

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Кижяев Иван Владимирович

**ИНДУКЦИОННЫЙ МГД-НАСОС ДЛЯ ПЕРЕКАЧИВАНИЯ
РАСПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ И СПЛАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ**

2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор, Тимофеев В. Н.

Красноярск - 2023

Оглавление

Введение.....	4
1. Типы устройств МГД-насосов.....	9
1.1 Общие замечания и определения.....	9
1.2 Кондукционные МГД-насосы для транспортировки жидких металлов	11
1.3 Индукционные МГД-насосы для транспортировки жидких металлов	16
1.4 Особенности работы МГД-насосов в металлургии.....	23
1.4 Математические модели МГД-насосов для транспортировки жидких металлов	25
1.4.1 Аналитические математические модели.....	25
1.4.2 Численные математические модели.....	30
1.5 Постановка задачи исследования и разработки МГД-насоса.....	32
1.6 Выводы по разделу.....	33
2. Математическое моделирование электромагнитных процессов в системе «плоский линейный индукционный МГД-насос – рабочее тело» аналитическим методом	35
2.1 Расчетная аналитическая модель МГД-насоса и принятые допущения	35
2.1 Математическая модель линейной индукционной машины	36
2.3 Решение дифференциальных уравнений	38
2.4 Интегральные и дифференциальные характеристики линейной индукционной машины.....	42
2.5 Определение размеров и параметров схемы замещения индуктора МГД-насоса	44
2.6 Результаты расчета электромагнитной задачи.....	47

2.7	Верификация аналитических выражений с помощью численной математической модели.....	50
2.8	Выводы по разделу.....	53
3.	Математическое моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов в МГД-насосе численным методом	54
3.1	Постановка задачи и основные допущения.....	54
3.2	Расчетные модели МГД-насоса	57
3.3	Математическая модель термогидродинамических процессов и решение гидродинамической задачи	61
3.3	Математическое моделирование электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в системе «МГД-насос – канальная часть».....	66
3.4	Выводы по разделу.....	78
4.	Экспериментальные исследования на физической модели МГД-насоса.....	79
4.1	Физическая модель МГД-насоса	79
4.2	Исследование гидродинамических и тепловых процессов в экспериментальной установке и их сравнение с результатами математического моделирования.....	87
4.3.	Моделирование подъема жидкого металла с помощью МГД-насоса	91
4.4	Моделирование рабочего процесса транспортировки жидкого металла из миксера в печь переплава	94
4.5	Выводы по разделу.....	95
	Заключение	97
	Список использованных источников	98

Введение

Магнитогидродинамические (МГД) устройства, принцип действия которых основан на взаимодействии жидких металлов с магнитным полем, для транспортировки жидких металлов получили широкое распространение благодаря развитию атомной промышленности. Еще в 50-х годах прошлого века работы по созданию электромагнитных насосов для перекачивания жидких металлов начались как в нашей стране, так и за рубежом в связи с развитием реакторов на быстрых нейтронах, где МГД-насосы являются элементами, перекачивающими жидкие теплоносители.

С появлением необходимости транспортировки жидких металлов МГД-насосы стали внедрять в металлургическую промышленность. На предприятиях с плавильно-литейным производством металлических сплавов существует необходимость перекачивания жидкого металла из печи переплава в миксер. Для решения проблем, связанных с невозможностью транспортировки самотёком и сокращения серьезных тепловых потерь, стали применять МГД-насосы, которые позволяют более плавно осуществлять регулирование подачи жидкого металла в металлотрактах и, в целом, ускорить выполнение технологического процесса.

Существенный вклад в создание МГД устройств металлургического назначения сделали отечественные ученые Кирко И. М., Вольдек А. И., Гельфгат Ю. М., Верте Л. А., Сарапулов Ф. Н., Тимофеев В. Н., Фризен В. Э. Среди зарубежных ученых следует отметить авторов Jakovics A., Вааке Е., Nаске В., Luri S., Barglik J., а также работы из Латвийского университета (Латвия), Падуанского университета (Италия), университета Гринвича (Англия) и др. В Сибирском федеральном университете с 80-х годов двадцатого века существует научная школа по разработке и применению в промышленности МГД устройств для плавильно-литейного производства алюминиевых сплавов. Широкое применение на алюминиевых заводах получили МГД-перемешиватели алюминиевых расплавов в печах и миксерах производства ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г.

Красноярск). Вместе с тем отсутствуют разработки и промышленное внедрение МГД-насосов для транспортировки алюминиевых сплавов.

Главной особенностью и отличием МГД-насосов металлургического назначения от применяемых в атомной промышленности является работа с высокотемпературными и агрессивными металлами. Теплоносители на атомных станциях представляют собой низкотемпературные жидкие металлы такие как висмут (Bi, $T_{пл} = 271 \text{ }^{\circ}\text{C}$), свинец (Pb, $T_{пл} = 327 \text{ }^{\circ}\text{C}$), натрий (Na, $T_{пл} = 98 \text{ }^{\circ}\text{C}$), сплавы на его основе (Na-K, $T_{пл} = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и др. Достаточно низкие температуры и неагрессивная среда позволяют использовать для транспортировки данных металлов желоба из специальной стали.

В металлургии приходится работать с металлами, температура которых может достигать $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. Примером является алюминий (Al, $T_{пл} = 660 \text{ }^{\circ}\text{C}$), однако с применением легирующих материалов температура сплава на его основе значительно повышается, соответственно меняются и требования к МГД-насосам для транспортировки алюминия. Так как алюминий является химически активным материалом использование тонких стальных желобов не представляется возможным. Из-за высоких температур зазор между индуктором МГД-насоса и расплавом в канальной части будет достаточно большим, что принуждает к увеличению МДС за счет увеличения количества витков и повышения линейной токовой нагрузки. Данные факторы приводят к большему нагреву обмоток и соответствующему преждевременному выходу устройства из строя. Перегрев также влияет на сердечник индуктора МГД-насоса, а именно может привести к потере его магнитных свойств, что также негативно влияет на его работу.

Решение проблем по внедрению МГД-насосов в плавильно-литейное производство алюминиевых сплавов, а также вопросов, касаемых увеличения производительности и долговечности МГД-насосов и по сей день остается актуальной задачей.

В настоящее время широко используются аналитические и численные методы математического моделирования. Аналитические модели позволяют быстро выбрать геометрические размеры и провести экспресс-анализ

характеристик проектируемого устройства. Численные методы позволяют моделировать физические процессы в двухмерной и трехмерной постановках с минимальными допущениями.

В последнее время повысился интерес к промышленному использованию МГД-насосов в металлургии. В этой связи математическое моделирование и разработка МГД-насоса для перекачивания алюминиевых расплавов являются актуальными задачами.

Объект исследования. плоский линейный индукционный МГД-насос для транспортировки алюминиевых расплавов.

Предмет исследования. Электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы, протекающие в системе «индуктор МГД-насоса – канал с жидким металлом», в процессе транспортировки жидкого металла.

Целью работы является разработка теоретической и методологической основы для проектирования МГД-насосов металлургического назначения.

Задачи:

1. Анализ существующих конструкций МГД-насосов и их математических моделей, с обоснованием выбора конструктивных параметров, обеспечивающих высокую надежность вместе с эксплуатационными свойствами.

2. Создание аналитической модели для определения геометрических размеров, параметров схемы замещения и анализа электромагнитных характеристик.

3. Создание параметрической численной математической модели индукционного МГД-насоса и алгоритмов расчета с последующим математическим моделированием гидродинамических и тепловых процессов.

4. Изготовление физической модели системы транспортировки жидкого металла из плавильной печи в миксер для последующей верификации математических моделей путем сравнения результатов математического моделирования с данными натурального эксперимента на физической модели.

Методы исследования. В ходе выполнения работы применялись:

1. Математическое моделирование аналитическим методом с использованием интегральных преобразований Фурье и применением программного продукта Mathcad.

2. Математическое моделирование, основанное на методе конечных элементов (МКЭ), для исследования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в МГД-насосе с использованием программных продуктов ANSYS Multiphysics и SolidWorks.

3. Экспериментальные исследования скоростей низкотемпературного расплава с помощью ультразвукового датчика скорости на физической модели МГД-насоса.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработанная аналитическая модель, позволяющая учитывать дискретность распределения токовой нагрузки, несимметрию сопротивления фаз и влияние продольного краевого эффекта на работу МГД-насоса.

2. Созданные численные параметрические сопряженные модели, позволяющие в автоматизированном формате произвести расчет электромагнитных и термогидродинамических процессов в системе «канал-индуктор МГД-насоса».

3. Полученные зависимости интегральных и дифференциальных электромагнитных характеристик, и распределения температурных и скоростных полей в МГД-насосе с учетом перепада высот между плавильной печью и миксером.

Практическая ценность:

1. Разработаны алгоритмы и программы автоматизированного моделирования и расчета электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в МГД-насосе при перекачивании расплава алюминия с учетом перепада высот.

2. На основании расчетных и экспериментальных данных сформулированы рекомендации по проектированию индукционного МГД-насоса для транспортировки расплава алюминия из плавильной печи в миксер.

3. Спроектирована, изготовлена и введена в эксплуатацию в лаборатории математического и физического моделирования МГД-процессов в металлургии Сибирского федерального университета физическая модель перелива расплава из плавильной печи в миксер по транспортировочному желобу с индукционным МГД-насосом, предназначенная для научных исследований и учебных занятий.

Достоверность полученных результатов подтверждена приемлемым совпадением результатов математического моделирования с результатами экспериментов на физической модели.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы: использованы техническими специалистами ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» при исследовании возможности использования МГД-насоса для транспортировки алюминиевых расплавов; реализованы в рамках создания действующей лабораторной установки для выполнения экспериментальных исследований в учебном процессе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Верифицированные математические модели, разработанные с помощью интегральных преобразований на основе рядов Фурье, и основанные на методе конечных элементов и объемов для моделирования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов.

2. Алгоритмы для расчета связанных задач в программных комплексах ANSYS и SolidWorks с возможностью автоматизированной настройки модели с помощью кода.

3. Оценка результатов математического и физического моделирования для выдачи рекомендаций по проектированию промышленного образца МГД-насоса для транспортировки алюминия и сплавов на его основе.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международной конференции студентов и аспирантов «Перспектив Свободный 2018» (г. Красноярск, 23-27 апреля 2018 г.); всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 3-7 декабря 2018 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 7 статьях, докладах, сборниках научных трудов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 разделов с выводами по каждому из них, заключения, списка использованных источников из 90 наименований. Диссертация изложена на 106 страницах, содержит 7 таблиц и 57 рисунков.

1. Типы МГД-устройств

1.1 Общие замечания и определения

Зачастую МГД-устройства применяются в литейном производстве в качестве интенсификаторов. Для улучшения перемешивания расплава с солями, с целью удаления щелочных и щелочноземельных металлов, могут быть использованы МГД-перемешиватели [1-6]. Помимо ускорения процесса рафинирования, МГД-перемешиватели позволяют выравнивать химический состав и температуру расплава в раздаточных миксерах. Литье слитков с применением МГД-перемешивания позволяет добиться усиления физико-механических свойств итогового продукта [7-9].

Для транспортировки и дозирования жидких металлов и проводящих жидкостей в настоящее время широко применяются различные типы магнитогидродинамических МГД-насосов [10-12]. В атомных установках [13], в металлургии и химическом производстве такие насосы имеют неоспоримые преимущества перед обычными механическими, так как они обеспечивают полную герметичность, удобство при встраивании в технологическую схему, простоту обслуживания при эксплуатации, легкую возможность регулирования параметров напора и расхода.

По принципу действия эти насосы полностью аналогичны традиционным электрическим машинам за исключением конструкции и наличия магнитогидродинамических эффектов [14].

Механические силы, приводящие жидкие металлы в движение возникают за счет взаимодействия электрического тока, протекающего в жидком металле, с магнитным полем. Эта сила называется силой Лоренца, и ее направление определяется правилом левой руки и она численно равна векторному произведению векторов плотности тока \vec{J} и магнитной индукции \vec{B} [15].

В МГД-насосах, предназначенных для перекачивания жидкого металла из одной емкости в другую, электромагнитные силы в рабочей зоне замкнутого канала создают электромагнитное давление. Такие МГД-устройства называются напорными. Обычно в насосах длина рабочей зоны намного меньше длины канала, по которому транспортируется жидкий металл. МГД-насосы, как и обычные электрические машины, являются обратимыми и могут работать в режимах двигателя (насоса), генератора и тормоза. В режиме насоса электромагнитное давление или разность давлений по концам рабочей зоны, преодолевая гидравлическое сопротивление металлотракта приводит металл в движение. В этом случае подводимая к рабочей зоне электромагнитная энергия преобразуется в механическую энергию движущегося жидкого металла. Производительность насоса определяется расходом жидкого металла в единицу времени, который равен произведению сечения канала на среднюю скорость металла в этом сечении.

Если жидкий металл в канале приводить в движение силами неэлектрического происхождения, например, силами тяжести, то возможны генераторный и тормозной режимы работы МГД-насоса. В первом случае электромагнитная система рабочей зоны выдает электрическую энергию. Во втором случае электромагнитная система формирует в рабочей зоне электромагнитные силы, направленные против движения металла. В рабочей зоне создается противодействие, препятствующее или полностью прекращающее движение жидкого металла в канале. В таком режиме работает МГД-насос-дозатор, осуществляющий автоматическое регулирование скоростью подачи расплава из раздаточного миксера. Когда уровень расплава в миксере большой, то МГД-устройство работает в режиме тормоза. Когда уровень расплава в миксере становится мал и силы тяжести не в состоянии обеспечивать расход расплава в

желобах, необходимый для работы литейной машины с заданной производительностью, МГД-устройство работает в режиме насоса. Электрический ток может подводиться к жидкому металлу извне контактным способом или возбуждаться в металле бесконтактным способом с помощью переменного электромагнитного поля.

Описание электромагнитных процессов и развитие теории о магнитогидродинамических устройствах приведено во множестве работ отечественных и зарубежных авторов. В них отражены как классические машины с разомкнутым магнитопроводом [16-19], так и специализированные решения [20-22], а также индуктора для металлургии [23, 24].

1.2 Кондукционные МГД-насосы для транспортировки жидких металлов

Кондукционные насосы могут быть как постоянного, так и переменного тока. В кондукционных насосах постоянного тока силы, вызывающие движение жидкости, возникают вследствие взаимодействия магнитного поля и токов, подведенных к жидкости контактным способом.

Принципиальная схема кондукционного насоса постоянного тока показана на рис. 1.1 [25].

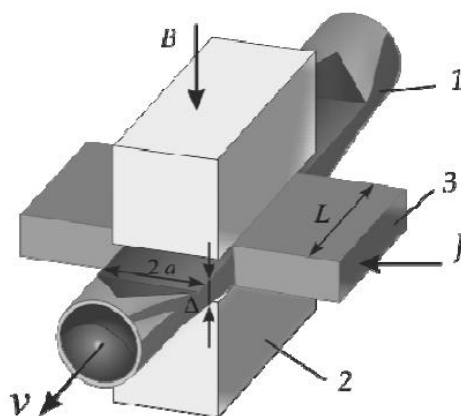


Рисунок 1.1 – Устройство кондукционного МГД-насоса постоянного тока

Между полюсами электромагнита 2 расположен канал с жидким металлом 1, к боковым граням которого приварены электроды 3. От внешнего источника к электродам подводится ток I , который протекает через жидкий металл между полюсами электромагнита [26].

Канал с жидким металлом 1, токопроводящие электроды 3 и магнитные полюсы 2 расположены таким образом, чтобы направление векторов магнитной индукции, плотности тока в жидком металле и скорости движения металла u были взаимно перпендикулярными. В этом случае направление электромагнитной силы, по правилу левой руки, совпадает с осью канала. В общем случае, величина и направление электромагнитной силы определяются векторным произведением.

$$\overline{f_{em}} = \overline{J} \times \overline{B}, \quad (1.1)$$

Где \overline{J} – вектор линейной плотности тока, A/m ; \overline{B} – вектор магнитной индукции, $Tл$.

В кондукционных МГД-насосах рабочая зона является местом пересечения независимых электрической - 2 и магнитной цепей – 1 (рисунок 1.2). Поэтому в рабочей зоне таких устройств можно получить относительно большие значения плотности тока и магнитной индукции.

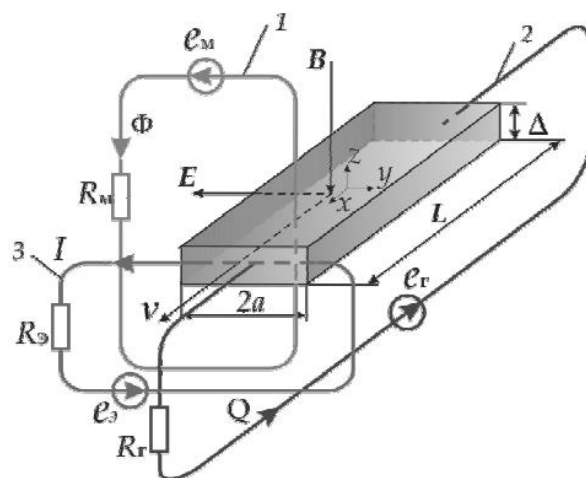


Рисунок 1.2 – МГД-канал – пересечение магнитной (1), гидравлической (2) и электрической цепей (3)

Кондукционный МГД-насос позволяет плавно управлять величиной электромагнитной силы в активной зоне и величиной расхода в канале. Если в гидравлической цепи имеется внешняя гидродвижущая сила (сила тяжести, перепад давления, механический насос), то кондукционная МГД-машина может работать в режимах двигателя, тормоза и генератора. В кондукционных насосах обмотка электромагнита обычно соединяется последовательно с электродами.

Недостатком данного насоса является наличие переходного электрического сопротивления от стенок канала к перекачиваемому металлу, что приводит к перегреву стенок и электродов в точке их подсоединения к каналу и уменьшению срока службы канала.

Как отмечалось ранее кондукционные насосы могут работать на переменном токе. Предложенная в 1962 г. Полищуком В. П. модель кондукционного МГД-насоса трансформаторного типа (рисунок 1.3) имеет разветвленную магнитную цепь [27]. В первой системе на магнитопроводе 3 расположены первичная обмотка 4 со значительным числом витков, вторичная обмотка представляет собой замкнутый виток жидкого металла.

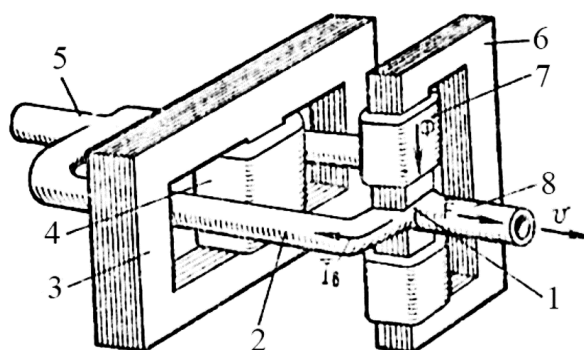


Рисунок 1.3 – Схема магнитодинамического насоса: 1 — канал с жидким металлом; 2 – кольцевой трубопровод; 3, 4 – магнитопровод и катушка системы «индуктор-виток жидкого металла»; 5 – подводный трубопровод; 6, 7 – магнитопровод и катушка системы магнитной системы; 8 – отводящий трубопровод.

Подведенный к катушке 4 переменный ток создает в магнитопроводе 3 переменный магнитный поток, который индуцирует в жидком металле 2 кольцевой ток I_6 . Вторая система, представляющая собой электромагнит с магнитопроводом 6 и катушками 7, создает переменный магнитный поток Φ , который взаимодействуя с I_6 в канале 2 приводит в движение жидкий металл.

Данная конструкция МГД-устройства может использоваться в режиме транспортировки металла (режим насоса) или сдерживания внешнего напора (режим тормоза). К основным преимуществам данных МГД-устройств можно отнести более высокий термический и гидродинамический КПД благодаря эффективной передаче энергии в жидкий металл с замкнутой магнитной системой.

Дополнительно рассмотрим такие конструктивные типы кондукционных МГД-насосов, как цилиндрические и винтовые. Конструкция цилиндрического линейного кондукционного МГД-насоса представлена на рисунке 1.4. Устройство [28] схоже с цилиндрическим индукционным МГД-насосом.

Оно позволяет снизить энергозатраты и упростить процесс регулирования расхода перекачиваемой электропроводной жидкости. Это достигается тем, что цилиндрический линейный кондукционный насос содержит обечайку 1 и внутренний цилиндрический сердечник 2, образующие кольцевой канал. Причем цилиндрический сердечник 2 и внутренняя поверхность обечайки 1 имеют химически инертную термостойкую изолирующую оболочку. На концах плоской пластины 6 в зонах полюсов цилиндрического сердечника с противоположных сторон попарно установлены плоские электроды 7, 8. Первая пара плоских электродов 7 подключена к соответствующим выходам первого регулируемого источника постоянного напряжения 4, вторая пара плоских электродов 8 подключена к соответствующим выходам второго регулируемого источника постоянного напряжения 5, а входы первого 4 и второго регулируемых источников постоянного напряжения 5 соединены с соответствующими выходами задающего блока 3.

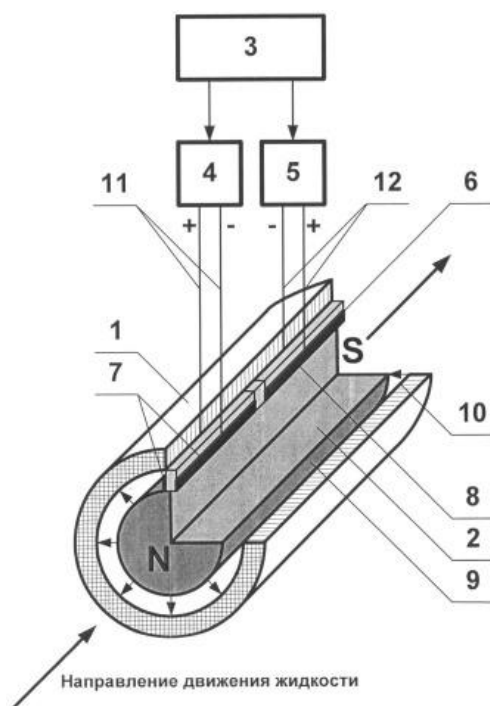


Рисунок 1.4 – Схема конструкции цилиндрического линейного кондукционного насоса: 1 – обечайка; 2 – цилиндрический сердечник; 3 – задающий блок; 4 – первый регулируемый источник постоянного напряжения; 5 – второй регулируемый источник постоянного напряжения; 6 – плоская изолирующая пластина; 7 – первая пара плоских электродов; 8 – вторая пара плоских электродов

Следующим конструктивным типом рассмотрим винтовой кондукционный МГД-насос [29]. Данное устройство (рисунок 1.5) может работать как на постоянном токе, так и на переменном при условии совпадения фаз тока в обмотке соленоида и в жидкости. При этом магнитная система при работе на постоянном токе может быть выполнена с применением постоянных магнитов. Для исключения шунтирования магнитного потока наружная и внутренняя стенки канала могут быть выполнены немагнитными.

