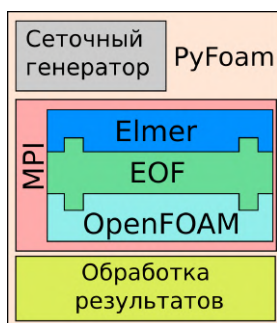


Рис. 1 — Блок-схема взаимодействия программ для расчета задач магнитной гидродинамики.

Исследование механизмов возникновения неустойчивых режимов потока жидкости требует перебора большого количества параметров и изменения 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 gitHub<sup>1</sup>. Основные ее возможности – создание расчетной области и ее

дискретизация с помощью пакетов Salome, Gmesh или встроенной утилиты blockMesh в OpenFOAM; задание начальных и граничных условий и перенесение их из результатов других моделей; задание параметров исследования; проведение расчетов мультифизических моделей с помощью библиотеки EOF-library, а также проведение обработки результатов в программе ParaView или Python библиотеке matplotlib. Блок-схема алгоритма работы этой библиотеки указана на Рис. 1.

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

Верификация рассматриваемых в работе моделей и алгоритмов решения уравнений магнитной гидродинамики была проведена, сравнивая результаты полученные с помощью этих инструментов, аналитического способа и встроенной процедуры «mhdFoam» для решения МГД задач в программе OpenFOAM. Сравнение было проведено на примере одной из вариаций задач Гартмана в двухмерной постановке (Рис. 2а). В таких задачах третья компонента пространства играет важную роль как с точки зрения гидродинамики так и с точки зрения электромагнетизма. Это подтверждается, сравнением результатов, полученных при расчете двухмерной модели с изолированными стенками и трехмерными моделями с различной электропроводностью стенок. на Рис. 2б. Результаты на Рис. 2б рассматривают три случая граничных условий: Случай 1 — все стенки изолированы; Случай 2 — стенки, перпендикулярные направлению магнитного поля, обладают бесконечной проводимостью, а стенки параллельные магнитному полю изолированы; Случай 3 — все стенки обладают бесконечной проводимостью.

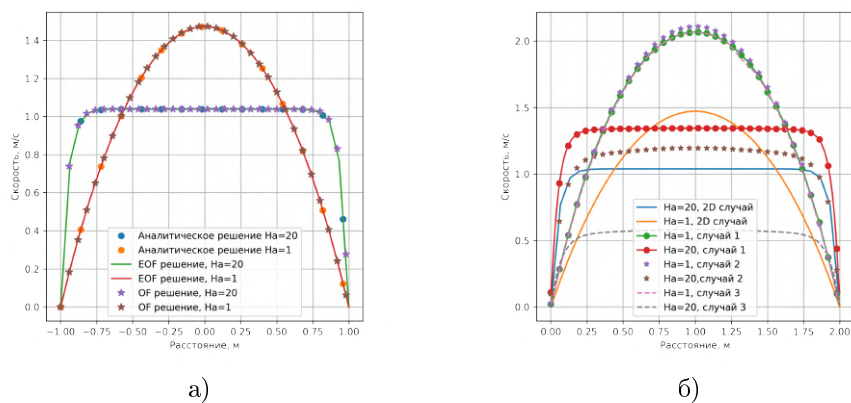


Рис. 2 — Сравнение распределения скорости между стенками перпендикулярными магнитному полю для в а) двухмерной постановки и б) трехмерной с различными граничными условиями.

Проведена экспериментальная верификация расчетов для лабораторной установки, имитирующей отливку жидкого металла. Отклонения между численными и экспериментальными результатами не превышают 11 % и показывают высокую сходимость в 80 % случаев. Производительность рассматриваемого кода сравнена с расчетами полученными в программах полученных в коммерческих пакетах Comsol и ANSYS (см. Таблицу 1).

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	-

Проведено исследование по оценке влияния сеточного масштаба на качество результатов. Структурная сетка с равномерным шагом позволяет детальнее разрешать структуры вихрей, чем с неравномерным шагом при одинаковом количестве элементов. Самые требовательные области пространства к настройкам сетки — это области перехода между краевыми зонами (магнитное поле равно нулю) и активной (магнитное поле не равно нулю), а также пристеночные области у стенок канала. Пространственная оценка отношения кинетической энергии крупномасштабных разрешенных вихрей к полной турбулентной кинетической энергии позволяет понять области, в которых требуется измельчение сетки. Теоретически это отношение должно быть более 80 %.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния магнитных эффектов на поведения потока в различных режимах работы в прямоугольном канале 100 x 100 x 500 мм (см. Рис. 3).