Главным недостатком кондукционных насосов постоянного тока является непосредственное контактирование электродов с жидким металлом, являющимся агрессивной средой, что является причиной их перегрева и коррозии. Применение цилиндрических и винтовых типов насосов ограничено, в связи с наличием в них

внутренних сердечников. Из-за высоких температур транспортируемых сплавов данные детали насоса будут подвержены перенасыщению, что приведет к снижению эффективности перекачивания.

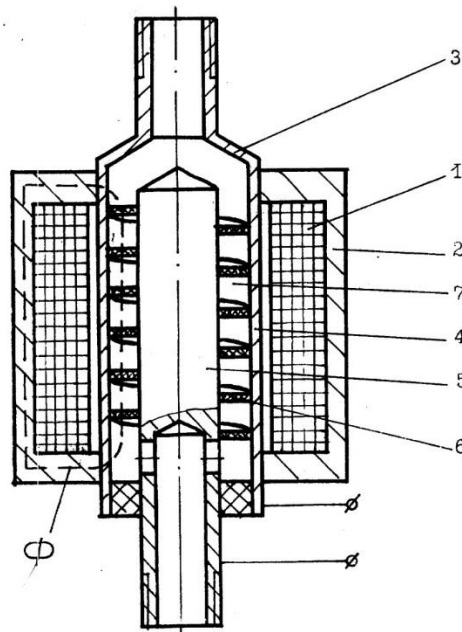


Рисунок 1.5 – Схема конструкции винтового кондукционного насоса: 1 – обмотка; 2 – ферромагнитный экран; 3 – сквозной канал; 4 – коаксиальные стенки; 5 – внутренний сердечник 6 – винтовая перегородка

Основное положительное свойство кондукционных устройств – возможность получения больших плотностей электродинамических сил, действующих на проводящую среду, в связи с этим кондукционные устройства имеют меньшие размеры по сравнению с индукционными такой же мощности [30].

1.3 Индукционные МГД-насосы для транспортировки жидких металлов

Принцип действия индукционных МГД-насосов аналогичен асинхронным электрическим машинам. В этих устройствах электрические токи в рабочей зоне канала индуктируются бегущим магнитным полем, электрическая связь между

расплавом и внешней электрической цепью отсутствуют и стенки каналов могут быть неэлектропроводящими.

Плоские индукторы могут иметь два ферромагнитных сердечника (рис. 1.6), расположенных по обе стороны прямоугольного канала, или один сердечник, расположенный с одной стороны канала [31]. В пазах сердечников 1 расположена трехфазная или двухфазная обмотка 2, аналогичная обмоткам нормальных асинхронных машин. Многофазная обмотка, питаемая сдвинутыми по фазе токами, создает бегущее магнитное поле. Такие индукторы являются неподвижными относительно рабочей зоны канала 3. Бегущее магнитное поле можно также получить движущимися вблизи рабочей зоны постоянными магнитами [32, 33]

Однако в плоских линейных индукционных МГД-машинах проявляются краевые эффекты: продольный (ввиду конечной длины индукторов); поперечный (ввиду конечной ширины насоса); толщинный (неравномерность распределения электромагнитных сил по направлению вектора магнитной индукции).

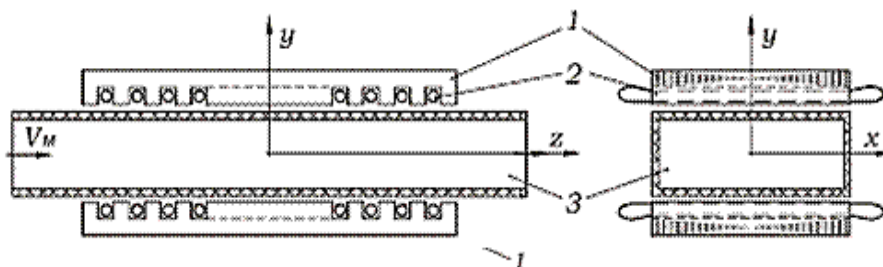


Рисунок 1.6 – Эскиз плоского двустороннего линейного насоса: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – канал с металлом

Индукционные насосы имеют аналогичные кондукционным конструкции: плоские, цилиндрические и винтовые. Плоские обычно выполняются с двусторонним расположением индукторов относительно плоского слоя жидкого металла (рис. 1.7), заключенного в канале огнеупорной трубы [34]. Для уменьшения расстояния между индукторами (немагнитного зазора), от которого сильно зависят электрические показатели индуктора, труба имеет сплюсненную

форму, с каналом сильно вытянутого сечения. Металл, заполняющий канал, представляет собой жидкую проводящую полосу, находящуюся в бегущем магнитном поле.

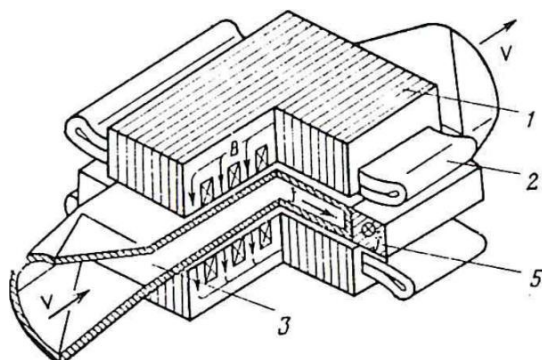


Рисунок 1.7 – Схема конструкции плоского линейного индукционного насоса: 1 – концентратор; 2 – обмотка; 3 – канал; 4 – внутренний сердечник; 5 – коротко-замыкающая шина

За время развития плоских линейных МГД-насосов были предложены различные конструкции обмоток. Некоторые из них представлены на рисунках 1.6-1.8. Они применяются при определенных условиях и имеют свои достоинства и недостатки. Основным недостатком явнополюсной обмотки (рис. 1.8 - а) является низкий обмоточный коэффициент и развитие слабого усилия в жидком металле. Достоинство данной конструкции заключается в самом низком размере лобовых частей индуктора.

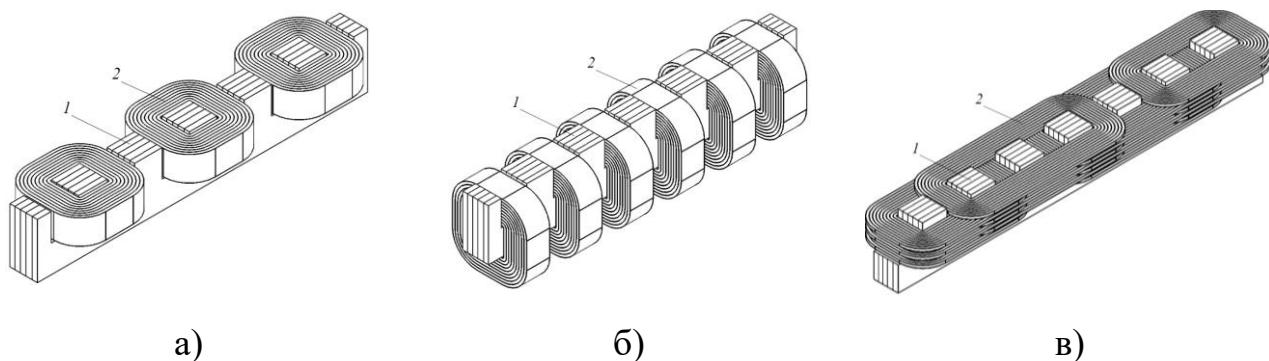


Рисунок 1.8 – Эскиз плоского МГД-насоса с: а – намоткой на зубец; б – намоткой на ярмо; в – с перекрещивающимися обмотками
1 – магнитопровод; 2 - обмотка

В намотке на ярмо (рис. 1.8 - б) магнитное поле используется неэффективно, так как основная часть идет на создание полей рассеяния. Также данной конструкции присущи повышенный расход обмоточного провода и низкий коэффициент мощности. Применение данного типа обмотки крайне ограничено и используется в случаях, когда иной выполнить не представляется возможным. Обе вышеописанные конструкции хоть и просты в изготовлении и эксплуатации, однако с охлаждением обмоток возникают определенные трудности. Так, например, использование активного воздушного охлаждения не даст оптимальных результатов, ввиду плотного прилегания слоев друг к другу и отсутствия воздушных промежутков между ними.

Недостатком конструкции с перекрещивающимися обмотками (рис. 1.8 - в) является сравнительно низкий коэффициент заполнения пазов. Однако в вопросе охлаждения этот недостаток оказывается достоинством. В целом, применение перекрещивающейся обмотки индуктора является наиболее оправданным решением, с точки зрения достижения максимально возможной энергии движения расплава при минимальных общих энергозатратах, что аналогично классическим асинхронным двигателям, большинство статоров которых основано на использовании именно перекрещивающейся обмотки.

Дополнительно можно отметить МГД-насосы с поперечным магнитным потоком. Плоский линейный индукционный МГД-насос представляет собой МГД-устройство с продольным магнитным потоком, где магнитный поток замыкается в плоскости направления движения поля (рисунок 1.9 - а). В МГД-насосах с поперечным магнитным потоком магнитное поле, в основном, замыкается в перпендикулярной плоскости данного направления (рисунок 1.9 - б). Данные устройства состоят из ряда параллельно расположенных П-образных концентраторов (рисунок 1.10). На зубцах находятся обмотки, включенные в противофазу, для того чтобы магнитный поток выходил из одного зубца отдельного концентратора в противоположный. При этом обмотки следующих секций имеют фазовый сдвиг для формирования бегущего магнитного поля.

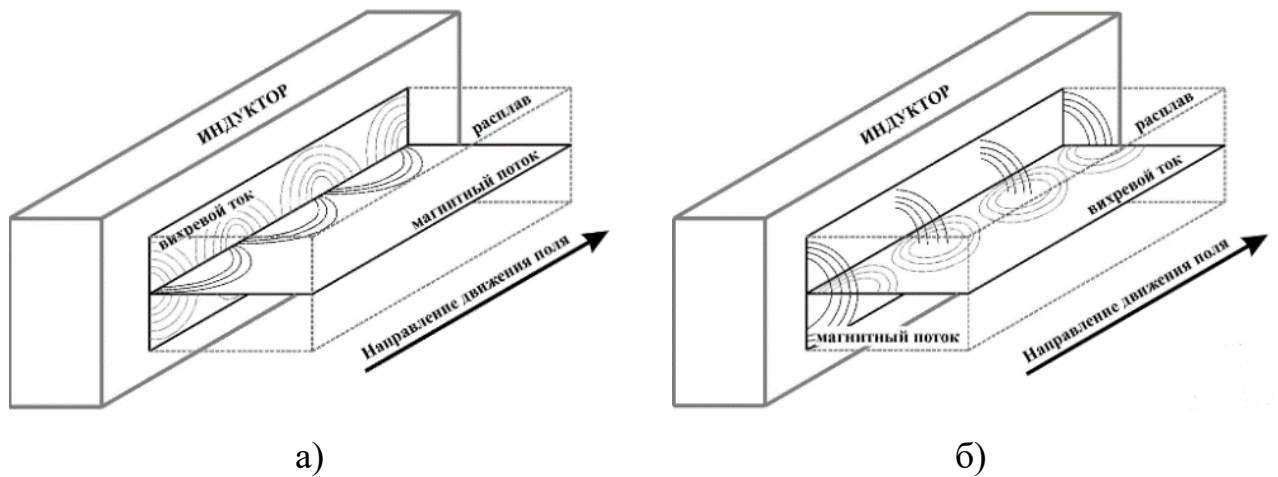


Рисунок 1.9 – Принципы замыкания магнитных полей МГД-насосов с: а – продольным магнитным потоком; б – с поперечным магнитным потоком

К достоинствам данного типа МГД-насосов можно отнести модульность конструкции, что позволяет обслуживать и ремонтировать МГД-насос без необходимости демонтажа всей конструкции. Однако применение данных машин оправдано только в случаях, когда невозможно по технологическим или конструктивным причинам использовать МГД-насосы с продольным магнитным потоком.

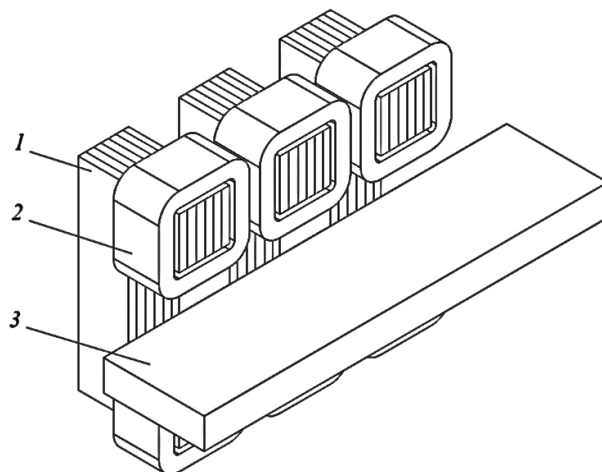


Рисунок 1.10 – Конструкция МГД-насоса с поперечным магнитным потоком: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – канальная часть

Цилиндрический линейный индукционный насос (рис. 1.11) отличается тем, что в нем жидкий металл находится в поле индуктора в виде цилиндрического слоя с кольцевым поперечным сечением. Такая форма слоя получается при использовании в качестве канала для жидкого металла кольцевого пространства между двумя концентрическими трубами.

Бегущее магнитное поле создается системой кольцевых катушек, надетых на наружную трубу и поочередно (по длине насоса) присоединенных к различным фазам трехфазной сети. Магнитное поле должно пронизывать кольцевой зазор, занятый жидким металлом, в радиальном направлении. Для этого внутри внутренней трубы обычно помещается железный сердечник, а вдоль наружной трубы укладываются шихтованные магнитопроводы с пазами, в которые входят катушки обмотки. В поперечном сечении магнитная система цилиндрического линейного индукционного насоса имеет вид многолучевой звезды.

В цилиндрическом линейном индукционном насосе отсутствуют как неактивные участки в контурах индукционных токов в жидком металле, так и лобовые части обмоток, соответственно отсутствует и проявление поперечного краевого эффекта [35].

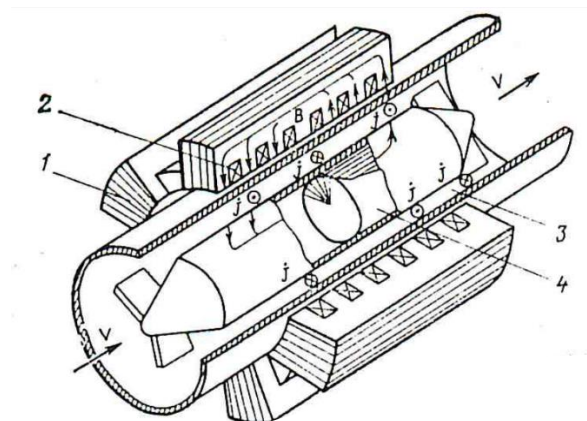


Рисунок 1.11 - Схема конструкции цилиндрического линейного индукционного насоса: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – канал; 4 – внутренний сердечник

Цилиндрические линейные индукционные насосы имеют лучшие энергетические показатели, что связано, однако, со значительным усложнением конструкции. Конструктивным и технологическим преимуществом цилиндрического линейного индукционного насоса является то, что в нем огнеупорная труба имеет круглое сечение. В случае металлических труб это позволяет допускать значительно большие давления, чем в плоских трубах. Круглые керамические трубы можно изготовлять большей длины, чем плоские, без соединений внутри насоса, так как заготовки круглых труб меньше коробятся при обжиге.

МГД-машины с винтовыми каналами (рисунок 1.12) имеют обмотку по типу статора асинхронной машины, создающую вращающееся магнитное поле, и канал, обеспечивающий винтообразное движение жидкого металла. Замкнутость магнитной системы с обмоткой исключает продольный краевой эффект, связанный с их разомкнутостью в линейных системах. Влияние входа металла в магнитное поле и выхода из него на интегральные характеристики невелико в связи с малым отношением ширины элементарного канала к длине взаимодействия $2p_n \tau n$, где n — число элементарных каналов. Это обстоятельство существенно упрощает расчет винтовых МГД-машин.

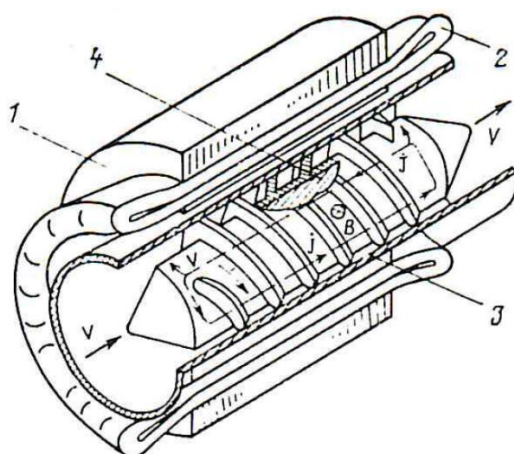


Рисунок 1.12 - Схема конструкции винтового линейного индукционного насоса: 1 – концентратор; 2 – обмотка; 3 – канал; 4 – внутренний сердечник

Однако, в цилиндрических МГД-насосах для перекачивания жидких металлов с температурой выше точки Кюри (~ 760 °С) необходимо охлаждать внутренний сердечник, что связано со значительными конструктивными трудностями. Это существенно ограничивает перспективы применения цилиндрических линейных насосов в металлургическом и литейном производстве.

1.4 Особенности работы МГД-насосов в металлургии

Как отмечалось выше, работа МГД-насосов в металлургической отрасли проходит в тяжелых тепловых условиях, температура транспортируемых расплавов достигает более 700 °С, в связи с этим, из-за наличия теплоизоляционных материалов, возникают большие зазоры между индукторами МГД-насосов и рабочим телом. Соответственно для проведения технологического процесса транспортировки металла в канале необходимо задаваться большей линейной токовой нагрузкой, что приводит к чрезмерному перегреву катушек этих устройств.

Для значительных величин плотностей тока, применяется водяное охлаждение самих обмоток. Для этого используются специальные трубчатые обмотки с полостью внутри, в которой происходит циркуляция воды, которая отводит тепло. Однако данный метод является опасным, так как нарушение герметичности таких обмоток ведет к высвобождению воды и последующему контактированию ее с жидкими металлами, что, в конечном итоге, приводит к авариям.

Поэтому, зачастую, прибегают к использованию активного воздушного охлаждения, что нивелирует высокую опасность применения водяного охлаждения. Активное воздушное охлаждение производится с помощью мощных промышленных вентиляционных устройств, позволяющих отвести достаточное количество тепла от обмоточных секций, в которых предусмотрены воздушные зазоры.

Так как плоские линейные индукционные насосы представляют собой индуктора с разомкнутым магнитопроводом, помимо бегущего магнитного поля они создают в активной зоне пульсирующие магнитные поля. Эти пульсирующие поля индуктируют в жидком металле токи, приводящие к дополнительным потерям мощности, а также увеличивающие несимметричную нагрузку фаз. Для компенсации данных эффектов Тимофеевым В. Н. был предложен индуктор линейной индукционной машины [36]. Устройство представляет собой разомкнутый магнитопровод с обмоткой, катушки которой размещены в разных параллельных плоскостях, при этом пазы, в которых расположены проводники катушки одной фазы, чередуются с пазами, в которых расположены проводники катушки другой фазы (рисунок 1.13 - б). За счет чередования секций, состоящих из двух слоев катушек, удастся получить улучшенные энергетические показатели за счет снижения влияния пульсирующего потока и различия индуктивных сопротивлений.

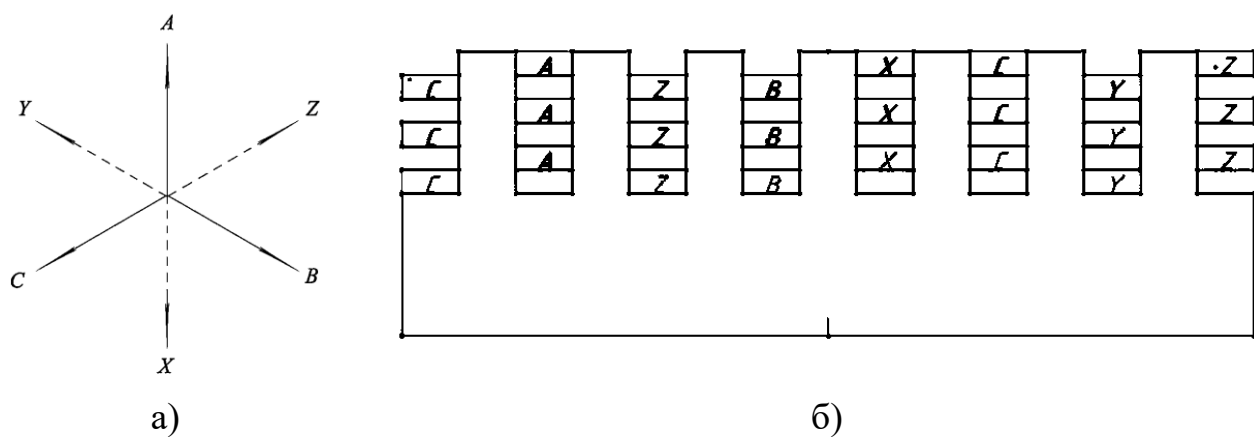


Рисунок 1.13 – Векторная диаграмма токов (а) и расположение проводников фаз в сердечнике индуктора (б)

Данное устройство использовалось для описания электромагнитных процессов в МГД-перемешивателях расплава в печи/миксере с односторонним индуктором, и не использовалось для анализа электромагнитных характеристик

МГД-насосов для транспортировки жидких металлов, что представляет большой интерес.

1.4 Математические модели МГД-насосов для транспортировки жидких металлов

1.4.1 Аналитические математические модели

Описанные выше конструкционные типы МГД-насосов имеют различное математическое описание протекающих в них процессов [37, 38]. Каждые из них имеют различия в сложности вычислений и используемых допущений [39-41], но все они основаны на решении задачи электромагнитного поля при значительном упрощении гидродинамической части. В аналитических моделях жидкий металл представляется как твердое однородное изотропное тело, движущееся относительно системы координат с постоянной скоростью. Это приводит к тому, что появляется возможность выполнить расчет электромагнитных характеристик МГД-насоса, число витков, параметры схемы замещения, а также определить геометрические размеры индуктора, но отсекается моделирование магнитогидродинамических процессов, так как на сегодняшний день нет аналитического решения уравнения Навье-Стокса. Существуют лишь решения частных случаев данного уравнения, например, уравнение Бернулли или Гартмана для одномерных случаев ламинарного потока жидкости с магнитным полем и без него соответственно [42, 43].

МГД-насосы, используемые для перекачки низкотемпературных теплоносителей в атомных реакторах имеют небольшой магнитный зазор между индукторами. В таких машинах слабо проявляется так называемый толщинный краевой эффект. Это обстоятельство позволяет предположить, что магнитная индукция в зазоре имеет только одну составляющую – нормальную к поверхности индукторов. На этом построена одномерная теория линейных индукционных

машин Вольдека А. И. [44, 45]. На рисунке 1.14 представлена расчетная одномерная модель линейной индукционной машины.

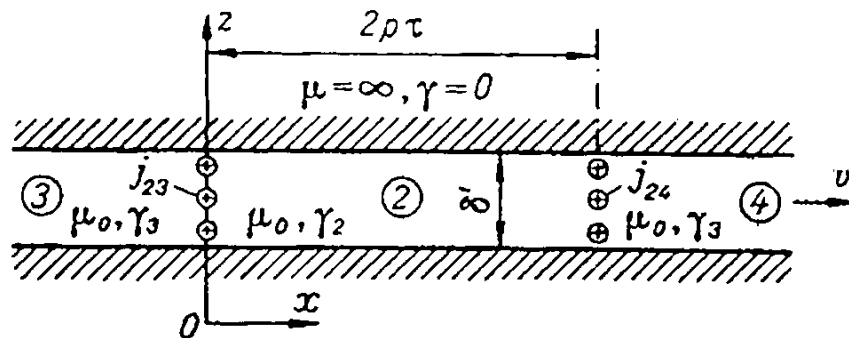


Рисунок 1.14 – Упрощенная модель плоской линейно машины

В одномерной модели приняты следующие основные допущения:

1. Ферромагнитные сердечники с $\mu_c = \infty$ и $\gamma_c = 0$ простираются по направлению оси x в обе стороны до бесконечности;
2. Ширина машины в направлении оси y бесконечно велика;
3. Сердечники лишены пазов, а их влияние учитывается увеличением зазора от величины δ до величины $\delta' = k_\mu k_\delta \delta$.
4. Первичная обмотка создает чисто синусоидально бегущую волну тока и первичных ток равномерно распределен по всему зазору шириной δ' , то есть не зависит от координаты z .

При принятых предположениях векторы потенциал \bar{A} , напряженность электрического поля \bar{E} , плотности тока \bar{j} и вектор магнитной индукции \bar{B} имеют компоненты:

$$\bar{A} = \bar{e}_y A_y; \bar{E} = \bar{e}_y E_y; \bar{j} = \bar{e}_y j_y; \bar{B} = \bar{e}_z B_z, \quad (1.2)$$

где \bar{e}_y и \bar{e}_z – единичные вектора в прямоугольной системе координат.

В работе получены простые аналитические выражения для дифференциальных и интегральных характеристик линейных индукционных машин. Показано, что в зазоре линейных индукционных машин присутствуют два

типа электромагнитного поля. Обыкновенные синусоидальное бегущее поле, которое существует в асинхронной машине с замкнутым магнитопроводом и поля продольного краевого эффекта, обусловленные конечной длиной индуктора (наличием входа и выхода у индуктора). Два поля краевого эффекта, движущиеся в сторону движения вторичной части (жидкого металла) называются прямыми. Другие два движутся в обратном направлении и соответственно называются обратными. Каждое поле затухает в направлении своего движения, причем прямые поля затухают медленнее.

Представленные в данной работе модели и подходы заложили основу большинства инженерных расчетов [46-48]. Развитие теории Вольдека А. И. было продолжено в работах Охременко Н. М. [49] и других авторов.

Несмотря на достоинства одномерной теории она не может быть применена к анализу электромагнитного поля МГД-насосов металлургического назначения. Транспортировка высокотемпературного металла (например алюминиевого расплава $T_{пл} > 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$) требует использования толстой теплоизоляции в транспортировочном канале, что увеличивает немагнитный зазор МГД-насоса.

Для исследования данных машин необходимо использовать, как минимум, двумерные расчетные модели, предложенные Огарковым Е. М., Соловьевым Г. И., Yamamura S., Тимофеевым В. Н. и другими. В них принимаются аналогичные одномерной модели допущения с исключением, что токи обмоток индукторов представлены бесконечно тонкими токовыми слоями, расположенными на поверхностях сердечников (рисунок 1.15). Известны двумерные расчетные модели линейных индукционных машин [50, 51].

Здесь обмотка индуктора представлена поверхностным током, расположенным на длине активной области индуктора $L = 2p\tau$, где p – число пар полюсов, τ – полюсное деление. Линейная плотность тока на поверхности индуктора:

$$j(t, x) = J_m \cos(\omega t - \pi x/\tau), \quad (1.3)$$

где $J_m = \sqrt{2} m w I k_{об} / p\tau$; $\omega = 2\pi f$; f – частота питающего напряжения, Гц; m – число фаз обмотки; w – число последовательно соединенных витков фазы; I – действующее значение тока фазы обмотки, А; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент.

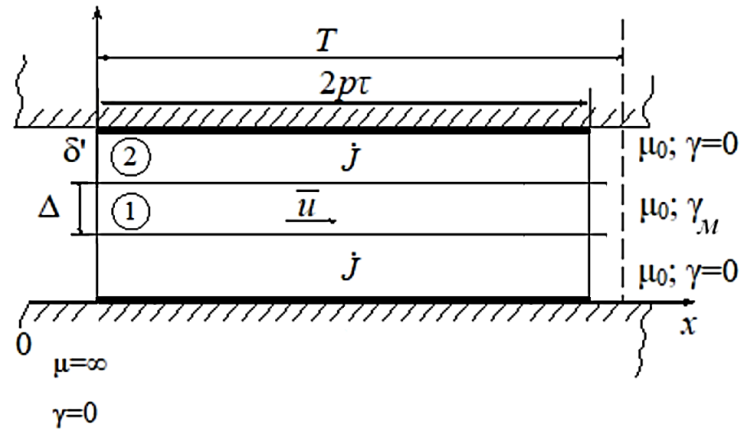


Рисунок 1.15 – Двухмерная расчетная модель линейной индукционной машины

Толщина жидкого металла в канале Δ значительно меньше величины зазора δ . В данной модели вектора электромагнитного поля имеют составляющие:

$$\bar{A} = \bar{e}_y A_y; \bar{E} = \bar{e}_y E_y; \bar{B} = \bar{e}_x B_x + \bar{e}_z B_z, \quad (1.2)$$

Задача решается с использованием конечных интегральных преобразований на основе рядов Фурье [52, 53], или с использованием бесконечных интегральных преобразований на основе интегралов Фурье [54, 55].

Недостатком двухмерных и трехмерных расчетных моделей с обмоткой в виде бесконечно тонкого токового слоя с синусоидальным распределением линейной плотности тока является невозможность учета дискретности распределения тока обмотки индуктора. Индукторы МГД-насосов металлургического назначения имеют небольшое количество пазов. В этой связи сопротивления фаз обмотки в схеме замещения МГД-насоса неодинаковы. Поэтому многофазная обмотка индуктора представляет собой несимметричную нагрузку.

Расчетная модель, позволяющая учесть дискретность распределения токовой нагрузки и несимметричности распределения фаз в двухмерной постановке, представлена в [56]. На рисунке 1.16 представлена двухмерная расчетная модель индуктора линейной индукционной машины с дискретным распределением токовой нагрузки.

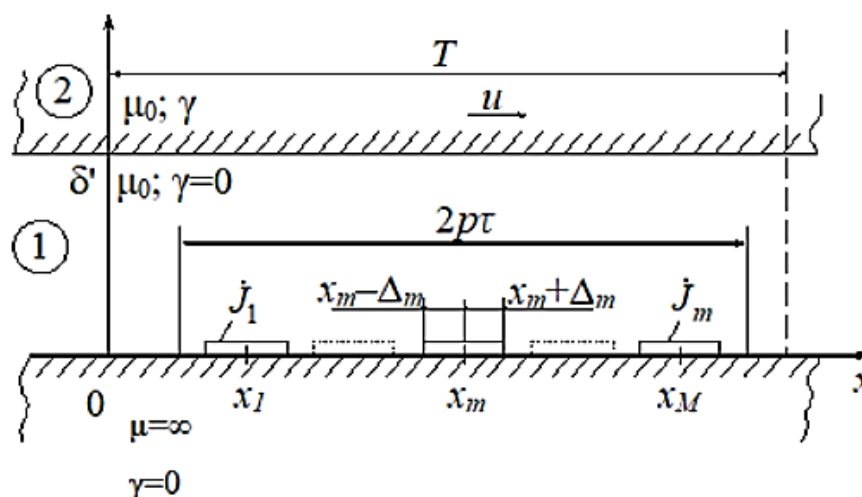


Рисунок 1.16 – Расчетная модель индуктора линейной индукционной машины с дискретной токовой нагрузкой

Основные допущения аналогичны моделям, описанным выше, с исключением, что обмотка индуктора представлена в виде бесконечно тонких токовых слоев, расположенных на поверхности сердечника в соответствии с расположением пазов, комплексная линейная плотность тока, A/m :

$$\dot{j}_m = w_m \dot{I}_m / 2\Delta_m, \quad (1.4)$$

где w_m – число витков в m -ном пазу; \dot{I}_m – комплексный ток m -ного паза, A ; $2\Delta_m$ – ширина m -ного паза, m .

В итоге можно сделать вывод, что аналитические математические модели, зачастую, используются для экспресс-анализа электромагнитных характеристик и

определения геометрических размеров и параметров электрической схемы замещения, а также для верификации численных моделей и их упрощения за счет замещения в них части математических процедур, таких как пристеночные функции, демпфируемые коэффициенты и др.

1.4.2 Численные математические модели

Численное моделирование позволяет вместо прямого решения дифференциальных уравнений в частных производных моделировать физические процессы за счет создания множества линейных уравнений, записанных для конечных малых областей [57]. На сегодняшний день самыми распространенными являются численные способы решения, основанные на методах конечных элементов/объемов (МКЭ/МКО). Данные методы основаны на разбиении расчетной области на некоторое число малых, но конечных по размерам подобластей (рис. 1.17). Последние носят название конечных элементов/объемов (КЭ/КО), а сам процесс разбивки – дискретизацией.

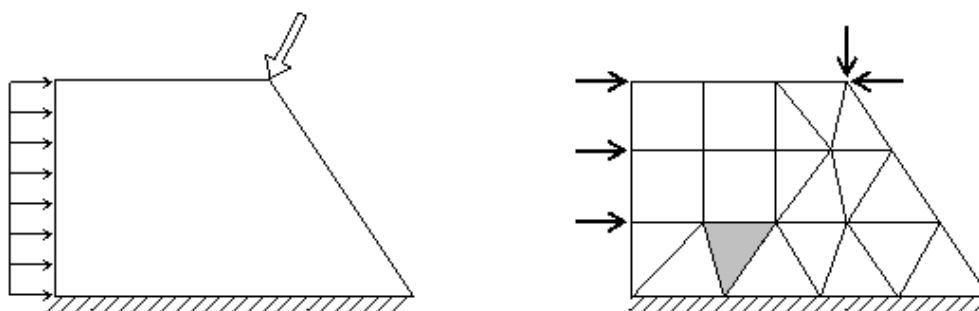


Рисунок 1.17 – Создание сетки расчетной области

К преимуществам данных методов относятся следующие факторы:

1. Свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми. Это позволяет применять методы к телам, составленным из нескольких материалов.

2. Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов. Таким образом, методами можно пользоваться не только для областей с прямой формой границы.

3. Размеры элементов могут быть переменными. Это позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы, если в этом есть необходимость.

4. Возможность моделирования гидродинамических процессов, в частности поведения течений жидкого металла в канале.

Существует множество программных продуктов, работающих на данных методах, которые позволяют достаточно точно моделировать электромагнитные, тепловые, механические, аэро- и гидродинамические процессы. Наиболее популярными являются Maxwell, Comsol, ANSYS, OpenFOAM, STAR-CD, Fluent, CFX. Данные программные пакеты хорошо себя зарекомендовали своими надежностью и точностью расчетов, однако ни один из них не позволяет моделировать магнитогидродинамические процессы в одиночку. Так как, по большому счету, каждая программа позволяет решить либо только электромагнитную задачу, либо только гидродинамическую. Поэтому, для решения данной проблемы прибегают к комплексному использованию сразу двух программных продуктов, один из которых основан на методе конечных элементов (для решения электромагнитной задачи), другой на методе конечных объемов (для решения гидродинамической задачи). При этом первичная программа должна позволять экспортировать электромагнитные результаты, а вторичная должна их импортировать и рассчитать для дальнейшего моделирования магнитогидродинамических процессов.

Решение электромагнитной задачи в ANSYS и гидродинамической задачи во Fluent показано в [58]. Также в связке с Comsol представлены работы [59, 60]. CFX использовался в исследовании потоков жидкости в устройствах со сложной формой и тонкими стенками для чисел Гартмана свыше 1000 [61, 62]. Работа с использованием кода Agros2D описана в [63]. Моделирование в трехмерной и двухмерной постановках представлены в работах [64-68]. Экспериментальное и

численное моделирование также описаны в работах зарубежных авторов [69-72]. Численные способы моделирования представлены в работах [73-77]

1.5 Постановка задачи исследования и разработки МГД-насоса

Из анализа физических воздействий на жидкий металл для его транспортировки из печи переплава в раздаточный миксер был сделан вывод, что перемещение его с помощью МГД-насосов превосходит другие методы перекачки. При этом, учитывая особенности МГД-насосов металлургического назначения, выбор конструктивного исполнения был в пользу плоского линейного индукционного МГД-насоса с перекрещивающимися обмотками.

Для исследования процессов, протекающих в системе «МГД-насос – канал с жидким металлом», определения оптимальных параметров и установления зависимостей необходимо провести математическое моделирование, которое включает в себя:

1. Создание аналитической математической модели для определения основных геометрических размеров и экспресс-анализа электромагнитных характеристик МГД-насоса;
2. Построение численной математической модели для анализа тепловых и гидродинамических процессов в МГД-насоса;
3. Построение геометрии для решения электромагнитной задачи численным методом;
4. Передача данных решения электромагнитной задачи для моделирования и анализа гидродинамических и тепловых процессов;
5. Оценка влияния ширины рабочей области на характеристики МГД-насоса;
6. Выбор геометрических и энергетических параметров системы;
7. Создание физической модели комплекса транспортировки жидкого металла;

8. Проведение экспериментальных исследований для сравнения с результатами моделирования и определения достоверности полученных результатов.

Аналитическое моделирование будет проводиться в программе Mathcad, численное моделирование в программах ANSYS, CFX и SolidWorks. Так как решение электромагнитной и гидродинамической задач будут проводиться в двух несвязанных программах необходимо использовать внешний модуль для передачи данных из одной среды в другую. При этом основными параметрами для решения гидродинамической и тепловой задач являются распределения сил Лоренца и Джоулевой энергии. Алгоритм получения и обеспечения передачи распределенных источниковых членов уравнений движения и энергии представлен в работах [78, 79].

Решение гидродинамической и тепловой задач с последующим их анализом позволят оценить эффективность работы данного конструктивного исполнения индукторов МГД-насоса. Анализ полученных зависимостей позволит разрабатывать плоские линейные индукционные МГД-насосы металлургического назначения с составлением практических рекомендаций по конструированию данных машин.

1.6 Выводы по разделу

В данной главе проведен анализ существующих видов МДГ-насосов для перекачивания жидких металлов. Были рассмотрены кондукционные и индукционные МГД-насосы. Основным недостатком кондукционных машин является контактирование расплавленного металла с токоподводами, что в свою очередь приводит к их перегреву, ухудшению проводящих свойств и постепенной коррозии за счет окисления.

Не лишены недостатков и индукционные МГД-насосы. Наличие продольного и поперечного краевых эффектов в значительной степени влияет на эффективность работы индукционных машин. Недостатки у данного вида машин можно устранить

изготавливая цилиндрические МГД-насосы, либо добавлять компенсационные обмотки при плоской конструкции.

Проанализировав достоинства и недостатки выше перечисленных типов МГД-насосов для расчета и проектирования была выбрана конструкция плоского линейного индукционного МГД-насоса с перекрещивающимися обмотками. Возможность быстрой замены индукторов и канала при зарастании, отсутствие токоподводов к жидкому металлу, простота конструкции и обслуживания, возможность эффективного активного воздушного охлаждения, компенсация продольного краевого эффекта – все эти факторы сыграли роль в выборе конструктивного типа.

Сформулированы задачи диссертационной работы. Основной из которых является разработка параметрической математической модели для проектирования МГД-насосов, включая анализ их электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в рабочих режимах. Аналитические методы позволят изучить особенности протекания физических процессов в линейных индукционных насосах. С их помощью можно определить основные параметры, что позволит отталкиваться от геометрии индуктора и количества витков в обмотках. Численное моделирование будет проводиться в комплексе программных продуктов ANSYS Multiphysics, основанных на МКЭ. Имеющийся опыт проектирования индукторов в данных программах позволит достаточно быстро и точно смоделировать гидродинамические процессы, протекающие в канальной части МГД-насоса.

2. Математическое моделирование электромагнитных процессов в системе «плоский линейный индукционный МГД-насос – рабочее тело» аналитическим методом

2.1 Расчетная аналитическая модель МГД-насоса и принятые допущения

Под влиянием пазов магнитное поле в зазоре приобретает сложный характер и труднее поддается расчету. Поэтому при расчете аналитическим методом принимают, что поверхности индукторов лишены пазов и на них расположены бесконечно тонкие токовые слои или поверхностные токи, линейная плотность которых находится в определенном соответствии с реальной токовой нагрузкой обмоток [80].

На рис. 2.1 представлен эскиз двухстороннего МГД-насоса с основными геометрическими характеристиками машины.

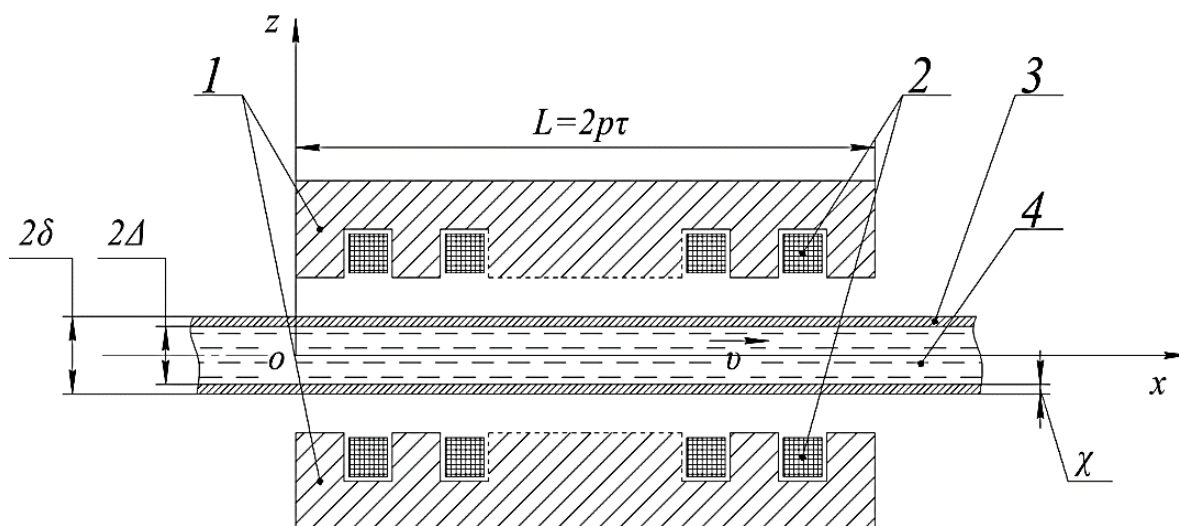


Рисунок 2.1 – Эскиз двухстороннего МГД-насоса

Индуктор машины состоит из двух ферромагнитных сердечников 1, собранных из листов электротехнической стали, и многофазной обмотки 2,

расположенной в пазах сердечников. Между сердечниками расположен канал 3 с жидким металлом 4.

При построении модели были приняты допущения [30]:

1. Магнитопроводы индукторов имеют магнитную проницаемость $\mu = \infty$ и электропроводность $\gamma = 0$.

2. Система имеет бесконечную длину в направлении оси y , т.е. электромагнитное поле является плоскопараллельным. Вектор комплексной напряженности электрического поля $\dot{\vec{E}} = \bar{e}_y \dot{E}_y$, вектор комплексной напряженности магнитного поля $\dot{\vec{H}} = \bar{e}_x \dot{H}_x + \bar{e}_z \dot{H}_z$, где \bar{e}_x , \bar{e}_y , \bar{e}_z – единичные векторы прямоугольной системы координат.

3. Систему координат принимаем жестко связанной с индукторами, при этом все элементы жидкого металла в канале двигаются относительно индукторов с одинаковой скоростью u .

4. Влияние пазов учитывается обмотками, представленными бесконечно тонкими токовыми слоями, расположенными на поверхности индуктора с комплексной линейной плотностью тока:

$$\dot{J}_m = w_m \dot{I}_m / 2b_m, \quad (2.1)$$

где w_m – число витков в m -ном пазу; \dot{I}_m – комплексный ток в m -ном пазу, A ; b_m – ширина m -ного паза, m .

6. Учитывая симметрию относительно $хоу$ будем рассматривать только половину устройства ($z \geq 0$).

2.1 Математическая модель линейной индукционной машины

При принятых допущениях расчетная модель будет иметь вид, изображенный на рис. 2.2.

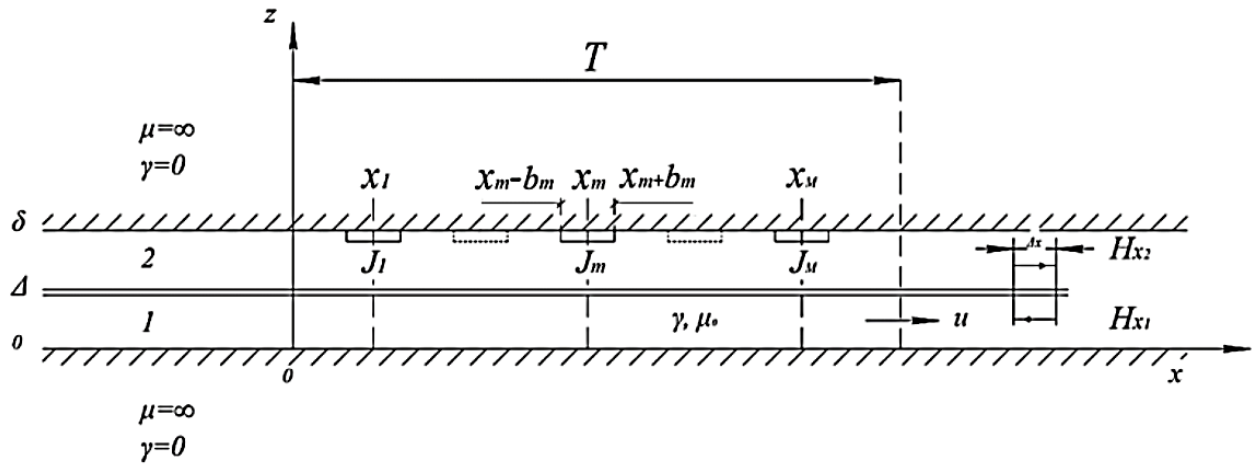


Рисунок 2.2 – Расчетная модель МГД-насоса: x_1 - x_M – координаты середины m -ного паза; T – длина индуктора

Решение будем проводить в двух областях: 1 – $0 \leq z < \Delta$; 2 – $\Delta < z \leq \delta$. Для напряженности электрического поля справедливы дифференциальные уравнения [18]:

Для области 1, $0 \leq z < \Delta$:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_1}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}_1}{\partial x^2} - i\mu_0\gamma\omega\dot{E}_1 - \mu_0\gamma u \frac{\partial^2 \dot{E}_1}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

Для области 2, $\Delta < z \leq \delta$:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}_2}{\partial x^2} = 0 \quad (2.3)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial^2 \dot{E}_1}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad ; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \dot{E}_2}{\partial z} - \frac{\partial \dot{E}_1}{\partial z} = i\omega\mu_0\sigma\chi E_2 \Big|_{z=\Delta}; \quad (2.5)$$

$$\dot{E}_2 \Big|_{z=\Delta} - \dot{E}_1 \Big|_{z=\Delta} = 0; \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_2}{\partial z^2} \Big|_{z=\delta} = \begin{cases} -i\omega\mu_0 \dot{J}_m; & x_m - b_m < x < x_m + b_m \\ 0 & \end{cases}, \quad (2.7)$$

где χ – толщина стенки канала, m ; γ – удельная электрическая проводимость жидкого металла, $1/Ом \cdot m$; σ – удельная электрическая проводимость стенки канала, $1/Ом \cdot m$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м.