Размер канала выбран для удобства расчета в безразмерных числах, 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 потока жидкости. Магнитное поле описывается уравнением  $\mathbf{V} = \mathbf{V}e^{j(\omega - \varphi - \alpha x)}$ . Для имитации конечности магнитной системы магнитное поле отсутствует на расстоянии 100 мм от входа и выхода канала. В модели стенки рассматриваются

идеально изолированными  $grad\varphi = 0$  для электрического тока и без проскальзывания  $\mathbf{U} = 0$  для потока жидкости. На входе канала задается граничное условие Пуазейлевского распределения скорости из

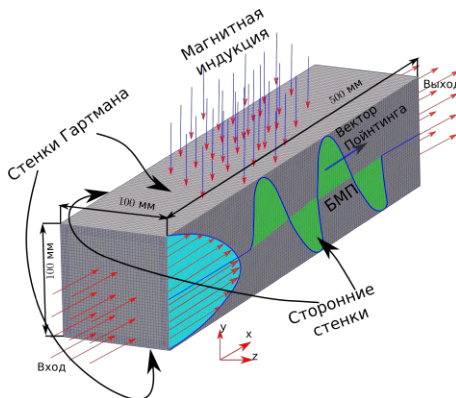


Рис. 3 — Описание модели.

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 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 не учитывается). В расчетах участвуют все три компоненты плотности тока, 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 занижением 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 (1) член усилий увеличивается в количество раз на сколько была снижена электропроводность.

На Рис. 4 показаны графики относительных скоростей вдоль линий в центре канала между стенками, перпендикулярными (Рис. 4а) и параллельными (Рис. 4б) магнитным линиям для идеализированного бегущего магнитного поля (случай 1). Эти результаты рассчитаны для числа Рейнольдса 54500, чисел Гартмана от 0 до 7377 и Стюарта от 0 до 100. Можно заметить ускорение потока (небольшие пиковые значения скорости) у стенок, перпендикулярных магнитному полю (гартмановские) при малых значениях Стюарта от 0 до 5, в то время как на этих же числах Стюарта у стенок, параллельных магнитному полю это ускорение отсутствует. Потoki с направлением скорости, противоположным основному потоку, образуются у стенок, параллельных магнитному полю, а у гартмановских стенок значительное ускорение потока при числах Стюарта больше четырех. Можно отметить, что значения относительной скорости обратных потоков меньше, чем пиковые

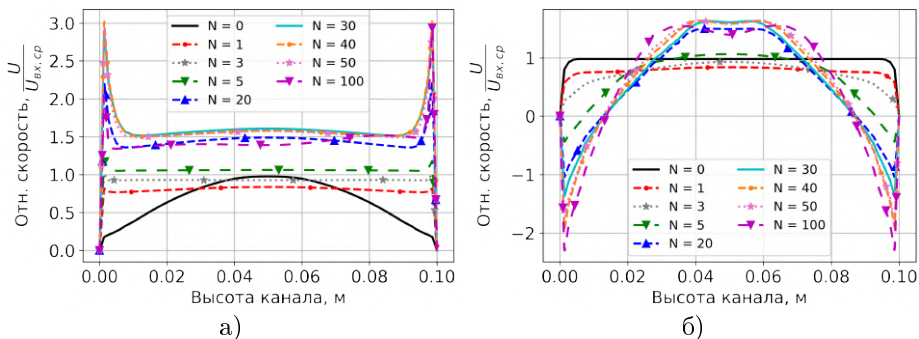


Рис. 4 — Распределение скорости между стенками: а) перпендикулярными магнитному полю и б) параллельными магнитному полю в центре канала.

скорости, но дистанция их распространения значительно больше, что приводит к сужению эффективного сечения в плоскости перпендикулярной магнитному полю. Обратные потоки существенно снижают эффективное сечение канала, что приводит к повышению гидродинамической нагрузки.