Дифференциальные уравнения (2.2-2.3) и граничные условия (2.4-2.7) представляют собой математическую модель МГД-насоса. В данном разделе будем использовать аналитический метод решения дифференциальных уравнений.

2.3 Решение дифференциальных уравнений

Полагаем, что электромагнитное поле периодически по координате x с периодом T . При условии $T = 2\pi\tau$ конечность длины машины не будет учтена, соответственно, чтобы учесть влияние продольного краевого эффекта необходимо принять условие $T > 2\pi\tau$. При выбранном направлении скорости движущегося жидкого металла на входе МГД-насоса (при $0 < x < x_1 - b_1$) электромагнитное поле будет сжиматься, а на выходе (при $x_M + b_m < x - T$) вытягиваться [81]. Данное условие необходимо учитывать при задании значений x_1 и $T - (x_M + b_m)$. Как уже отмечалось выше, с учетом периодичности будем искать решения в виде рядов Фурье в комплексной форме [47]:

$$\dot{E}_{1,2}(x, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{E}_{1,2n}(z) e^{ik_n x} \quad (2.7)$$

где

$$\dot{E}_{1,2n}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{E}_{1,2}(x, z) e^{-ik_n x} \partial x \quad (2.8)$$

$$k_n = \frac{2n\pi}{T} \quad (2.9)$$

Преобразовав (2.2) и (2.3) в соответствии с (2.7) получим:

$$\frac{d^2 \dot{E}_{1n}}{dz^2} - \varphi_n^2 = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{d^2 \dot{E}_{2n}}{dz^2} - k_n^2 \dot{E}_{2n} = 0 \quad (2.11)$$

где

$$\varphi_n = \sqrt{k_n^2 + i\mu_0\gamma\omega + ik_n\mu_0\gamma\omega\tau} \quad (2.12)$$

Общими решениями обыкновенных дифференциальных уравнений (2.10) и (2.11) являются:

$$\dot{E}_{1n} = A_1 e^{\varphi_n z} + A_2 e^{-\varphi_n z} \quad (2.13)$$

$$\dot{E}_{2n} = A_3 e^{k_n z} + A_4 e^{-k_n z} \quad (2.14)$$

Постоянные интегрирования A_1 - A_4 определяются из граничных условий (2.4-2.6), которые необходимо преобразовать в соответствии с (2.7-2.8) для E_{1n} и E_{2n} :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \dot{E}_{1n}}{\partial z} &= \varphi_n A_1 e^{\varphi_n z} - \varphi_n A_2 e^{-\varphi_n z} \\ \frac{\partial \dot{E}_{2n}}{\partial z} &= k_n A_3 e^{k_n z} - k_n A_4 e^{-k_n z} \end{aligned} \right\}. \quad (2.15)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \dot{E}_{1n}}{\partial z} &= \varphi_n A_1 e^{\varphi_n z} - \varphi_n A_2 e^{-\varphi_n z} \\ \frac{\partial \dot{E}_{2n}}{\partial z} &= k_n A_3 e^{k_n z} - k_n A_4 e^{-k_n z} \end{aligned} \right\}. \quad (2.16)$$

Подставив 2.13-2.16 в преобразованные граничные условия получим систему алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 0 + A_3 e^{k_n \delta} - A_4 e^{-k_n \delta} &= \frac{\Psi_n}{k_n} \\ A_2 \operatorname{ch}(\varphi_n \Delta) - A_3 e^{k_n \Delta} - A_4 e^{-k_n \Delta} &= 0 \\ -A G_n + A_3 k_n e^{k_n \Delta} - A_4 k_n e^{-k_n \Delta} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.21)$$

где

$$G_n = 2(\varphi_n \operatorname{sh}(\varphi_n \Delta) + \xi A_2 \operatorname{ch}(\varphi_n \Delta));$$

$$\Psi_n = -i \frac{\omega \mu_0}{T} \sum_{m=1}^M j_m \int_{x_m - b_m}^{x_m + b_m} e^{-i k_n x} \partial x = -i \frac{2\omega \mu_0}{k_n T} \sum_{m=1}^M j_m \sin(k_n b_m) e^{-i k_n x_m} = -i \frac{2\omega \mu_0}{k_n T} C_{n1}$$

Решив систему 2.21 и подставив постоянные интегрирования в 2.13 и 2.14 будем иметь:

$$\dot{E}_{1n} = \frac{\Psi_n \operatorname{ch}(\varphi_n z)}{Q_n}; \quad (2.28)$$

$$\dot{E}_{2n} = \frac{\Psi_n k_n \operatorname{ch}(\varphi_n \Delta) \operatorname{ch}(k_n (z - \Delta)) + G_n \operatorname{sh}(k_n (z - \Delta))}{Q_n}, \quad (2.29)$$

где $Q_n = k_n \operatorname{ch}(\varphi_n \Delta) \operatorname{sh}(k_n (\delta - \Delta)) + G_n \operatorname{ch}(k_n (\delta - \Delta))$

Подставив полученные постоянные интегрирования из граничных условий в (2.13-2.14), получим:

$$\dot{E}_{1n}(z) = \frac{\Psi_n ch \varphi_n z}{Q_n} ; \quad (2.30)$$

$$\dot{E}_{2n}(z) = \frac{\Psi_n \theta_n(z)}{k_n Q_n} , \quad (2.31)$$

где $\theta_n(z) = k_n ch(\varphi_n \Delta) ch(k_n(z - \Delta)) + G_n sh(k_n(z - \Delta))$.

Подставив (2.30) и (2.31) в (2.7) будем иметь:

$$\dot{E}_{1n}(x, z) = -i \frac{4\omega \mu_0}{T} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{ch(\varphi_n z)}{k_n Q_n} C_{n1} e^{ik_n x} ; \quad (2.34)$$

$$\dot{E}_{2n}(x, z) = -i \frac{4\omega \mu_0}{T} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{\theta_n(z)}{k_n^2 Q_n} C_{n1} e^{ik_n x} , \quad (2.35)$$

где $C_{n1} = \sum_{m=1}^M j_m \sin(k_n b_m) e^{-ik_n x_m}$.

По известным выражениям напряженности электрического поля, определим составляющие вектора магнитной индукции. Из уравнения Максвелла $rot E = -i\omega B$:

$$\dot{B}_x = \frac{1}{i\omega} \frac{\partial E_y}{\partial z} ; \quad (2.36)$$

$$\dot{B}_z = \frac{1}{i\omega} \frac{\partial E_y}{\partial x} . \quad (2.37)$$

В соответствие с (2.34) и (2.35), получим:

$$\dot{B}_{x1} = -\frac{4\mu_0}{T} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{\varphi_n \operatorname{sh}(\varphi_n z)}{k_n Q_n} C_{n1} e^{ik_n x}; \quad (2.38)$$

$$\dot{B}_{z1} = -\frac{i4\mu_0}{T} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{\operatorname{sh}(\varphi_n z)}{Q_n} C_{n1} e^{ik_n x}; \quad (2.39)$$

$$\dot{B}_{x2} = -\frac{4\mu_0}{T} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{C_{n1}}{k_n Q_n} \theta_n(z) e^{ik_n x}; \quad (2.40)$$

$$\dot{B}_{z2} = -\frac{i4\mu_0}{T} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{C_{n1}}{k_n Q_n} \theta'_n(z) e^{ik_n x}, \quad (2.41)$$

где $\theta'_n(z) = P_n \operatorname{sh}(k_n(z-\Delta)) + G_n \operatorname{ch}(k_n(z-\Delta))$; $P_n = k_n \operatorname{ch}(\varphi_n \Delta)$.

2.4 Интегральные и дифференциальные характеристики линейной индукционной машины

Комплексная электромагнитная мощность, отдаваемая обмоткой индуктора в зазор будет равна:

$$\underline{S}_{em} = -2l \sum_{m=1}^M \int_{x_m-b_x}^{x_m+b_x} \dot{E}_2(x, \delta) J_m^* \partial x = \frac{i16\omega\mu_0 l}{T} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{C_{n1} C_{n2}}{k_n^3 Q_n} \theta_n(\delta), \quad (2.42)$$

где $C_{n2} = \sum_{m=1}^M J_m^* \sin(k_n b_m) e^{ik_n x_m}$.

Электромагнитная сила, действующая на индуктор в направлении движения, равна силе действующей на расплав:

$$\begin{aligned}
F_{em} &= \operatorname{Re} \left\{ 2l \sum_{m=1}^M \int_{x_m-b_m}^{x_m+b_m} \dot{B}_{z2}(x, \delta) J_m^* \partial x \right\} = \\
&= \operatorname{Re} \left\{ i \frac{16\mu_0 l}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{C_{n1} C_{n2}}{k_n^2 Q_n} \theta_n(\delta) \right\} .
\end{aligned} \tag{2.43}$$

Приведем полученные выражения к безразмерному виду. Домножим и разделим все величины, входящие в $\frac{\theta_n}{Q_n}$ на k_n :

$$k_n = \frac{2n\pi}{T} \tau = \frac{2n\pi}{\hat{T}} , \tag{2.44}$$

где $\hat{T} = \frac{T}{\tau}$.

$$\hat{\varphi}_n = \varphi_n \cdot k_n = \sqrt{\left(\frac{2n\pi}{\hat{T}} \right)^2 + i\varepsilon\pi^2 + i \frac{2n}{\hat{T}} \varepsilon\pi^2(1-s)} , \tag{2.45}$$

где $\varepsilon = \frac{\mu_0 \gamma \omega}{\pi^2} \tau^2$.

Преобразуем (2.42) в соответствии с полученными значениями:

$$\underline{S}_{em} = \frac{i\omega\mu_0 l T^2}{\pi^3} J_b^2 \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{\hat{\theta}_n(\delta)}{n^3 \hat{Q}_n} \hat{C}_{n1}^* \hat{C}_{n2}^* , \tag{2.46}$$

где $\hat{C}_{n1} = \sum_{m=1}^M \hat{J}_m \sin(k_n b_m) e^{-ik_n x_m}$; $\hat{C}_{n2} = \sum_{m=1}^M \hat{J}_m^* \sin(k_n b_m) e^{ik_n x_m}$;

$$\hat{J}_m = \frac{J_m}{J_b}; \quad \hat{J}_m^* = \frac{J_m^*}{J_b}; \quad J_b = \sum_{m=1}^M \frac{w_m I_m}{2p\tau};$$

$$\hat{\theta}_n = \theta_n \cdot k_n; \quad \hat{Q}_n = Q_n \cdot k_n.$$

Поделим \underline{S}_{em} на базисную мощность, чтобы привести ее к безразмерному виду. За базисную мощность примем:

$$P_b = \frac{\omega \mu_0 l T^2}{\pi^3} J_b^2 \quad (2.47)$$

Запишем выражение для относительной комплексной электромагнитной мощности поделив (2.46) на (2.47):

$$\hat{S}_{em} = i \frac{S_{em}}{P_b} = i \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{\hat{\theta}_n(\delta)}{n^3 \hat{Q}_n} \hat{C}_{n1} \hat{C}_{n2} \quad (2.48)$$

2.5 Определение размеров и параметров схемы замещения индуктора МГД-насоса

Полюсное деление индуктора τ можно определить из отношения [82]:

$$\delta / \tau, \quad (2.49)$$

где δ – расстояние между магнитопроводом индуктора и расплавом.

Чем меньше отношение (2.49), тем эффективней воздействие бегущего магнитного поля на расплав в канале, однако при увеличении τ растут размеры индуктора и затраты на его изготовление.

Действующее значение линейной токовой нагрузки индуктора принимается $J = (1 \div 3) \cdot 10^5 \text{ A/м}$. При заданном действующем значении линейной токовой нагрузки индуктора можно определить число витков в пазу:

$$W = (\tau \cdot J) / (m \cdot I). \quad (2.52)$$

Если предположить, что сопротивления фаз обмотки индуктора МГД-насоса одинаковы, то электромагнитную мощность и электромагнитную силу можно представить в виде:

$$\underline{S}_{эм} = m \underline{z}_{эм} I^2; \quad (2.53)$$

$$F_{эм} = (1 / 2 \tau f) m r_F I^2 \quad (2.54)$$

где $\underline{z}_{эм} = \underline{S}_{эм} / m I^2$ и $r_F = 2 \tau f F_{эм} / m I^2$ – элементы последовательной схемы замещения фазы обмотки индуктора МГД-насоса (рисунок 2.3).

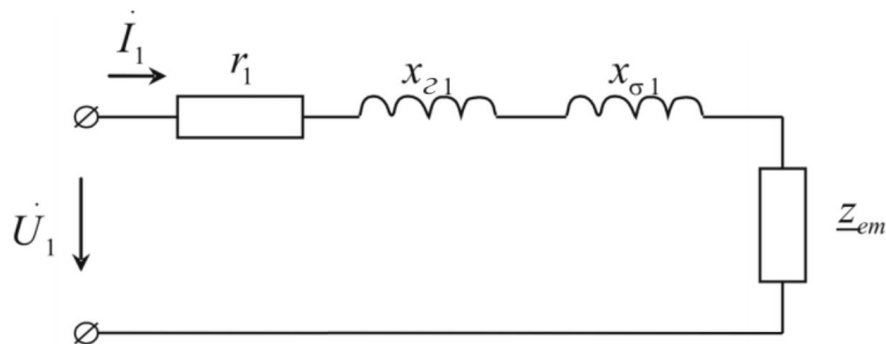


Рисунок 2.3 – Последовательная схема замещения

При этом r_1 – сопротивление фазы обмотки индуктора МГД-насоса, умноженное на коэффициент r_f , учитывающий влияние поверхностного эффекта. Сопротивление рассчитывается по обмоточным данным, а коэффициент

определяется из рекомендаций по проектированию электрических машин Вольдека А. И.

Индуктивное сопротивление рассеяния x_{σ} можно представить в виде:

$$x_{\sigma} = x_n + x_l, \quad (2.55)$$

где x_n и x_l – сопротивления пазового и лобового рассеяния соответственно.

В классической теории электрических машин сопротивления пазового и лобового рассеяния принято определять через относительные магнитные проводимости рассеяния паза λ_n и лобового рассеяния λ_l .

Для практических расчетов сопротивлений схемы замещения обычно приводят к относительным единицам, принимая за базовое сопротивление – главное индуктивное сопротивление машины:

$$x_2 = 4\mu_0 2a f m W_1^2 / p; \quad (2.56)$$

$$\hat{z}_{эм} = \underline{z}_{эм} / x_2; \quad (2.57)$$

$$\hat{r}_F = r_F / x_2. \quad (2.58)$$

Здесь «^» означает относительные величины.

Коэффициент мощности определяется из полной электромагнитной мощности:

$$\cos \varphi = \text{Re}(S_{эм}) / S_{эм}. \quad (2.59)$$

Полученные выражения позволяют определить $\underline{z}_{эм}$ также для каждой отдельной фазы. При определении C_{nl} суммирование по m проводится от $m=1$ до M , так как электромагнитное поле создается токами всех пазов обмотки. Определяя

C_{n2} по (2.42) суммирование проводится только по пазам, принадлежащим конкретной фазе. Для рассчитываемого индуктора с перекрещивающимися обмотками C_{n2} согласно рисунку 1.13-а определяется для фаз А: $m = 2, 5$; В: $m = 4, 7$; С: $m = 1, 3, 6, 8$.

2.6 Результаты расчета электромагнитной задачи

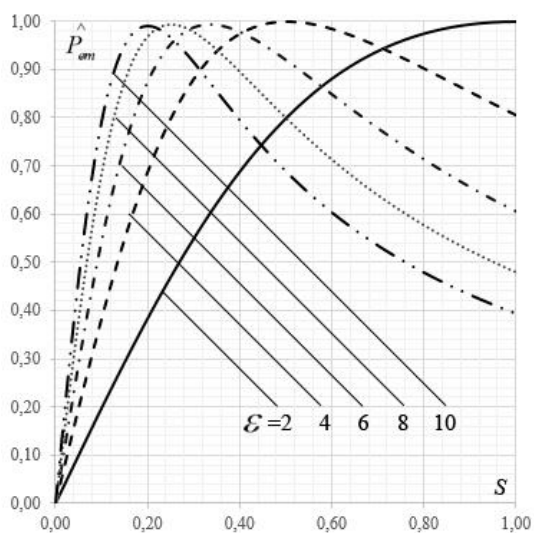
Как следует из полученных выражений, безразмерные характеристики индукционной линейной машины определяют следующие параметры:

1. Количество пазов M и их расположением по длине индуктора.
2. Амплитудно-фазовыми характеристиками синусоидальных токов в пазах $\hat{j}_m = J_m e^{i\Psi_m}$. J_m и Ψ_m – модуль и фаза m -ной линейной плотности тока.
3. Относительной величиной воздушного зазора – $\delta/\tau - \Delta/\tau$.
4. Безразмерным коэффициентом добротности $\varepsilon = \mu_0 \gamma \omega \tau^2 / \pi^2$.

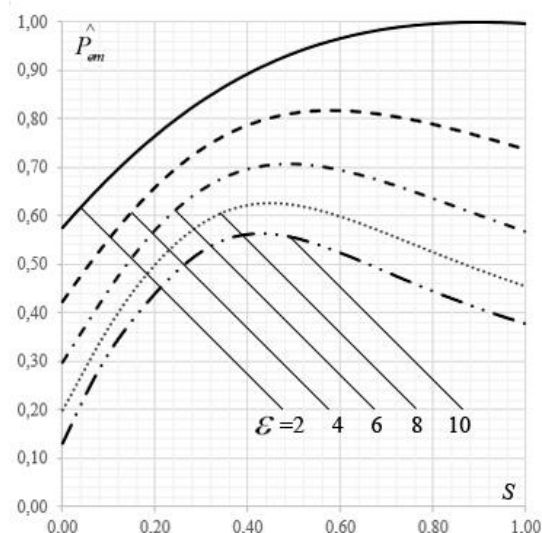
В соответствии с полученными выражениями и использованием программы Mathcad проведены расчеты интегральных и дифференциальных характеристик МГД-насоса.

На рисунках 2.4, 2.5 представлены зависимости относительных активной мощности \hat{P}_{em} и реактивной мощности \hat{Q}_{em} относительно скольжения для различных величин коэффициента добротности ε . При $M = 8$; $\hat{j}_m = 3 \cdot 10^6 e^{i\Psi_m}$; $\Psi_{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8} = 240; 0; 60; 120; 180; 240; 300; 60$.

На рисунках 2.6, 2.7 представлены распределения относительной магнитной индукции \hat{B} по длине расчетной области для различных величин коэффициента добротности ε , и при разных величинах скольжения s . Величины M , \hat{j}_m и $\Psi_{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}$ идентичны величинам, использованным для получения рисунков 2.4 и 2.5.

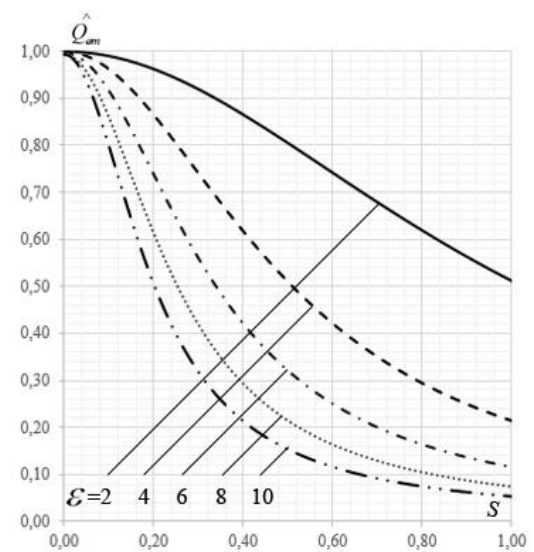


а)

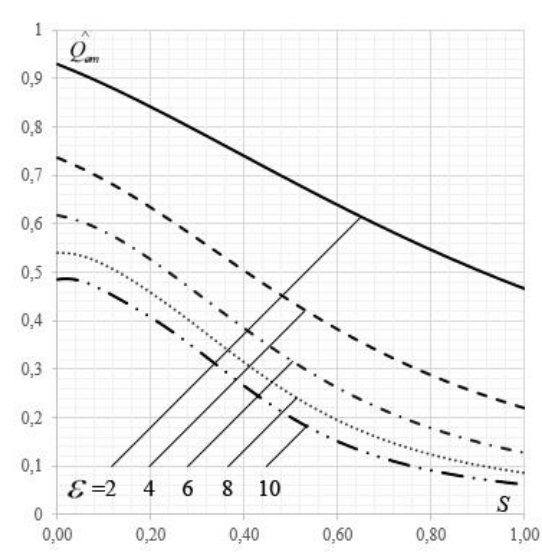


б)

Рис. 2.4 – График распределения относительной активной мощности от скольжения: а – без учета продольного краевого эффекта; б – с учетом влияния краевого эффекта



а)



б)

Рис. 2.5 – График распределения относительной реактивной мощности относительно скольжения: а – без учета продольного краевого эффекта; б – с учетом влияния краевого эффекта

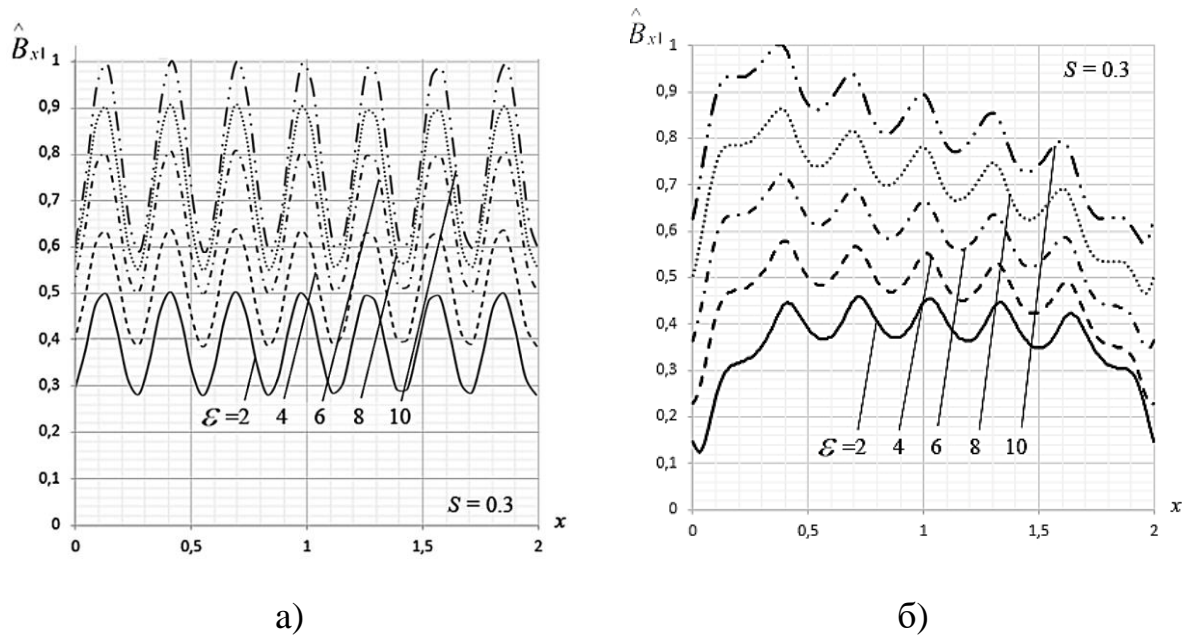


Рис. 2.6 – График распределения относительной магнитной индукции по длине расчетной области: а – без учета продольного краевого эффекта; б – с учетом влияния краевого эффекта

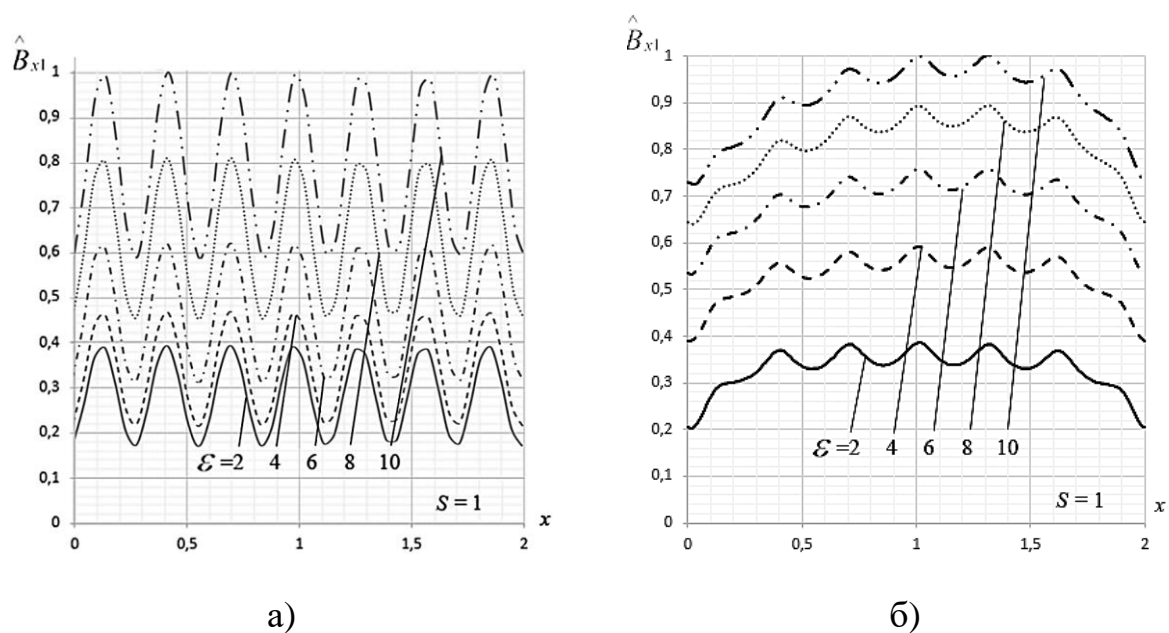


Рис. 2.7 – График распределения относительной магнитной индукции по длине расчетной области: а – без учета продольного краевого эффекта; б – с учетом влияния краевого эффекта

На рисунках 2.4 - б, 2.5 - б видно, как продольный краевой эффект приводит к «заваливанию» характеристик и снижению максимальных активной и реактивной мощностей, причем тем больше чем выше коэффициент добротности ε .

На рисунках 2.6, 2.7 представлены картины распределения относительной магнитной индукции \hat{B}_{x1} по длине индуктора с учетом продольного краевого эффекта ($x_l = b_m + \tau$; $T = x_M + 2\tau$) и различных величинах скольжения.

2.7 Верификация аналитических выражений с помощью численной математической модели

Для подтверждения адекватности аналитических выражений, принятых допущений при их получении, а также для подтверждения правомерности полученных результатов в главе 2 проведен сравнительный анализ расчета дифференциальных характеристик МГД-насоса. Расчеты для сравнительного анализа электромагнитных характеристик выполнены в программе ANSYS Mechanical APDL.

Для решения электромагнитной задачи и проверки аналитической модели необходимо задаться исходными данными, такими как геометрия (канала, индукторов, и расчетной области) а также свойствами материалов (магнитная проницаемость, удельное электрическое сопротивление).

Расчет будет проводиться в двухмерной постановке. Как отмечалось выше система МГД-насос – канал с жидким металлом является симметричной, поэтому геометрию расчетной области можно упростить и рассчитывать только половину устройства. Основными образующими областями в данной модели являются:

1. Канал с жидким металлом: $\mu_{me} = 1$; $\gamma_{me} = 3,36 \cdot 10^6$ I/Oм · м; $T = 5$ м; $\Delta = 0,1$ м.
2. Зазор между индуктором и расплавом в канале: $\mu_{air} = 1$; $\gamma_{air} = 1 \cdot 10^{-32}$ I/Oм · м.
3. Катушки индуктора: $\mu_{coil} = 1$; $\gamma_{coil} = 50 \cdot 10^6$ I/Oм · м; $b_k = 0,065$ м; $h_k = 0,065$ м.
4. Магнитопровод: $\mu_{con} = 1000$; $\gamma_{con} = 1 \cdot 10^{-32}$ I/Oм · м; $L = 0,96$ м; $b_3 = 0,08$ м; $h_я = 0,15$ м; $h_3 = 0,15$ м.

Построена численная математическая модель, геометрия и сетка расчетной области которой представлены на рисунке 2.8, где а – геометрия расчетной области; б – сетка расчетной области.

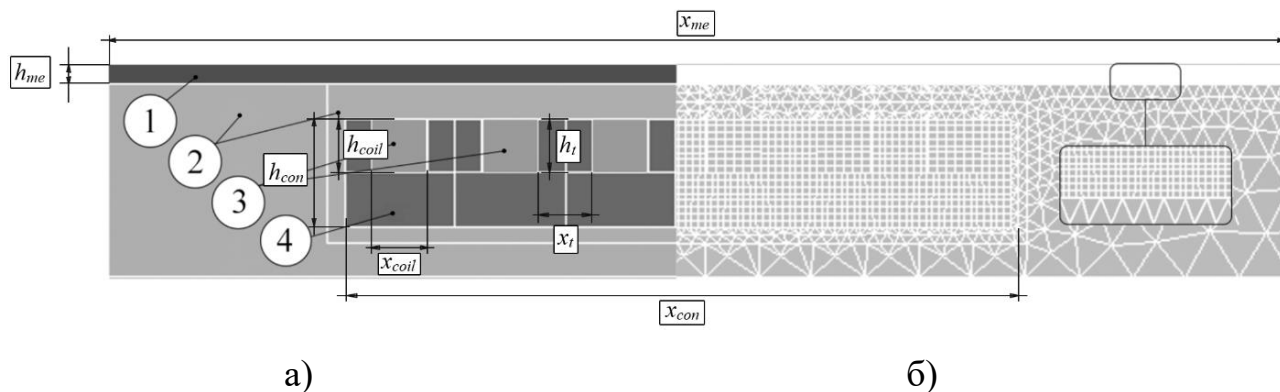


Рисунок 2.8 – Расчетная двумерная модель системы «индукционный МГД-насос – рабочее тело»: 1 – канал с жидким металлом; 2 – воздушные области; 3 – обмотки индуктора; 4 – магнитопровод индуктора;
а – геометрия; б – сетка расчетной области

В каждой области задается разреженность и тип элемента, после чего строится расчетная сетка из плоских PLANE53 элементов. Наибольшая плотность элементов расчетной сетки задается в канальной части и индукторе МГД-насоса. Данные области наиболее детализированы и однородны, так как процессы, протекающие в них, представляют наибольший интерес.

Воздушная область разбивается на несколько подобластей, как правило на две: внутренняя (располагается в воздушном зазоре между индуктором и канальной частью) и внешняя (на всем протяжении удаления от индуктора). Данный способ позволяет сократить время расчета за счет укрупнения элементов, находящихся на удалении от основных областей. Граница расчетной области находится на краю воздушной области, при этом размер элементов тем больше, чем ближе край расчетной области.

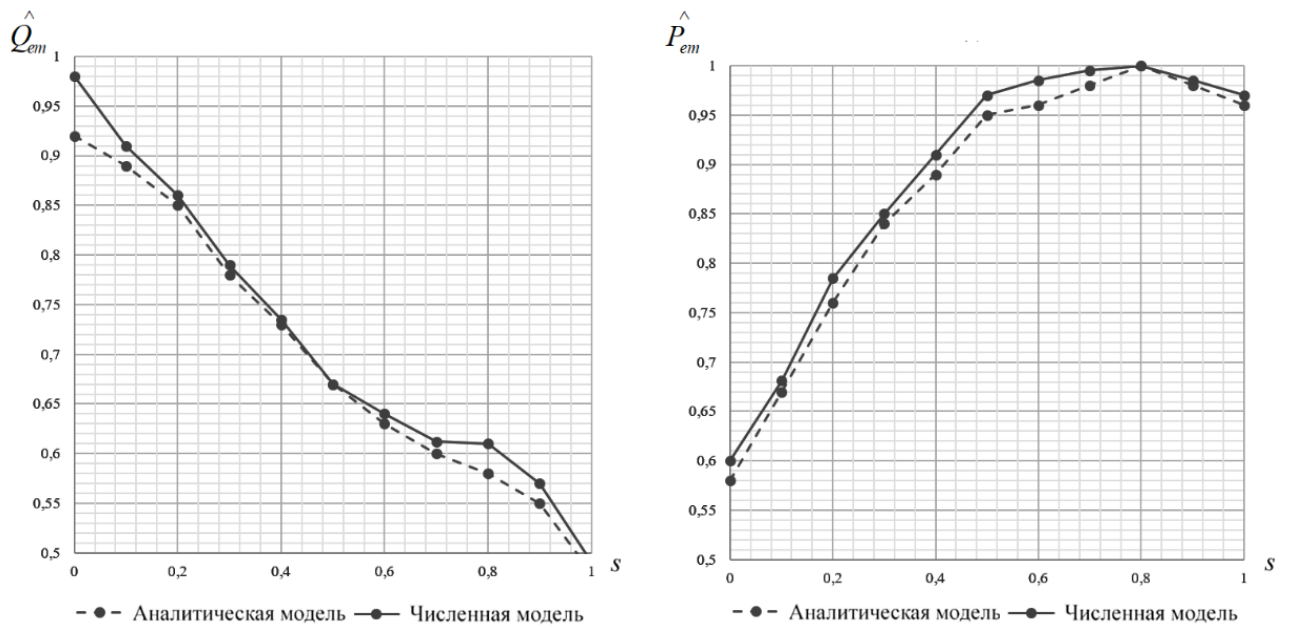


Рисунок 2.9 - Распределение относительных: а – реактивной мощности; б – активной мощности от скольжения при коэффициенте добротности $\varepsilon = 2$

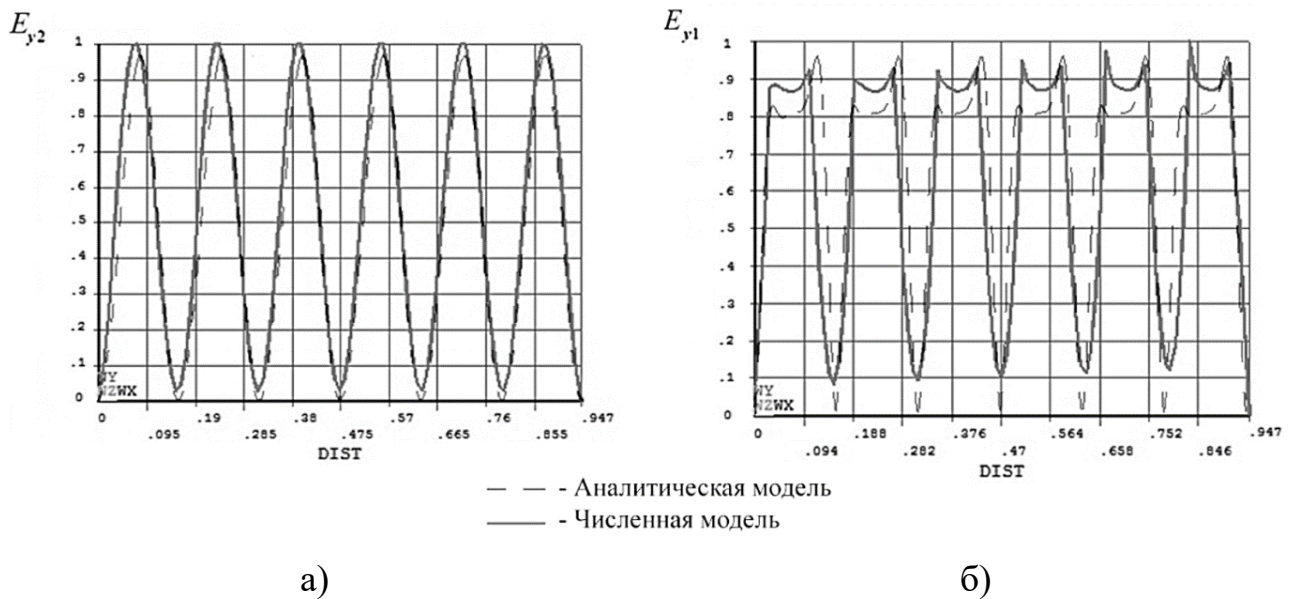


Рисунок 2.10 – Распределение относительной напряженности электрического поля E по длине индуктора: а – в центре канальной части; б – на поверхности индуктора

С помощью инструментария во встроенном блоке Postprocessing ANSYS APDL позволяет визуализировать полученные результаты в том числе и в

графическом виде. Сравнение результатов расчета по аналитической и численной моделям проводилось относительным активным и реактивным мощностям, а также по распределению напряженности электрических полей. Полученные значения приведены на рисунках 2.9-2.10, где сплошной линией показаны величины, полученные численным способом, а штриховой – результаты аналитического решения.

Согласно полученным результатам, представленным на рисунке 2.9, распределения напряженности электрического поля имеют схожий характер в аналитической и численной моделях. Расхождения значений в отдельных точках обусловлены неравномерностью разбиения сетки расчетной области в численной модели, а также принятыми допущениями в аналитической модели.

Совпадение расчетных зависимостей подтверждает достоверность полученных аналитических выражений и правомерность их использования при определении основных параметров МГД-насоса. Но так как аналитическая модель не позволяет моделировать гидродинамические процессы, протекающие в канале, и на работу МГД-насоса, в целом, влияют поперечный, продольный краевые эффекты и реальная геометрия зубцово-пазовой зоны, необходимо провести анализ электромагнитных и гидродинамических характеристик в трехмерной постановке.

2.8 Выводы по разделу

Построенная аналитическая модель позволила получить простые аналитические выражения для определения основных геометрических размеров ПЛИН и параметров схемы замещения. Данные выражения позволяют анализировать электромагнитные характеристики линейных индукционных машин с учетом влияния продольного краевого эффекта. Проведен анализ дифференциальных и интегральных характеристик двухсторонних линейных индукционных МГД-насосов. Получены зависимости относительных активной, реактивной мощности и магнитной индукции в зависимости от коэффициента добротности при различных величинах скольжения.

Проведена верификация аналитических выражений с помощью численного математического моделирования в программном комплексе ANSYS. Совпадение результатов расчета позволяет сделать вывод о достоверности полученных аналитических выражений и использовать их для определения основных геометрических и энергетических параметров МГД-насосов.

3. Математическое моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов в МГД-насосе численным методом

3.1 Постановка задачи и основные допущения

Для моделирования гидродинамики в программном комплексе ANSYS необходимо получить распределение электромагнитных сил в канальной части МГД-насоса. Для этого необходимо провести электромагнитный расчет данной системы. Следующим шагом будет передача результатов электромагнитной задачи в ANSYS CFX для решения гидродинамической задачи.

Согласно выражениям, описанным в пункте 2.5 предварительно были рассчитаны основные геометрические размеры индукторов, а также параметры схемы замещения (таблица 3.1). Для намотки катушек был заложен провод ПСДКТ 2,50 x 5,00 ТУ 16.К71-129-91.

Таблица 3.1 – Основные геометрические размеры индуктора и параметры схемы замещения

Описание	Обозначение	Значение
Длина зубца	x_z	65 мм
Длина паза	x_p	65 мм
Высота зубца	h_z	150 мм
Высота яра	h_s	150 мм
Ширина магнитопровода	z_c	150 мм
Количество витков на фазу A, B	$\omega_{A, B}$	360

Количество витков на фазу C	ω_C	720
Частота питающего напряжения	f	50 Гц
Импеданс фазы A , при $f = 50$ Гц	z_A	17,58 Ом
Импеданс фазы B , при $f = 50$ Гц	z_B	19,26 Ом
Импеданс фазы C , при $f = 50$ Гц	z_C	17,301 Ом

При включении в трехфазную сеть напряжением 380 В в витке будет протекать ток 21 А, при этом плотность тока будет составлять 1,7 А/мм² что свидетельствует о необходимости повышения напряжения для увеличения линейной токовой нагрузки и, соответственно, плотности тока до 3 А/мм² с пассивным охлаждением, вплоть до 5 А/мм² с применением активного воздушного охлаждения.

Схема системы транспортировки жидкого металла, представлена на рисунке 3.1, состоит из канала с жидким металлом 1 и индукторов МГД-насоса, которые включают в себя катушки 2 и магнитопроводы 3.

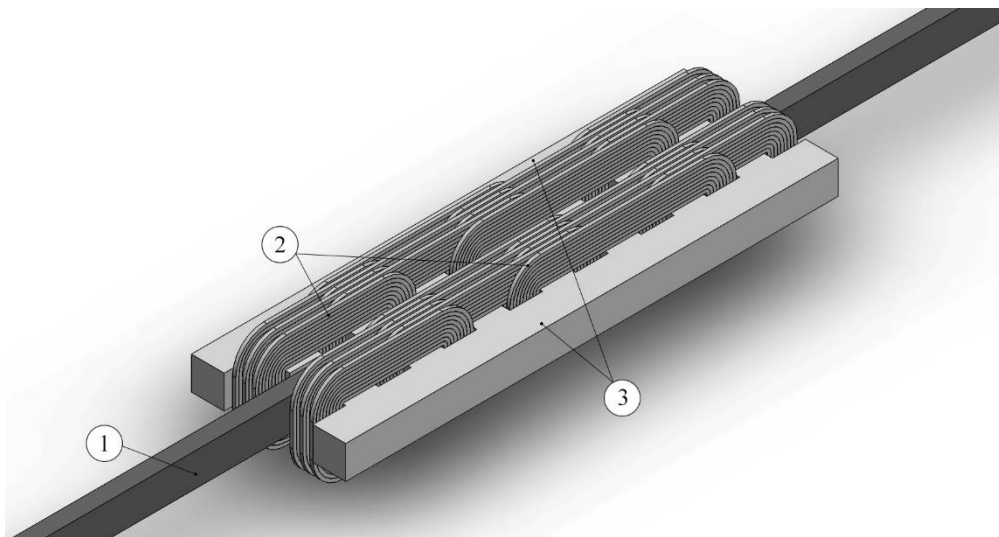


Рисунок 3.1 – Эскиз МГД-насоса

Данная система симметрична относительно средней плоскости канала с расплавом и, поэтому, моделирование электромагнитных и гидродинамических

процессов можно провести в половине МГД-насоса. Поскольку длина канала значительно превосходит длину индукторов можно принять, что канальная часть имеет бесконечную длину, это, в свою очередь, упростит геометрию расчетной области. Каждому построенному объему присваиваются свои удельные электрические проводимости γ , относительные магнитные проницаемости μ и плотности токов δ .

Предварительная оценка влияния движения жидкого металла на электромагнитное поле может быть выполнена с помощью магнитного числа Рейнольдса:

$$Re_m = \mu_o \gamma v_o l_o , \quad (3.1)$$

где $\mu_o = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; $\gamma = 3,6 \cdot 10^6$ I/(Ом · м) – удельная электрическая проводимость алюминия; $v_o = 0,25$ м/с – характерная скорость; $l_o = 1$ м – характерный размер.

Полученное магнитное число Рейнольдса ($Re_m = 1,1304$) позволяет сделать вывод, что электромагнитную задачу можно решать без учета влияния поля скоростей в металле.

Исходя из вышеперечисленных факторов, для решения электромагнитной задачи были приняты следующие допущения:

1. Канальная часть будет иметь замкнутый, кольцевой вид;
2. Электромагнитное поле в расчетной области изменяется по гармоническому закону;
3. Магнитопроводы индукторов моделируются анизотропной средой с $\mu_{магн} = 1000$, $\gamma_{магн x} = 4 \cdot 10^{-7}$ Ом · м, $\gamma_{магн y} = 4 \cdot 10^{-7}$ Ом · м, $\gamma_{магн z} = 10^{32}$ Ом · м;
4. Обмотки индукторов моделируются распределенными источниками электромагнитного поля с $\delta = 3 \cdot 10^6$ А/м², $f = 50$ Гц;
5. Расплав алюминия в канальной части моделируется средой с $\mu_{ал} = 1$ и $\gamma_{ал} = 3,6 \cdot 10^6$ I/(Ом · м);
6. Влиянием движения металла в канале на магнитное поле пренебрегаем.

3.2 Расчетные модели МГД-насоса

Математическое описание электромагнитных и гидродинамических процессов основано на взаимодействии сил электромагнитного поля с жидкими металлами с учетом формирующегося массопереноса. Соответственно, система уравнений Максвелла, описывающая электромагнитное поле в медленно движущихся изотропных средах с учетом такого взаимодействия в дифференциальной форме будет иметь вид:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{\delta}, \quad (3.2)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\partial \bar{B} / \partial t', \quad (3.3)$$

$$\bar{\delta} = \gamma (\bar{E} + \bar{u} \times \bar{B}), \quad (3.4)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H}, \quad (3.5)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0, \quad (3.6)$$

где \bar{H} , $\bar{\delta}$, \bar{E} , \bar{B} – соответственно векторы напряженности магнитного поля, A/m ; плотности тока, A/m^2 ; напряженности электрического поля, V/m ; и магнитной индукции, $Tл$; t – время, c ; \bar{u} – вектор скорости, m/c .

Главным фактором, отличающим магнитную гидродинамику от классической гидродинамики, является наличие в жидкости объемной силы, которая называется силой Лоренца и возникает при взаимодействии векторов плотности тока и магнитной индукции:

$$\bar{f}_{em} = \bar{\delta} \times \bar{B}. \quad (3.7)$$

С учетом данной особенности система уравнений, которая описывает гидродинамические процессы в несжимаемой жидкости, будет выглядеть:

$$\text{Div } \bar{u} = 0, \quad (3.8)$$

$$\rho ((\partial \bar{u} / \partial t) + (\bar{u} \text{ grad}) \bar{u}) = -\text{grad } p + \eta \nabla^2 \bar{u} + \bar{f}_{em}, \quad (3.9)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3 ; p – давление в среде, Па ; η – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Уравнение 3.9 является уравнением Навье-Стокса для магнитной гидродинамики и устанавливает, что изменение количества движения некоторого объема происходит за счет сил, приложенных к данному объему. В данном случае объемной плотности этих сил. Левая часть данного уравнения представляет собой силу инерции, правая – сумму сил давления, вязкого трения и электромагнитной силы. Уравнения 3.1-3.9 в наиболее общем виде дают представление о процессах и взаимосвязях основных физических величин в магнитной гидродинамике.