Максимальная относительная скорость наблюдается в случае 3 (Рис. 5), когда не учитывается влияние индуцированных токов на магнитное поле и учитывается поперечный краевой эффект. Обратные

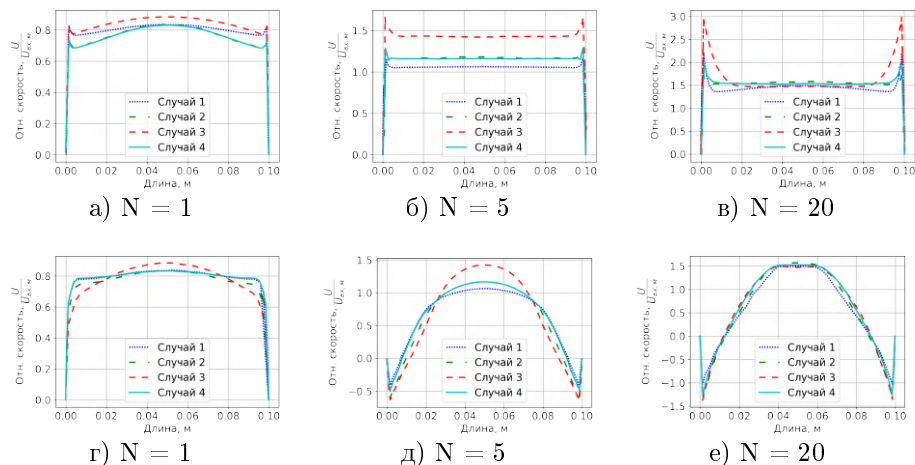


Рис. 5 — Распределение скорости между стенками перпендикулярными (а–в) и параллельными (г–д) к магнитному полю.

потоки формируются так же, как и во всех четырех случаях. Можно наблюдать, что величина обратных течений практически не зависит

от краевых эффектов, но зависит от значения числа Стюарта. Скорости потока около гартмановских стенок и в центре канала существенно зависят от воздействий краевых эффектов и числа Стюарта. Магнитные эффекты в большей степени изменяют значения скоростей возле гартмановских стенок, чем у стенок параллельных вектору магнитной индукции. Обратные потоки у стенок параллельных магнитному полю образуются как следствие изменения профиля у гартмановских стенок. Результаты в случае 2 (влияние только индуцированных токов) и случае 4 (все эффекты учитываются) незначительно расходятся. Из этого можно сделать вывод, 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 эффекта, чем в случае идеального магнитного поля.

В случае с идеализированным магнитным полем возникают два двумерных вихря на входе активной зоны канала у стенок (выделено красным цветом на Рис. 6) и два вихря в самой активной зоне (синий цвет). Через определенное время красные вихри полностью сливаются с синими вихрями. В активной зоне формируются два вихря, периодически

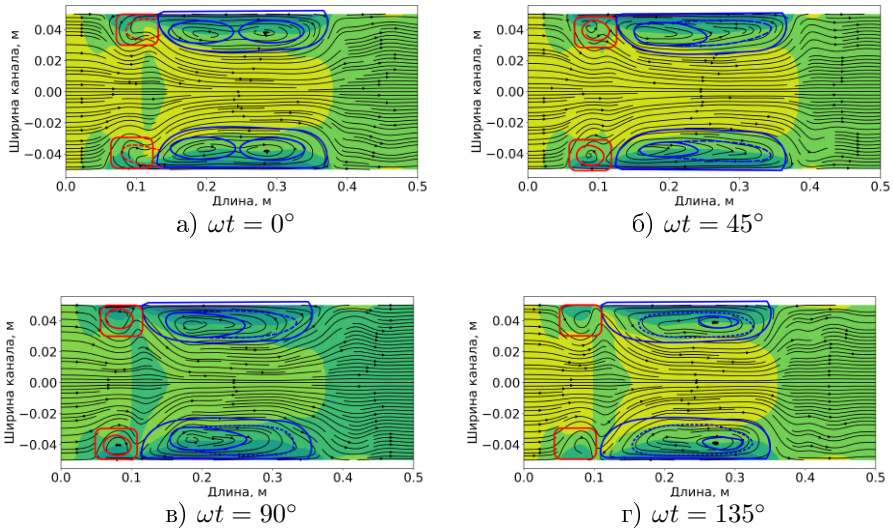


Рис. 6 — Эволюция вихрей для числа Стюарта 20.