Для удобства нахождения решения систему уравнений электромагнитного поля (3.3-3.7) можно привести к одному из векторов поля путем исключения каких-либо трех неизвестных, остальные же при этом могут быть обратно определены из соответствующих уравнений как аналитически, так и численно. В большинстве случаев вводят в рассмотрение векторный потенциал магнитного поля. Данная величина очень универсальна и при ее известном решении могут быть найдены все основные характеристики электромагнитного поля. Именно векторный магнитный потенциал является искомой величиной в решателях большинства программных продуктов.

Система уравнений, описывающих электромагнитное поле, записанная относительно векторного и скалярного потенциалов (3.10 и 3.11), и уравнение непрерывности (3.12) будут иметь вид [67]:

$$\nabla^2 \bar{A} - \nabla(\nabla \bar{A} + \varepsilon_a \mu_a (\partial \varphi / \partial t)) - \varepsilon_a \mu_a (\partial^2 \bar{A} / \partial t^2) = -\mu_a \bar{J}, \quad (3.10)$$

$$\nabla^2 \varphi + (\partial/\partial t) \nabla \bar{A} = -\rho_q / \varepsilon_a, \quad (3.11)$$

$$\nabla \bar{\delta} = -(\partial \rho_q / \partial t), \quad (3.12)$$

где \bar{A} – векторный потенциал, $B\bar{m}$; φ – скалярный потенциал неподвижных зарядов, B ; $\bar{\delta}$ – вектор плотности тока, A/m^2 ; $\varepsilon_a = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Φ/m – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ρ_q – плотность свободных зарядов, $Kл/м$.

Вектор плотности тока входящий в уравнения (3.10, 3.12) будет иметь вид:

$$\bar{\delta} = \gamma (-\nabla \varphi - (\delta \bar{A} / \delta t) + \bar{u} \times (\nabla \times \bar{A})). \quad (3.13)$$

Если пренебречь токами смещения и наложить кулоновскую калибровку [55] ($\nabla \bar{A} = 0$) с учетом отсутствия в расчетной области свободных электрических зарядов ($\rho_q = 0$ и $\varphi = 0$), уравнения (3.10-3.12) можно записать в виде:

$$\nabla^2 \bar{A} = -\mu_a \bar{\delta}, \quad (3.14)$$

$$\nabla \bar{\delta} = 0. \quad (3.15)$$

Уравнение (3.13) при этом будет:

$$\bar{\delta} = \gamma (-(\delta \bar{A} / \delta t) + \bar{u} \times (\nabla \times \bar{A})). \quad (3.16)$$

Электромагнитная задача сводится к решению системы уравнений (3.14-3.16). Для анализа электромагнитного поля, изменяющегося по синусоидальному закону, удобно ввести в рассмотрение комплексный магнитный потенциал $\dot{\bar{A}}$, который удовлетворяет уравнениям:

$$\nabla^2 \dot{\vec{A}} = -\mu_a \dot{\vec{\delta}}, \quad (3.17)$$

$$\nabla \dot{\vec{\delta}} = 0, \quad (3.18)$$

$$\dot{\vec{\delta}} = -\gamma j \omega \dot{\vec{A}} + \vec{v} \times (\nabla \times \dot{\vec{A}}), \quad (3.19)$$

Для однозначного определения электромагнитного поля в расчетной области систему уравнений (3.17-3.19) необходимо дополнить граничными условиями.

При расчете используются граничные условия, выраженные через векторный потенциал. Так как на границах индукторов отсутствуют поверхностные токи проводимости i , условия $B_{n2} - B_{n1} = 0$, $H_{t2} - H_{t1} = 4\pi i/c$ будут иметь вид:

$$A_{n2} = A_{n1}, \quad (3.20)$$

$$A_{\tau 2} / \mu_0 \mu_2 = A_{\tau 1} / \mu_0 \mu_1. \quad (3.21)$$

Если принять что расчетную область окружает среда с бесконечной магнитной проницаемостью, то на границах расчетной области будут выполняться условия [59]:

$$\partial A_{\tau} / \partial n = 0, \quad (3.22)$$

$$A_n = 0, \quad (3.23)$$

где n – нормаль к поверхности расчетной области.

При этом условие (3.22) справедливо для касательной составляющей векторного потенциала, а (3.23) для нормальной составляющей векторного потенциала.

3.3 Математическая модель термогидродинамических процессов и решение гидродинамической задачи

Термогидродинамические процессы можно описать системой уравнений, состоящей из уравнения сохранения массы (3.24), движения (3.25) и энергии (3.26):

$$(\partial\rho/\partial t) + \nabla(\rho\bar{u}) = s_\rho, \quad (3.24)$$

$$(\partial\rho\bar{u}/\partial t) + \nabla(\rho\bar{u}\bar{u}) = -\nabla p + \nabla\bar{\tau} + \rho\bar{g} + s_v, \quad (3.25)$$

$$(\partial\rho h/\partial t) + \nabla(\rho\bar{u}h) = \nabla(\lambda\nabla T) + s_h, \quad (3.26)$$

где s_ρ , s_v , s_h – источниковые члены уравнений сохранения массы, движения и энергии; p – давление, Па; $\bar{\tau}$ – тензор вязких напряжений; h – энтальпия, Дж/кг; T – температура, °С.

Приближение Буссинеска-Обербека [84-87] позволяет учесть свободноконвективные движения. В данном приближении зависимость плотности от температуры линейаризируется, учитываясь только при массовых силах:

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)), \quad (3.25)$$

где ρ_0 – плотность жидкости при температуре T_0 .

При этом жидкость можно рассматривать как несжимаемую. В качестве же источниковых членов уравнений движения и энергии при решении задач магнитной гидродинамики служат удельная электромагнитная сила $\bar{f}_{эм}$ и удельная Джоулева энергия $q_{эм}$. С учетом данных факторов система уравнений (3.22-3.24) будет выглядеть:

$$\nabla\bar{u} = 0, \quad (3.26)$$

$$(\partial \rho_0 \bar{u} / \partial t) + \nabla (\rho_0 \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho(T) \bar{g} + \bar{f}_{эм}, \quad (3.27)$$

$$(\partial \rho_0 h / \partial t) + \nabla (\rho_0 \bar{u} h) = -\nabla (\lambda \nabla T) + q_{эм}. \quad (3.28)$$

Компоненты тензора вязких напряжений $\bar{\tau}$ определяются:

$$\bar{\tau}_{ij} = \eta ((\partial u_i h / \partial x_j) + (\partial u_j h / \partial x_i) - (2 \partial u_k h / 3 \partial x_k) \cdot \delta_{ij}), \quad (3.29)$$

где u_i, u_j, u_k – компоненты вектора скорости; δ_{ij} – символ Кронекера.

Проведем предварительную оценку характера гидродинамических процессов через критерии подобия гидродинамики и магнитной гидродинамики через числа Гартмана и Рейнольдса.

Число Гартмана характеризует отношение электромагнитных сил к вязким и определяется:

$$Ha = B_0 \sqrt{\gamma / \eta} l_0 = 60000, \quad (3.30)$$

где магнитная индукция $B_0 = 1 \text{ Тл}$; удельная электрическая проводимость алюминия $\gamma_{ал} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ I}/(\text{Ом} \cdot \text{м})$; динамическая вязкость алюминия $\eta = 0,001 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$; характерный размер $l_0 = 1 \text{ м}$.

Если число Гартмана больше 1, то электромагнитное поле оказывает существенное влияние на движение расплава.

Число Рейнольдса характеризует отношение инерционных сил к вязким и определяется:

$$Re = \rho u_0 l_0 / \eta = 1250000, \quad (3.31)$$

где плотность Алюминия $\rho_{ал} = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3$; характерная скорость $v_0 = 0,5 \text{ м}/\text{с}$; характерный размер $l_0 = 1 \text{ м}$; коэффициент динамической вязкости $\eta = 0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Полученное значение числа Рейнольдса превышает порог устойчивой турбулентности ($Re > 10000$). Данный факт позволяет сделать вывод, что режим течений, будет иметь турбулентный характер. Соответственно для будущего решения необходимо использовать модели турбулентности. В CFX к основным можно отнести:

1. RANS-модель (Reynolds-averaged Navier–Stokes) – основана на уравнениях Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу;

2. DNS-модель (Direct Numerical Simulation) – основана на прямом численном моделировании турбулентности.

3. LES-модель (Large Eddy Simulation) – основана на подсеточном моделировании микромасштабных турбулентностей.

Наиболее точные результаты моделирования дают модели прямого численного моделирования турбулентности, однако использование полной DNS-модели в инженерных расчетах нерационально, так как для ее решения необходимо разряжать даже самые мелкие вихри. Это приводит к многократному увеличению времени решения гидродинамической задачи. RANS-модели позволяют производить решения достаточно быстро, но если вместе с гидродинамической решается и тепловая задача массопереноса, то результаты распределения температур не всегда являются корректными. Промежуточное положение между RANS и DNS-моделями занимает LES-модель. Обычно решается для больших объемов жидкостей, при этом большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а эффекты более мелких вихрей моделируются с использованием правил подсеточного замыкания.

Так как расчетная область не имеет сложной формы и большого объема жидкого металла расчет будет производиться с помощью метода осреднения Рейнольдса. При этом скорость раскладывается на усредненную во времени и пульсационную составляющую. С учетом данной особенности, уравнение (3.27) принимает вид:

$$(\partial \rho_0 \bar{u} / \partial t) + \nabla (\rho_0 \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla (\bar{\tau} - \rho_0 \overline{u' u'}) + \rho(T) \bar{g} + \bar{f}_{эм}, \quad (3.32)$$

где \bar{u} – усредненная во времени составляющая вектора скорости; \bar{u}' – пульсационная составляющая вектора скорости; $\rho_0 \bar{u}' \bar{u}'$ – тензор напряжений Рейнольдса.

Для моделирования RANS-методом была использована модель турбулентности Ментера (модель переноса касательных напряжений, SST – Shear Stress Transport), эффективно сочетает в себе надежность и точность описания пристеночных и свободно-сдвиговых течений. При этом уравнения переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций и удельной скорости диссипации будут иметь вид:

$$(\partial \rho_0 k / \partial t) + \nabla(\rho_0 \bar{u} k) = \nabla(\Gamma_k \nabla k) + \widetilde{G}_k - Y_k + s_k, \quad (3.33)$$

$$(\partial \rho_0 \omega / \partial t) + \nabla(\rho_0 \bar{u} \omega) = \nabla(\Gamma_\omega \nabla \omega) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + s_\omega, \quad (3.34)$$

где Γ_k , Γ_ω , D_ω , \widetilde{G}_k , G_ω , Y_k , Y_ω – эмпирические члены диффузии, генерации и диссипации k и ω модели SST с заложенной функцией переключения набора постоянных, в зависимости от расположения относительно течения у стенок; s_k , s_ω – источниковые члены уравнений переноса k и ω .

В данном случае турбулентная вязкость определяется:

$$\eta_t = \rho_0 k C / \omega, \quad (3.35)$$

где C – эмпирическая постоянная, значение которой переключается в зависимости от расположения относительно пристеночного течения.

Для решения гидродинамической задачи в среде CFX был использован алгоритм передачи источниковых членов уравнения движения и энергии [58, 59]. Принцип алгоритма заключается в формировании файла, в котором на каждой новой строке записаны три пространственные координаты, три компоненты источникового члена уравнения движения и источниковый член уравнения энергии

(рисунок 3.2). При этом каждый из них соответствует одному из элементов расчетной сетки электромагнитной задачи. Описывается данный алгоритм системой уравнений:

$$x' = x \cdot \cos(2\pi \cdot i_{seg} / n_{seg}); \quad y' = y; \quad z' = x \cdot \sin(2\pi \cdot i_{seg} / n_{seg}); \quad (3.36-3.38)$$

$$f_{эм x'} = f_{эм x} \cdot \cos(2\pi \cdot i_{seg} / n_{seg}); \quad f_{эм y'} = f_{эм y}; \quad (3.39, 3.40)$$

$$f_{эм z'} = f_{эм x} \cdot \sin(2\pi \cdot i_{seg} / n_{seg}); \quad q_{эм'} = q_{эм}, \quad (3.41, 3.42)$$

где x, y – координаты в плоскости; x', y', z' – координаты в пространстве; $f_{эм x}, f_{эм y}$ – компоненты вектора электромагнитной силы на плоскости; $f_{эм x'}, f_{эм y'}, f_{эм z'}$ – компоненты вектора электромагнитной силы в пространстве; $q_{эм'}, q_{эм}$ – джоулева энергия.

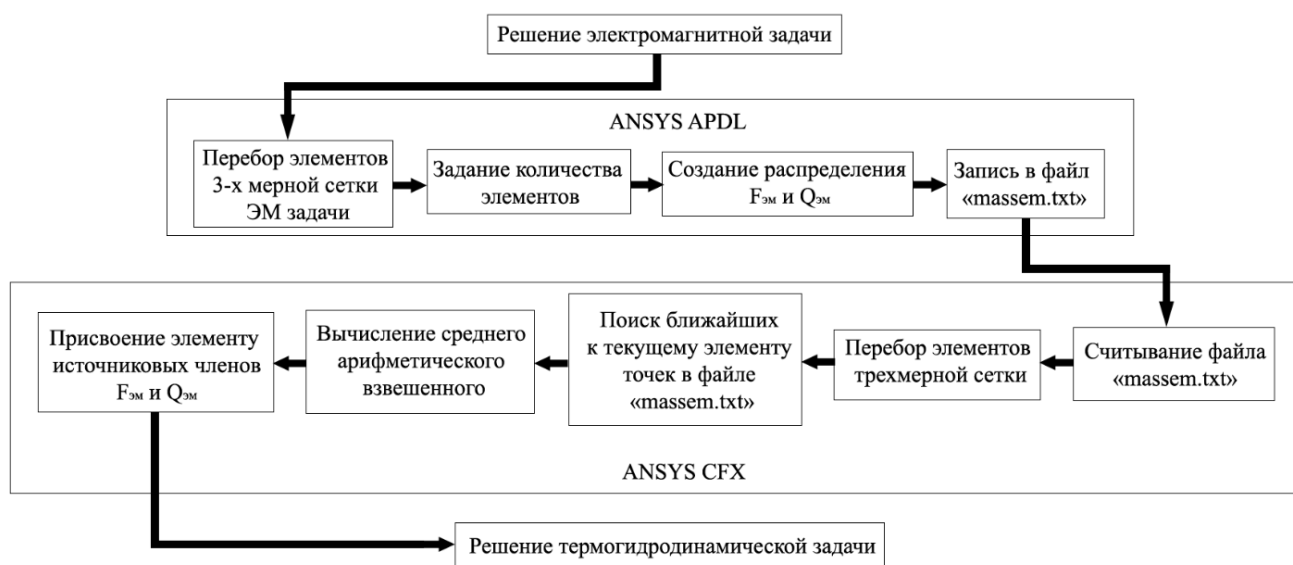


Рисунок 3.2 – Алгоритм приема и передачи данных решения электромагнитной задачи

Следующим этапом данного алгоритма является вычисление среднеарифметического взвешенного для каждой из компонент источниковых

членов уравнений движения и энергии в текущем элементе на основании формулы Надарая-Ватсона (3.29). Соответственно выполняется интерполяция распределений значений, полученных на сетке для решения электромагнитной задачи на сетку решения гидродинамической задачи.

$$s_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i \cdot (\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2})^{-1})}{\sum_{i=1}^n ((\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2})^{-1})}, \quad (3.43)$$

где s_0 – значение источника в элементе; s_i – Значение источника в i -ой точке; x_0, y_0, z_0 – координаты элемента; x_i, y_i, z_i – координаты i -ой точки.

Как было описано выше, гидродинамические процессы описываются системой уравнений Навье-Стокса (3.7-3.8). Основным граничным условием в замкнутых системах для гидродинамических задач является условие прилипания и непроницаемости на границах расчетной области, соответствующих неподвижным стенкам $u = 0$ или в случае подвижной стенки $u_n = 0, u_\tau = u_{\tau \text{ ст}}$.

Также, при возможности, используется условие свободного скольжения или плоской симметрии $(\partial/\partial n) u_\tau = 0, u_n = 0$. В незамкнутых системах, для границ, соответствующих входу и выходу потока, задается условие Неймана $(\partial/\partial n) u = 0$ и $u = u_{\text{вх}}$. Источниками возмущений в гидродинамических задачах служат силы различной природы. В случае МГД-задач – объемные электромагнитные силы.

3.3 Математическое моделирование электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в системе «МГД-насос – канальная часть»

Моделирование гидродинамических процессов проведено в среде ANSYS CFX. Для этого построена параметрическая 3-х мерная численная модель двухстороннего МГД-насоса с канальной частью.

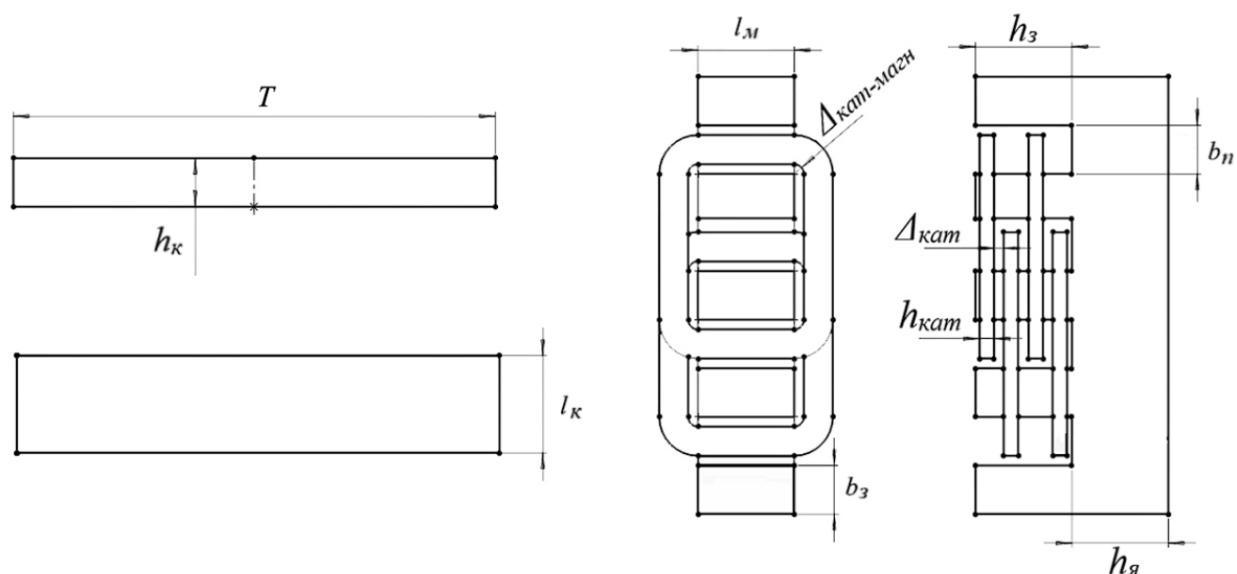


Рисунок 3.3 – Геометрические параметры системы «индуктор – канал с жидким металлом»

Исходными данными для решения электромагнитной и гидродинамической задач служат геометрические параметры (рисунок 3.3), свойства материалов (таблица 3.2) и параметры питания обмоток (таблица 3.3). В качестве базовых геометрических параметров системы транспортировки жидкого металла с помощью МГД-насоса были приняты параметры, представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Геометрические параметры МГД-насоса

Описание	Обозначение	Значение
Высота канала	l_k	150 мм
Длина канала	T	1500 мм
Ширина канала	h_k	45 мм
Высота зубца	$h_з$	150 мм
Высота ярма	$h_я$	150 мм
Длина зубца	$b_з$	60 мм
Длина паза	b_n	60 мм
Ширина магнитопровода	l_m	150 мм
Высота катушки	$h_{кат}$	24 мм

Зазор между катушками	$\Delta_{кат}$	3 мм
Зазор между катушкой и магнитопроводом	$\Delta_{кат-магн}$	3 мм
Зазор между индуктором и каналом	$\Delta_{инд-кан}$	30 мм

Таблица 3.2 – Физические свойства материалов

Наименование	Значение
Электротехническая сталь	
Удельное электрическое сопротивление в направлении x	$1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Удельное электрическое сопротивление в направлении y	$1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Удельное электрическое сопротивление в направлении z	$1 \cdot 10^{32} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Относительная магнитная проницаемость	1000
Медь	
Удельное электрическое сопротивление	$1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Относительная магнитная проницаемость	1
Жидкий алюминий	
Удельное электрическое сопротивление	$2,42 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Относительная магнитная проницаемость	1
Плотность	2500 кг/м^3
Теплопроводность	$230 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$
Теплоемкость	$1036 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$
Динамическая вязкость	$0,001 \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$
Воздушная среда	
Удельное электрическое сопротивление	$1 \cdot 10^{32} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Относительная магнитная проницаемость	1

Таблица 3.3 – Параметры электропитания индукторов МГД-насоса

Описание	Обозначение	Значение
Плотность тока в фазах A, B, C	$\delta_{A, B, C}$	$3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$

Число слоев катушек	$n_{\text{слоев}}$	6
Число фаз катушек	n_{ϕ}	3
Сдвиг фаз между токами соседних пазов	φ_{ϕ}	60°
Частота питающего напряжения	f	50 Гц

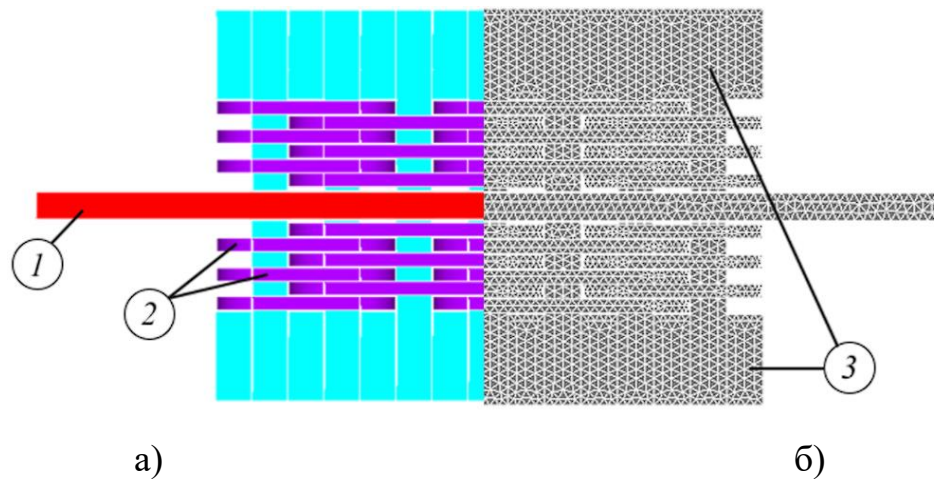


Рисунок 3.4 – Расчетная трехмерная модель системы «индукционный МГД-насос – рабочее тело»: а – геометрия; б – сетка расчетной области

Канальная часть 1 и магнитопровод индуктора 4 строятся простым выдавливанием двухмерных областей, образуя объемы. Для произведения расчета гидродинамических процессов было принято решение сделать канал с жидким металлом 1 замкнутым, что позволит оценить турбулентность образующихся течений. Но так как геометрия обмоток 3 сложна простого выдавливания будет недостаточно. Каждая секция обмоток строится с помощью блоков и цилиндров вокруг, созданных для каждой секции, системы координат. Воздушное пространство 2 представляет собой сферу с границей, равной четырем размерам канала по оси x . Для построения данной расчетной модели были использованы SOLID97 элементы.