превращаясь в один. Возникновение и затухание носит периодический характер с половиной периода магнитного поля. Обратные потоки

возникают за счет образования двухмерных вихрей у стенок канала. Количество вихрей изменяется со временем от одного до двух. Их количество равно значению пар полюсов.

На основе полученных результатов влияния магнитных эффектов на поток жидкости были построены напорно–расходные характеристики насоса для различных чисел подобия (Рис. 7). При увеличении магнитного

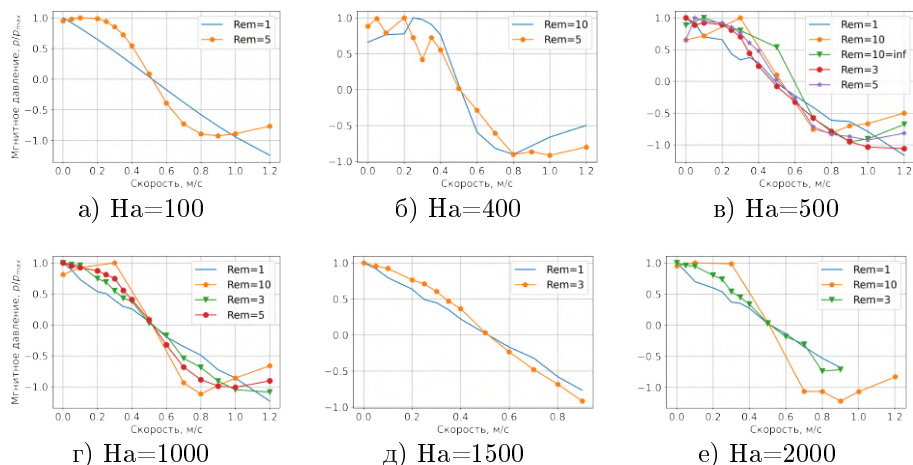


Рис. 7 — Зависимость магнитного давления в зависимости от скорости потока на входе канала для значения Гартмана от 100 до 2000.

числа Рейнольдса характеристика становится S-образной, при малых его значениях стремится к линейной функции. 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 описать 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 (Рис. 8).

Проведен анализ аспектного соотношения ширины и высоты канала на структуру потоков. На Рис. 9 показано, что увеличение ширины канала ослабляет влияние электромагнитных эффектов в областях между активной и краевыми зонами. Образование вихрей из-за продольного краевого эффекта сильно зависит не только от параметров магнитной системы, но и от гидродинамических. Введен критерий для оценки неустойчивостей в зависимости от ширины и высоты канала.

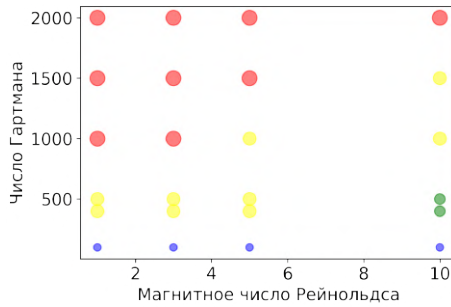


Рис. 8 — Картина возникновения вихрей. Синий цвет — устойчивое ламинарное состояние, зеленый — локальные возмущения, желтый — локальные устойчивые вихри, красный — сильная неустойчивость.