Как отмечалось выше электромагнитные силы возникают в результате взаимодействия магнитного поля с электрическим током. Среднее значение силы за период:

$$f_{эм} = \text{Re}(\delta^* \times \dot{B}) \cdot 0,5, \quad (3.44)$$

где δ^* - сопряженный комплекс плотности тока, A/m^2 .

Ток, протекая по проводящему телу приводит к выделению тепла, при этом средняя за период удельная выделяемая мощность:

$$q_{эм} = \gamma E^2 \cdot 0,5. \quad (3.45)$$

На основе представленной математической модели проведен расчет и анализ интегральных и дифференциальных характеристик электромагнитного поля. В результате решения электромагнитной задачи получено распределение векторного потенциала, однако для анализа куда больший интерес представляют напряженности электрического и магнитных полей, магнитная индукция, плотности тока и электромагнитные силы.

Получены матричные величины магнитного поля B , плотности тока δ и объемных электромагнитных сил $f_{эм}$. Данные результаты сведены в табличный вид и характеризуют собой ту или иную величину в конкретном элементе построенной геометрии.

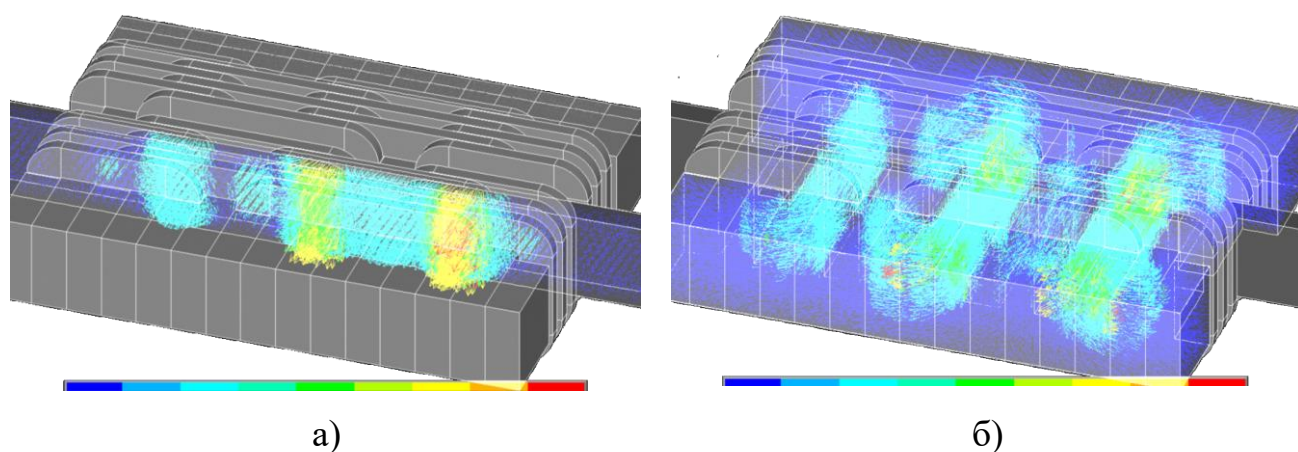


Рисунок 3.5 – Векторные распределения: а – магнитной индукции в канале с жидким металлом; б – магнитной индукции в магнитопроводах МГД-насоса

На рисунках 3.5-3.7 приведены результаты проведенных вычислительных экспериментов, а именно распределения магнитной индукции, напряженности магнитного поля и электромагнитных сил в системе МГД-насосе.

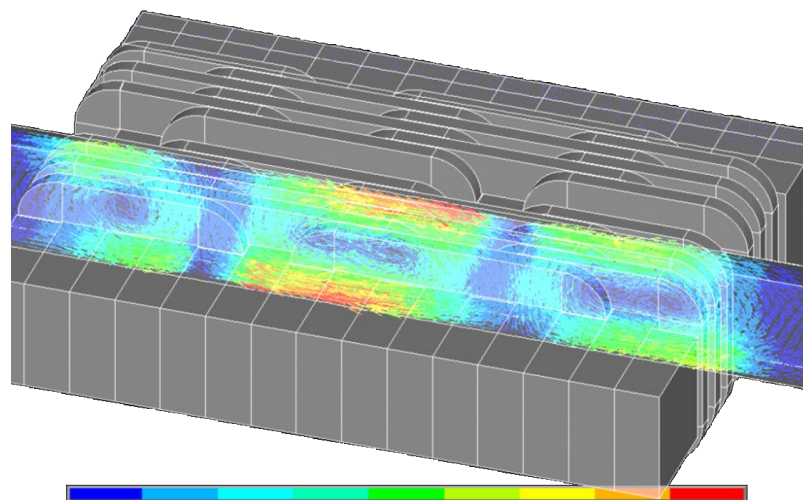


Рисунок 3.6 – Векторное распределение плотности тока в канальной части МГД-насоса

Полученные результаты позволяют определить предпочтительные величины плотности тока в обмотках МГД-насоса, а также оценить насыщение сердечника линейной индукционной машины. Распределение магнитной индукции представлено на рисунке 3.7 - а. Максимальные значения индукции в зубцах близки к значению в 1 Тл , что свидетельствует о правильном выборе геометрических и энергетических параметров.

Однако, стоит учитывать, что МГД-насосы металлургического назначения работают при высоких температурах. Это сказывается на магнитных свойствах материалов, используемых для изготовления магнитопроводов в данных агрегатах.

Наибольший интерес представляет распределение электромагнитных сил в канале. Направления векторов данных сил определяют характер и направления циркуляции расплава, а величина – интенсивность циркуляции.

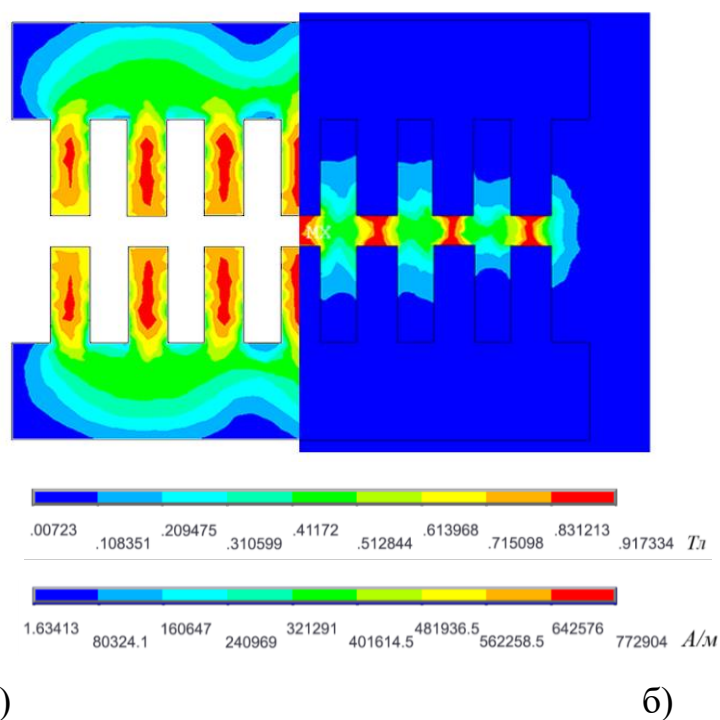


Рисунок 3.7 – Растровые распределения магнитной индукции в магнитопроводах МГД-насоса (а), и напряженности магнитного поля в воздушном зазоре (б)

Векторное поле электромагнитных сил в канале представлено на рисунке 3.8. Тянущая (тангенциальная) составляющая векторного поля электромагнитных сил преимущественно направлена вдоль канала с жидким металлом, при этом на выходе имеются завихрения, меняющие свое направление на противоположное за счет краевых эффектов, присущих линейным машинам. Отталкивающая (нормальная) составляющая сил направлена перпендикулярно каналу в направлении оси y .

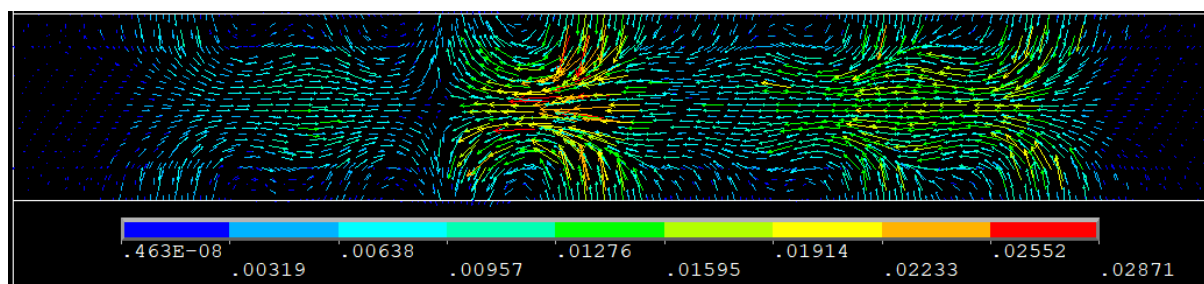


Рисунок 3.8 – Векторное распределение электромагнитных сил в канале в продольном сечении канальной части

Как отмечалось выше, величина и направление векторного поля электромагнитных сил преимущественно определяет характер течений и их интенсивность, поэтому необходимо проанализировать зависимость интегрального значения данных сил от энергетических и геометрических параметров, а практический интерес представляют зависимости этих сил от частоты питающего напряжения f и размера воздушного зазора между индукторами и канальной частью $\Delta_{\text{инд-кан}}$ при фиксированных размерах системы.

При увеличении частоты питающего напряжения наблюдается и повышение нормальной составляющей электромагнитной силы (рисунок 3.9), при этом тангенциальная составляющая имеет свой максимум при частоте $f = 50 \text{ Гц}$. Объясняется это тем, что при большем увеличении частоты, глубина проникновения снижается, увеличивается экранирующее действие стенок канала.

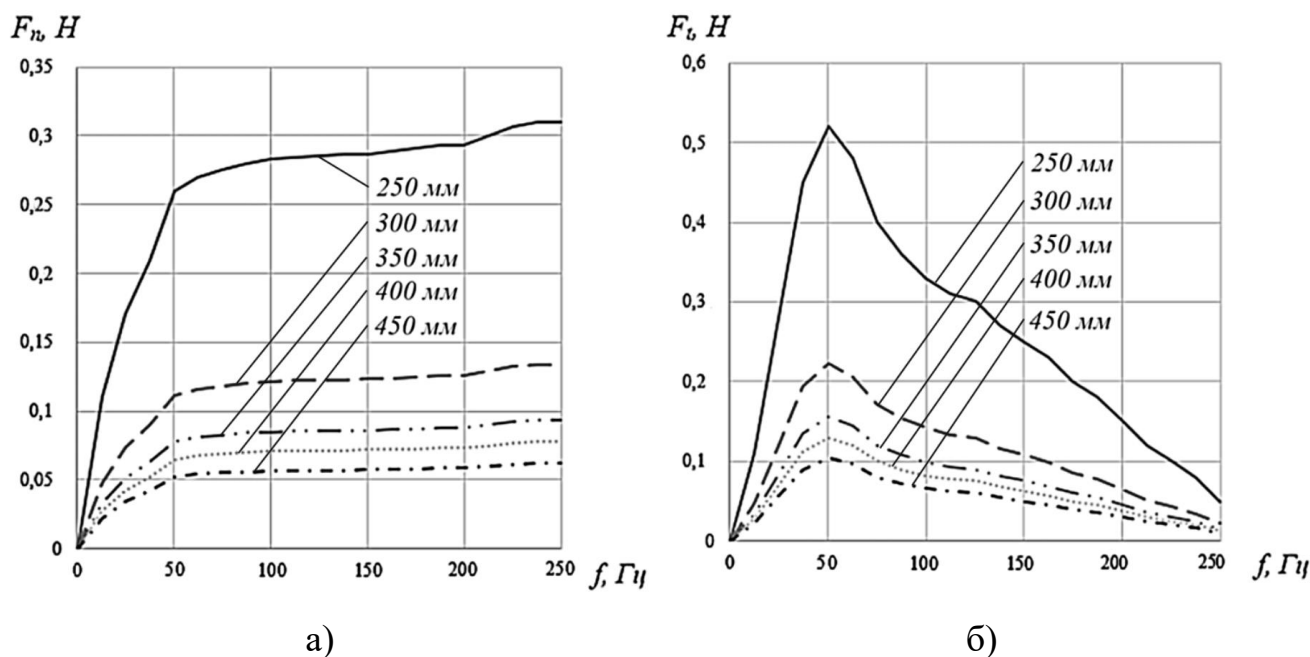


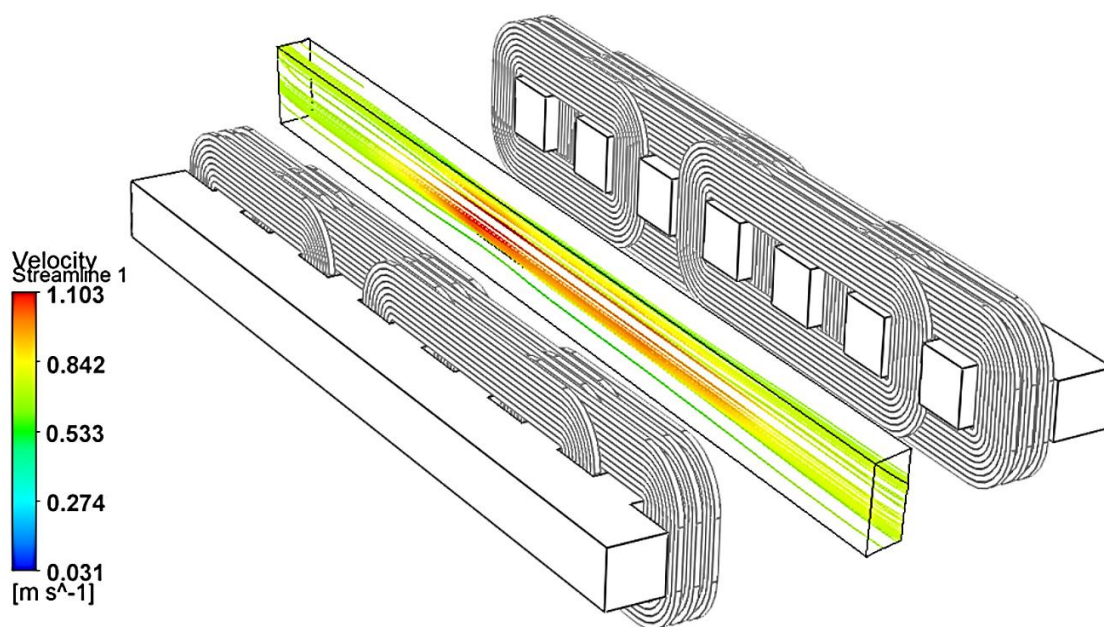
Рисунок 3.9 – Зависимости: а – нормальной; б – тангенциальной составляющей электромагнитных сил от частоты питающего напряжения при различных величинах воздушного зазора

Увеличение воздушного зазора между канальной частью и индукторами МГД-насоса приводит к снижению электромагнитных сил. Минимальная величина

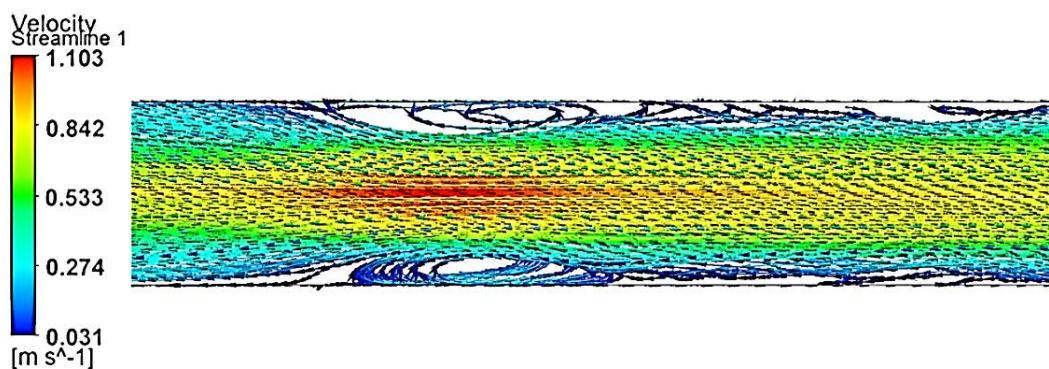
данного зазора зависит от конструкции индукторов и канальной части, а также от толщины футеровочных материалов.

На основании полученных источниковых членов уравнений движения и энергии, в результате решения электромагнитной задачи, выполнен расчет с последующим анализом интегральных и дифференциальных характеристик системы транспортировки жидкого металла.

Силовое действие бегущего электромагнитного поля на эвтектических сплав приводит к его движению. На рисунке 3.10 – а, б, представлены траектории течения с присущими завихрениями. Максимальная скорость располагается в центре канальной части, а нулевая на стенках канала.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Линии течения (а) и векторное распределение скорости расплава (б) в продольном сечении канальной части

Согласно системе уравнений, описывающих термогидродинамические процессы и выражению 3.28, данная модель позволяет дискретно определить температуры различных элементов. В результате были построены графики изменения температур лобовых, пазовых частей обмотки, а также магнитопровода МГД-насоса с течением времени при мощности МГД-насоса 8000 Вт (рисунок 3.17).

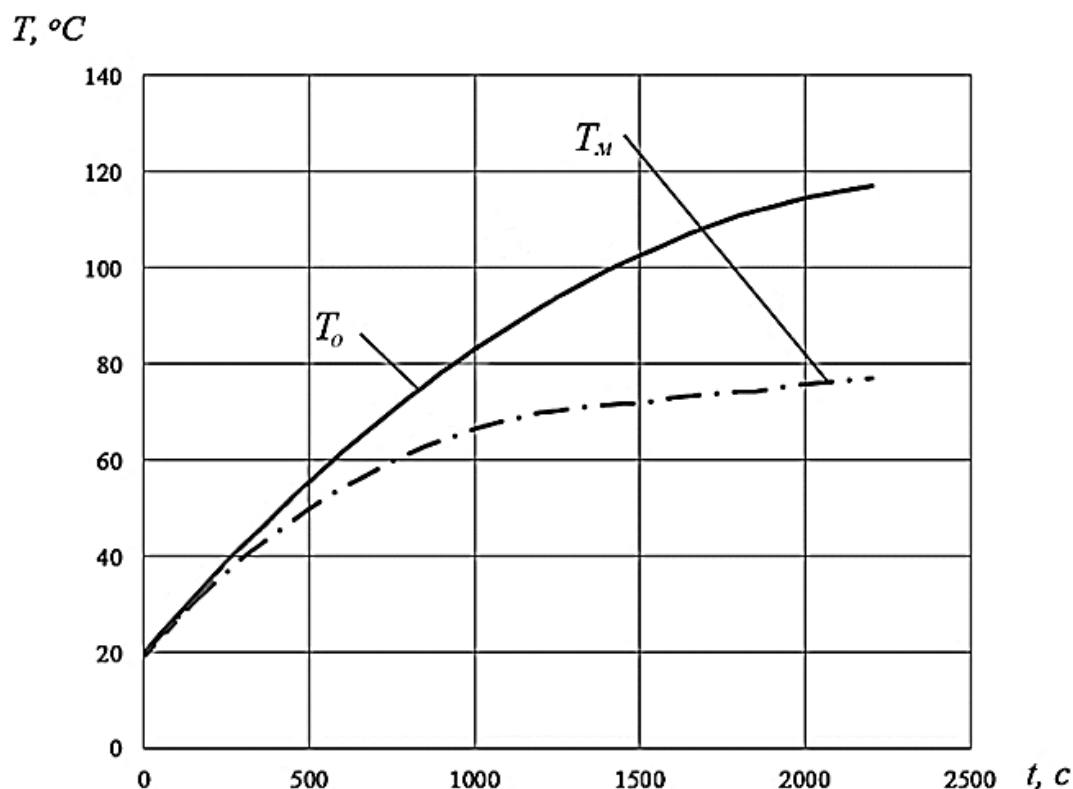


Рисунок 3.11 – Температурные графики обмоток T_o и магнитопровода T_m индукторов МГД-насоса

Исходя из рисунка 3.11 данные температуры превышают нормированные значения для эксплуатации в промышленных условиях, поэтому для охлаждения индуктора МГД-насоса необходимо применить принудительное воздушное охлаждение. Это позволит снизить температуры обмоток, магнитопровода и повысить срок службы МГД-насоса.

Результаты математического моделирования тепловой задачи без принудительного охлаждения представлены на рисунке 3.12 - а, и с принудительным воздушным охлаждением индуктора МГД-насоса с расходом $7000 \text{ м}^3/\text{ч}$ на рисунке 3.12 - б соответственно.