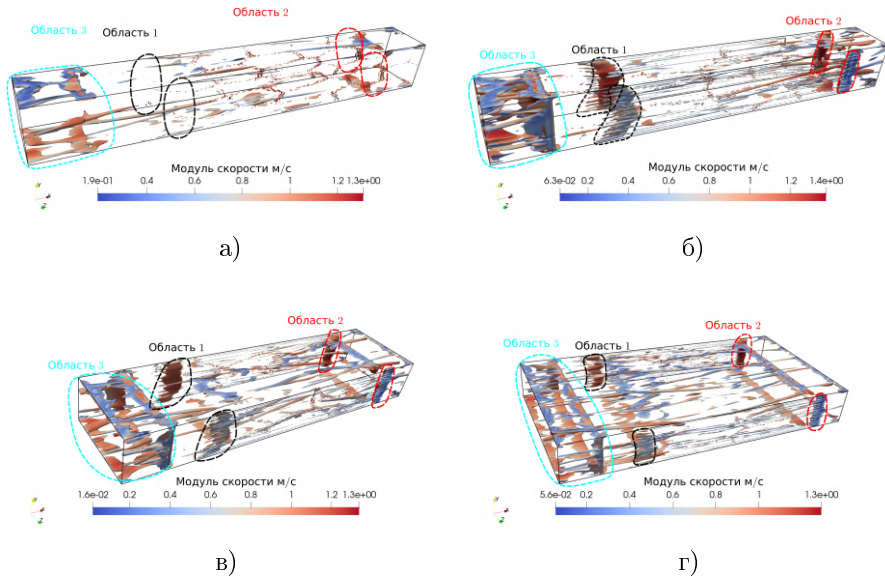


Рис. 9 — Изо-поверхности Q-критерия с нанесение цветовой гаммы, соответствующей модулю скорости с действием магнитного поля для а)  $\beta = \infty$  б)  $\beta = 1$  в)  $\beta = 2$  в)  $\beta = 4$ .

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. 10 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.

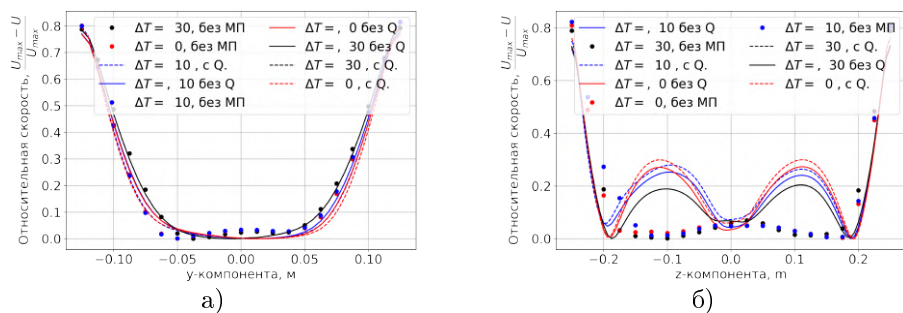


Рис. 10 — Относительная скорость между стенками (а) перпендикулярными и (б) параллельными магнитному полю с различными значениями разницы температур между перпендикулярными стенками.

Помимо распределения скорости в работе приводятся результаты расчета значений температур. Разница между результатами расчета скорости с учетом источника нагрева и без составляет около 5 %, а между результатами расчета температур не превышает 0.01 %, но даже это незначительное изменение приводит к колебаниям скорости потока жидкости. Влияние на распределение температур оказывает наличие массопереноса из-за лоренцевских сил. Чем выше разница температур между стенками, тем сильнее влияние джоулева тепла на скорость потока.

Важность этого исследования объясняется значительными градиентами температур входной жидкости (в металлургии при разливке магния разница температур достигает 100 С°) и низким КПД (менее 20 %) электромагнитных насосов, как следствие высоким тепловыделением. В последующих работах особый интерес вызывают подобные исследования на малых значениях магнитного числа Рейнольдса и высоких значениях числа Гартмана, с учетом числа Прандтля и неравномерности магнитного поля из-за особенностей конструкций катушек.

Количественное отличие результатов усредненных и мгновенных значений скорости можно показать с помощью одномерных графиков их

распределения вдоль линий в пространстве на Рис. 11. Разница между мгновенными и усредненными значениями скорости достигает порядка 0.2 м/с. Максимальная амплитуда флуктуаций скорости наблюдается в центральной части канала, где значения скорости имеют максимальные значения. Амплитуды флуктуаций скорости сопоставимы в случаях расчетов с учетом действия магнитного поля и без. Из этого можно сделать вывод, что магнитное поле слабо влияет на флуктуации скорости потока. В случае расчетов на усредненных значениях происходит размытие пиковых значений скорости у стенок канала и в его центре. В центре канала наблюдается скачок значений мгновенной скорости. Этот скачок не наблюдался при моделировании потоков жидкости в таких же системах, с теми же моделями турбулентности и физическими настройками.

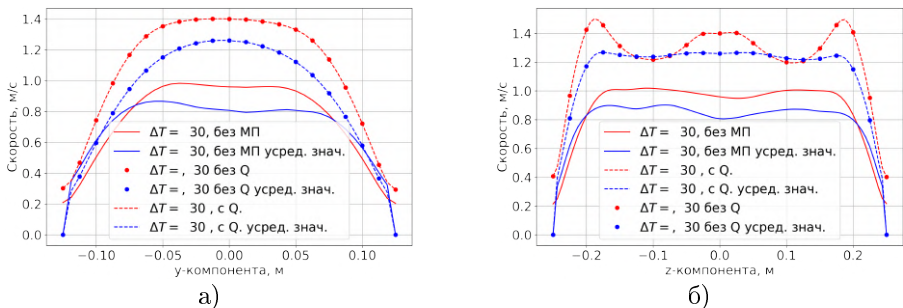


Рис. 11 — Относительная скорость между стенками (а) перпендикулярными и (б) параллельными магнитному полю с различными значениями разницы температур между перпендикулярными стенками.

Модуляция пиковых скоростей в пространстве — это одна из важных характеристик при анализе неустойчивых состояний потока жидкости и поиска граничных турбулентно–ламинарных состояний потока. Пиковые значения скорости вдоль стенок канала имеют сглаженную форму. Важный нюанс при использовании мелкомасштабных моделей турбулентности — правильная настройка сетки. Некорректное разрешение сеточного масштаба вихрей для мелкомасштабных моделей турбулентности приведет к большим значениям погрешности результатов, чем в случае моделей турбулентности, осредненных по Рейнольдсу. Поэтому, можно заключить, что при анализе термогравитационных эффектов важно адекватно выбирать модель турбулентности.

В заключении главы показаны возможности масштабирования предлагаемых алгоритмов расчета численных моделей для проведения исследований по кристаллизации однокомпонентных и двухкомпонентных

сплавов, плавке металла с учетом и без учета свободной поверхности, а также электромагнитному перемешиванию с учетом мениска.

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

1. Разработаны алгоритмы расчета численных моделей для описания течений в каналах под воздействием магнитного поля. Эти алгоритмы объединяют преимущества использования методов конечных элементов для расчета электромагнитных задач, в особенности со специфической областью расчетов и методов конечных объемов для вычисления гидродинамических уравнений.
2. Разработана библиотека «PyRunOF» на языке Python для автоматизированной настройки модели и проведения параметрических исследований. Применение этой библиотеки позволяет исключить множество рутинных операций по настройке численных моделей и сократить время на создание модели.
3. Проведена численная верификация алгоритмов расчета. Исследования показали, что отклонения между результатами, полученными с помощью авторского кода и аналитического решения составляют не более 1 %. Относительные значения отклонений между результатами, полученными с помощью предлагаемых моделей и алгоритмов расчета с результатами, рассчитанными в коммерческих программах и тестовых задачах, не превышают 1 % для большинства случаев, а для ряда задач составляют около 5 %. Отклонения между численными и экспериментальными результатами не превышают 11 % и показывают высокую сходимость в 80 % случаев.
4. Показано, что паразитные эффекты с точки зрения электромеханики могут положительно влиять на электротехнологические процессы, например, подавлять турбулентные течения, ускорять поток жидкости или выравнивать значения скорости потока по сечению канала. Скорость движения образовавшихся вихрей в пространстве пропорциональна синхронной скорости бегущего магнитного поля. Количество вихрей у стенок, параллельных магнитному полю, равняется количеству пар полюсов источника магнитного поля. Скорость потока жидкости увеличивается при учете поперечного краевого эффекта в расчетах. Значения скорости обратных потоков практически не зависят от действия краевых эффектов. Краевые эффекты влияют на ускорение потока вдоль стенок перпендикулярных магнитному полю.
5. Построена карта состояний возникновения турбулентных течений на основе чисел Гартмана и магнитного числа Рейнольдса с классификацией по типу турбулентностей. На основе этой карты

можно утверждать, что увеличение магнитного числа Рейнольдса приводит к снижению вероятности перехода к турбулентным течениям. Увеличение числа Гартмана приводит к образованию мелкомасштабных глобальных вихревых течений.

6. Увеличение магнитного числа Рейнольдса приводит к изменению формы кривой расходно–напорной характеристики насоса от линейного характера к S–образному. Нагрузочная характеристика (тип гидродинамической системы) играет важную роль в анализе поведения потока. Точка перехода расходно–напорной характеристики через нулевое значение давления не зависит от значений чисел Гартмана и магнитного числа Рейнольдса, а зависит от типа гидродинамической системы.
7. Проведен анализ аспектного соотношения ширины и высоты канала на структуру потоков. Показано, что увеличение ширины канала приводит к ослаблению электромагнитных эффектов в областях между активной и краевыми зонами. Показано, что образование вихрей из-за продольного краевого эффекта сильно зависит не только от параметров магнитной системы, но и от гидродинамических. Введен критерий для оценки неустойчивостей в зависимости от ширины и высоты канала.
8. Разница между результатами с учетом джоулева нагрева и без не превышает 0.01 % для поля температур и 5 % для поля скоростей. Магнитное поле за счет электромагнитных усилий приводит к изменению скорости потока. Температурное поле претерпевает изменение из-за возникшего изменения скорости. Как показало численное исследование даже незначительное изменение температурного поля приводит к изменению потока жидкости. Это цепочка объясняет взаимосвязь физических явлений и важность решения сильно связанных мультифизических задач.

#### **Перспективами дальнейшей разработки темы являются:**

1. Проведение исследований влияния пространственных и временных гармоник магнитного поля на нестабильность потока;
2. Уточнение разработанных карт состояний с помощью трехмерных численных моделей и развитие их для более широкого диапазона чисел подобия;
3. Разработка новых критериев устойчивости потока жидкости, способных отражать физический смысл как можно большего количества параметров. Это позволит снизить количество переменных в исследованиях;
4. Исследование влияния термогравитационных явлений и разработка критерии оценки их воздействия на поведения потоков жидкости с учетом особенностей объекта исследования.

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:**

1. **Smolianov, I.** Numerical analysis of liquid flows exposed to travelling magnetic field. 1. idealized numerical experiment / I. Smolianov, E. Shmakov, J. Vencels // *Magneto hydrodynamics*. – 2021. – Vol. 57, no. 1. – P. 105–119. – (0,75 п. л. / 0,55 п. л.; Scopus, WoS).
2. **Smolianov, I.** Numerical analysis of liquid flows exposed to travelling magnetic field. 2. mhd instabilities due to magnetic end effects / I. Smolianov, E. Shmakov, J. Vencels // *Magneto hydrodynamics*. – 2021. – Vol. 57, no. 1. – P. 121–132. – (0,6 п. л / 0,2 п. л; Scopus, WoS).
3. **Smolyanov, I.** Verification of the code to calculate duct flow affected by external magnetic field / I. Smolyanov, E. Shmakov, E. Baake, M. Guglielmi // *Computational Continuum Mechanics*. – 2021. – Vol. 14, no. 3. – P. 322–332. – (0,4375 п. л / 0,2 п. л; Scopus).
4. Shmakov, E. I. Calculation of Magnetic Field of Induction Pump Using Open Source Software / E. I. Shmakov, **I. A. Smolyanov**, N. V. Tarchutkin // *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020*. – 2020. – P. 862–866. – (0,165 п. л / 0,1 п. л; Scopus).
5. **Smolyanov, I. A.** Comparison of Different Approaches to Calculate Magnetic Field of Moving Magnets for Liquid Metal Stirring / I. A. Smolyanov // *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020*. – 2020. – P. 878–882. – (0,2 п. л / 0,2 п. л; Scopus).
6. Tarchutkin, N. V. Machine learning application for magnetohydrodynamic pump research / N. V. Tarchutkin, **I. A. Smolyanov** // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 950. – 2020. – P. 012019. – (0,07 п. л / 0,005 п. л; Scopus).
7. **Smolyanov, I.** Calculation of linear induction motor features by detailed equivalent circuit method taking into account non-linear electromagnetic and thermal properties / I. Smolyanov, F. Sarapulov, F. Tarasov // *Computers and Mathematics with Applications*. – 2019. – Vol. 78, no. 9. – P. 3187–3199. – (0,315 п. л/ 0,1 п. л; Scopus, WoS).
8. Sarapulov, F. N. Mathematical Modeling of a Linear-Induction Motor Based on Detailed Equivalent Circuits / F. N. Sarapulov, V. E. Frizen, E. L. Shvydkiy, **I.A. Smol'yanov** // *Russian Electrical Engineering*. – 2018. – Vol. 89, no. 4. – P. 270–274. – (0,25 п. л/ 0,135 п. л; Scopus).
9. Sarapulov, F. Study of the linear induction motor with bimetallic secondary element / F. Sarapulov, **I. A. Smolyanov**, F. E. Tarasov

- // ACTA TECHNICA CSAV. – 2018. – Vol. 63, no. 2. – P. 205–220. – (0,7 п. л / 0,4 п. л; Scopus).
10. Shvydkiy, E. Numerical study of the possibility of using cermet inserts in electromagnetic stirring application / E. Shvydkiy, K. Bolotin, **I. Smolyanov** // ACTA TECHNICA CSAV. – 2018. – Vol. 63, no. 5. – P. 709–720. – (0,517 п. л / 0,1 п. л; Scopus).
  11. **Smolyanov, I. A.** Optimal design of MHD pump / I. A. Smolyanov, P. Karban // 12th International Conference ELEKTRO 2018, 2018 ELEKTRO Conference Proceedings. – 2018. – P. 1–4. – (0,4 п. л / 0,2 п. л; Scopus, WoS).
  12. **Smolyanov, I. A.** Shape optimization of laboratory induction pump / I. A. Smolyanov, Vaclav Kotlan, Ivo Dolezel, Pavel Karban // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. 2018–Janua. – 2018. – P. 793–798. – (0,465 п. л / 0,3 п. л; Scopus, WoS).
  13. **Smolyanov, I.** The problem of determining the position of the metal in levitation melting / I. Smolyanov, E. Shmakov, N. Tarchutkin // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – 2018. – P. 799–802. – (0,125 п. л / 0,1 п. л; Scopus, WoS).
  14. Shvydkiy, E. Numerical modeling of the travelling magnetic field stirrer for liquid lithium / E. Shvydkiy, V. Zaharov, K. Bolotin, **I. Smolyanov**, S. Sarapulov // Magnetohydrodynamics. – 2017. – Vol. 53, no. 4. – P. 707–713. – (0,45 п. л / 0,1 п. л; Scopus, WoS).
  15. Sarapulov, F. Numerical simulation of double side linear induction pump for liquid magnesium / F. Sarapulov, **I. Smolyanov**, F. Tarasov, K. Bolotin, E. Shvydkiy // Magnetohydrodynamics. – 2017. – Vol. 53, no. 4. – P. 603–609. – (0,45 п. л / 0,3 п. л; Scopus, WoS).
  16. Bolotin, K. Numerical simulation of the electromagnetic stirrer adapted by using magnetodielectric composite / K. Bolotin, **I. Smolyanov**, E. Shvydkiy, V. Frizen, S. Bychkov // Magnetohydrodynamics. – 2017. – Vol. 53, no. 4. – P. 723–730. – (0,45 п. л / 0,05 п. л; Scopus, WoS).
  17. Bolotin, K. E. Numerical simulation of electromagnetic processes of the modernized MHD-pump for dispensing molten aluminium from the stationary induction furnace / K. E. Bolotin, E. L. Shvydkiy, V. E. Frizen **I. A. Smolyanov**, // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. – 2017. – P. 1488–1490. – (0,1875 п. л / 0,05 п. л; Scopus, WoS).
  18. **Smolyanov, I. A.** Research electromechanical characteristics of magnetohydrodynamic pump / I. A. Smolyanov, E. L. Shvydkiy, F. N.

- Sarapulov, S. F. Sarapulov // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. – 2017. – P. 1590–1593. – (0,1625 п. л. / 0,1 п. л.; Scopus, WoS).
19. Shvidkiy, E. L. Simulation of continuous casting process with electromagnetic influence to the ingot liquid phase / E. L. Shvidkiy, B. A. Sokunov, I. A. Uskov, **I. A. Smolyanov** // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRusNW 2016. – 2016. – P. 685–688. – (0,18 п. л. / 0,05 п. л.; Scopus, WoS).

*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 \_\_\_\_\_