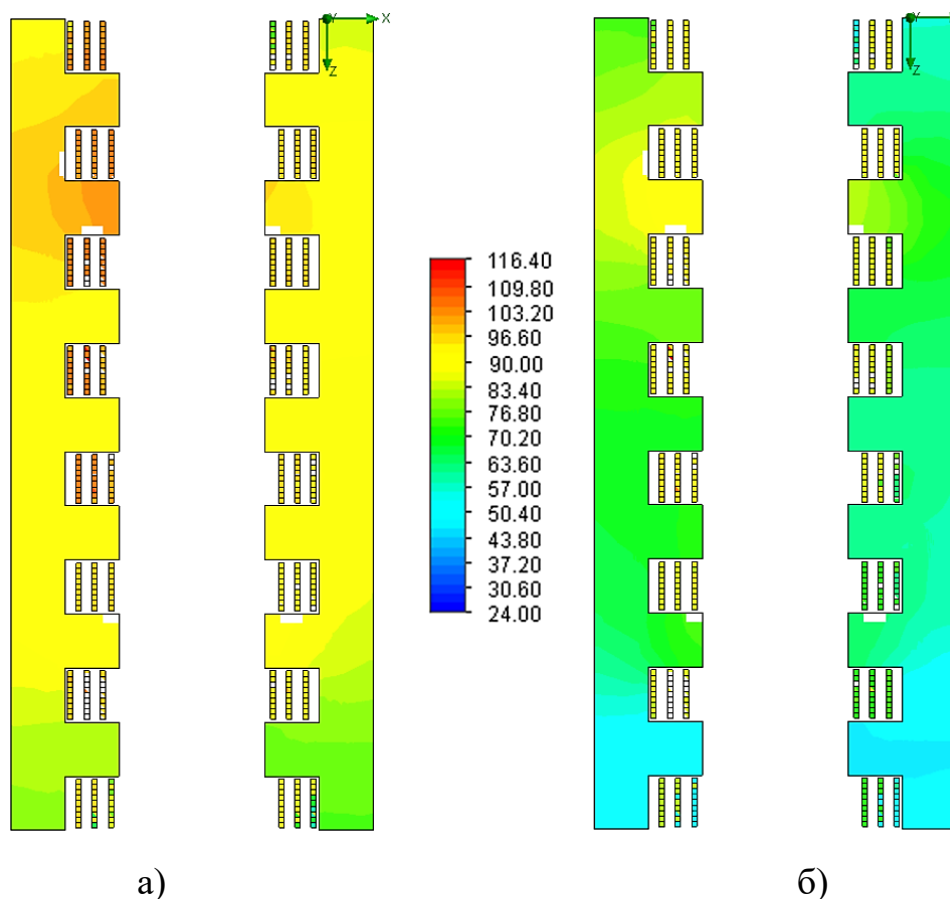


Рисунок 3.12 – Распределение температур индуктора МГД-насоса в продольном сечении при: а – отсутствии принудительного охлаждения; б – с принудительным воздушным охлаждением

Процесс моделирования показывает, что принудительное воздушное охлаждение позволяет серьезно снизить температуры установки, повысив ее срок службы. Средние температуры обмоток и магнитопровода индуктора МГД-насоса снизились на 30% со $103 \text{ }^\circ\text{C}$ и $90 \text{ }^\circ\text{C}$ до $77 \text{ }^\circ\text{C}$ и $63 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

Для определения зависимости давления в канале P от расхода жидкости Q (рисунок 3.13), используется интегральная электромагнитная сила, действующая на жидкий металл в активной зоне канала длиной l_{can} :

$$F_{em} = f_{em} \cdot S \cdot l_{can}, \quad (3.46)$$

где S – площадь прямоугольного сечения канала, m^2 .

Расход Q представляет собой объем жидкости, перекачиваемый в единицу времени, m^3/c . Создаваемое насосом давление P определяется как отношение электромагнитной силы на площадь поперечного сечения канала, H/m^2 , при этом напор H зависит от давления P соотношением:

$$Q = S \cdot u; \quad P = F_{em} / S; \quad H = P / \rho \cdot g. \quad (3.47-3.49)$$

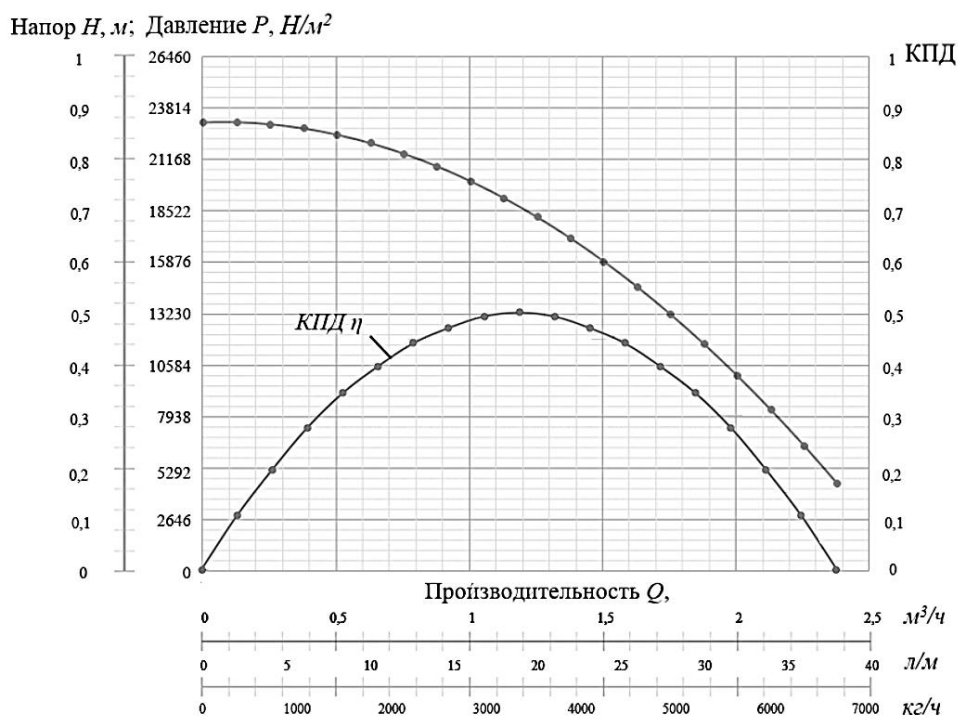


Рисунок 3.13 – Расход-напорная характеристика МГД-насоса

Коэффициент полезного действия МГД-насоса определяется как отношение полезной гидравлической мощности PQ к общей мощности, потребляемой МГД-насосом:

$$\eta = P \cdot Q / UI. \quad (3.50)$$

При развиваемом давлении $16 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ МГД-насос преодолевает гидростатическое давление расплава алюминия (рисунок 3.19) и позволяет поднять его на высоту в 0,6 метра при этом производительность данного МГД-насоса будет составлять 4200 кг/ч. Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности решения поставленной задачи для транспортировки расплава алюминия из плавильной печи в миксер с преодолением разности высот Δh .

3.4 Выводы по разделу

Проверка адекватности аналитической модели была выполнена с помощью численной, что позволяет использовать аналитические выражения при проектировании и определении базовых, размеров, режимов работы и параметров схемы замещения МГД-насосов. Численная трехмерная модель позволяет более подробно проанализировать работу МГД-насосов за счет моделирования гидродинамических процессов и явлений, протекающих в канальной части. Получить распределения полей скоростей и исследовать характер течения жидкого металла в канале МГД-насоса. Сочетание аналитического и численного математического моделирования позволяет ускорить выбор оптимальной конструкции МГД-насоса и провести исследование его электромагнитных и гидродинамических характеристик.

На основании результатов решения электромагнитной и гидродинамической задачи построены зависимости тангенциальной и нормальной составляющих электромагнитных сил от частоты при различных величинах воздушного зазора. При этом максимумы данных характеристик тем выше, чем ближе индуктора располагаются к канальной части.

Проведена оценка влияния ширины магнитопровода на гидродинамические характеристики в канальной части МГД-насоса. Установлено, что при увеличении отношения ширины магнитопровода к ширине канала увеличиваются и скорости с

разностями давлений. Увеличение ширины канала более, чем ширина магнитопровода ($\Delta x > 1$) не позволяет существенно повысить расход расплава в канале. Соответственно оптимальным решением является использование данного коэффициента $1 \div 1,3$.

4. Экспериментальные исследования на физической модели МГД-насоса

4.1 Физическая модель МГД-насоса

Исследования эффективности транспортировки жидкого металла в МГД-насосах металлургического назначения на промышленных образцах имеют определенные сложности, связанные с агрессивными свойствами перекачиваемых сплавов и их высокой температурой. Поэтому целесообразно провести данные исследования на физической модели с низкотемпературными материалами, близкими по свойствам к оригинальным, в определенном масштабе к натуральному прототипу. Данный метод более экономичен и менее трудоемок.

В качестве моделирующего металла использован эвтектический сплав на основе Галлия Ga62 In25 Sn13 (галлий 62%, индий 25%, олово 13%, температура плавления $T_{пл} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$), основные параметры которого представлены в таблице 4.1. Данный сплав имеет близкие к жидкому алюминию динамическую вязкость $\eta_{Al} = 0,001 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$, $\eta_{Эв} = 0,0014 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ и удельное электрическое сопротивление $\gamma_{Al} = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\gamma_{Эв} = 2,72 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Что позволяет сделать вывод о подобии электромагнитных и гидродинамических процессов, протекающих в оригинале и в физической модели МГД-насоса.

Таблица 4.1

Эвтектический сплав на основе Галлия (GaInSt)	
Удельное электрическое сопротивление	$2,72 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Относительная магнитная проницаемость	1
Плотность	$6200 \text{ кг}/\text{м}^3$
Теплопроводность	$25,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

Теплоемкость	364 Дж/(кг · С)
Динамическая вязкость	0,0014 кг/(м · с)

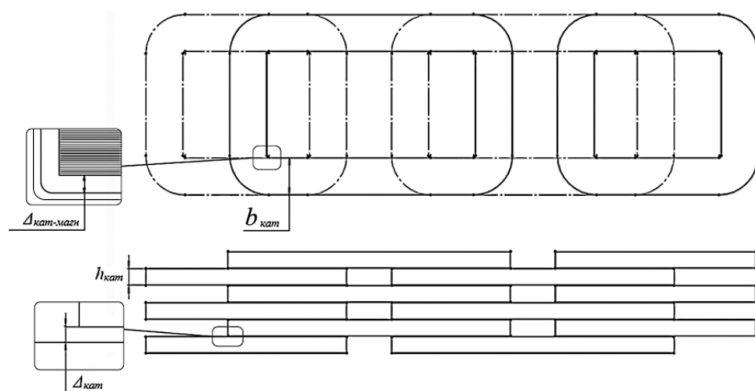
Масштаб можно определить из условия соблюдения подобия оригинала и модели [69].

$$l_o \sqrt{\gamma_o \cdot \omega_o} = l_m \sqrt{\gamma_m \cdot \omega_m}, \quad (4.1)$$

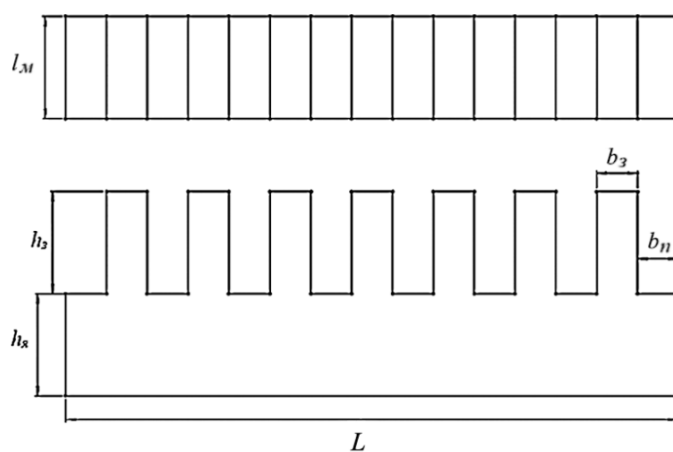
где l_o, l_m – характерные размеры оригинала и модели соответственно, м; γ_o, γ_m – удельные электрические сопротивления расплава в оригинале и расплава в модели, Ом · м; ω_o, ω_m – циклические частоты электромагнитных полей в оригинале и в модели, Гц.

Согласно условию (4.1), при значениях для оригинала $l_o = 1$ м; $\gamma_o = 2,4 \cdot 10^{-7}$ Ом · м; $\omega_o = 2 \pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 = 12,56$ Гц, безразмерный коэффициент добротности для оригинала будет равен $k_o = l_o \sqrt{\gamma_o \cdot \omega_o} = 0,0018$. Для выполнения данного условия необходимо подобрать частоту и радиус модели при заданном $\gamma_m = 2,72 \cdot 10^{-7}$ Ом · м. Частота питающего напряжения для модели принята 50 Гц, что позволяет снизить затраты на ее изготовление и последующее исследование. Соответственно для использования данной конструкции насоса при промышленной частоте придется сохранить относительно большие габариты. При $l_m = 0,3$ м, коэффициент добротности модели будет равен $k_m = l_m \sqrt{\gamma_m \cdot \omega_m} = 0,0019$. Исходя из этого линейный масштаб модели к оригиналу был выбран 1:3.

С учетом выбранного масштаба индуктора МГД-насоса, состоящего из магнитопровода и катушечных секций, его основные геометрические размеры, представлены на рисунке 4.1, а также в таблице 4.2.



а)



б)

Рисунок 4.1 – Геометрия и основные размеры индукторов МГД-насоса

Таблица 4.2

Описание	Обозначение	Значение
Высота зубца	h_z	50 мм
Высота ярма	$h_я$	50 мм
Длина зубца	b_z	20 мм
Длина паза	b_n	20 мм
Ширина магнитопровода	l_M	50 мм
Длина магнитопровода	L	300 мм
Высота катушки	$h_{кат}$	8 мм
Длина катушки	$b_{кат}$	18 мм
Зазор между катушками	$\Delta_{кат}$	1 мм
Зазор между катушкой и магнитопроводом	$\Delta_{кат-магн}$	1 мм

Как отмечалось выше МГД-насос состоит из индукторов и канальной части. Фотография модели индуктора плоского линейного индукционного насоса с перекрещивающимися обмотками представлена на рисунке 4.2. Состоит данное устройство из магнитопровода 1 и обмоточных секций 2.

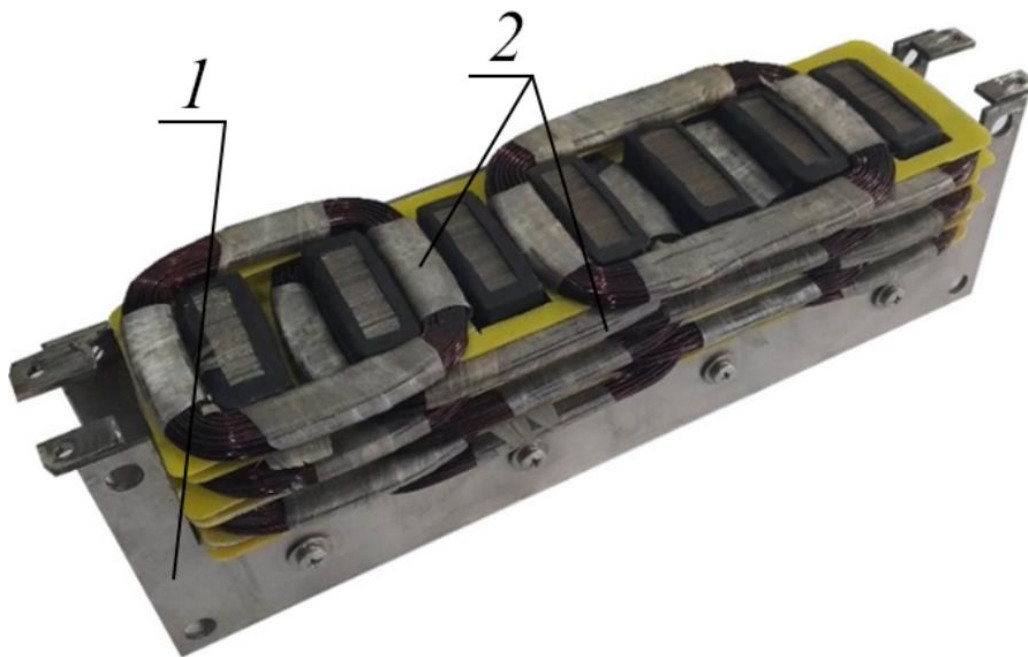


Рисунок 4.2 – Индуктор двустороннего МГД-насоса в сборе

Магнитопровод модели (рисунок 4.3) представляет собой пакет, набранный из 140 пластин листовой, электротехнической стали толщиной 0,35 мм. Изготавливался путем склепывания в пакет и последующей гидроабразивной резки. Для устранения дефектов во время технологического процесса резки между слоями электротехнической стали был нанесен слой масла. Перед стягиванием с помощью специальных щек были добавлены стеклотекстолитовые вставки для изоляции последних от самого пакета магнитопровода.

К магнитопроводу 1 МГД-насоса были добавлены колодки 2 для подключения обмоток согласно схеме включения. С помощью укладки между слоями электроизоляционных материалов (стеклотекстолит, термоусадочная трубка) были установлены катушки индуктора. Фиксация обмоток в индукторе

осуществлена с помощью прижимной пластины из стеклотекстолита толщиной 5 мм.



Рисунок 4.3 – Магнитопровод индуктора МГД-насоса в сборе

Обмотка индуктора состоит из катушек (рисунок 4.4), где в качестве обмоточного провода использовался эмалированный теплостойкий высокопрочный провод ПЭТВ-2 диаметром 1 мм. Температурный индекс провода – ТИ-130. Может эксплуатироваться при температуре окружающей среды от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Намотка осуществлялась механически с помощью намоточного станка на специально-изготовленные формы. Далее полученные обмотки пропитывались лаком с последующим запеканием в печи при температуре $+160\text{ }^{\circ}\text{C}$ для удержания формы.

Полученные катушки укладываются секциями, в каждой из которых два слоя катушек. Каждая секция обмотки состоит из двух катушек, охватывающих по три зубца магнитопровода и размещенных в шести пазах активной зоны индуктора, и две крайние катушки, охватывающих по два зубца магнитопровода. При этом если в одном слое секции часть крайней катушки расположена в пазу вне активной зоны индуктора, то во втором слое секции часть крайней катушки располагается в противоположном пазу вне активной зоны.

Данный конструкционный тип укладки обмоток с воздушными каналами и чередованием слоев по высоте паза позволяет охлаждать ее и выравнять

индуктивное сопротивление фаз. Что сказывается на возможности использовать в кратковременном режиме плотности тока вплоть до 10 А/мм^2 .



Рисунок 4.4 – Катушки МГД-насоса, первый слой

Так как в задачу проектируемого МГД-насоса входил подъем металла на заданную высоту, для более подробной оценки работоспособности МГД-насоса в условиях, приближенных к реальным, были изготовлены 3 вида канальной части. Различные конструктивные исполнения (рисунок 4.5) использованы для построения напорно-расходной характеристики (рисунок 4.5 - а), для исследования максимальной высоты подъема жидкого металла (рисунок 4.5 - б), для моделирования рабочего процесса транспортировки в лабораторной установке системы «миксер - печь» (рисунок 4.5 - в).

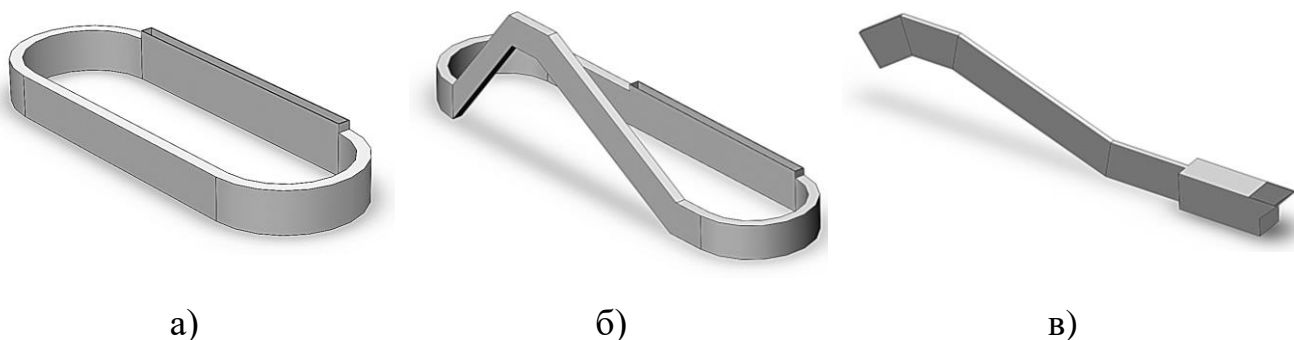


Рисунок 4.5 – Конструктивные исполнения канальной части

Фотографии физических моделей системы транспортировки жидкого металла с различными канальными частями представлены на рисунке 4.6 – а, б и в соответственно.

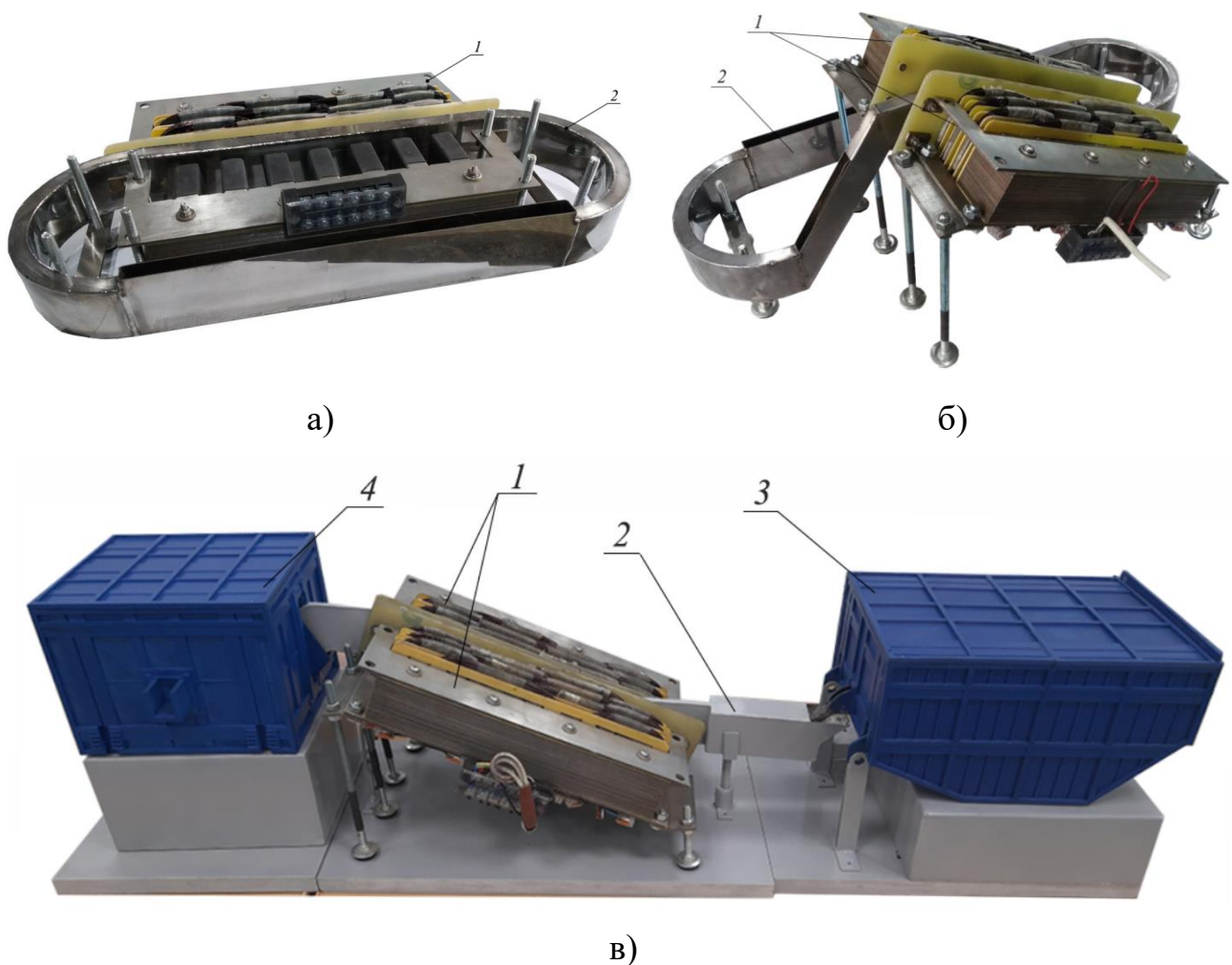


Рисунок 4.6 – Физические модели с различными исполнениями канальной части, где: 1 – индуктора МГД-насоса; 2 – канальная часть; 3 – модель печи переплава; 4 – модель миксера

В качестве источника питания индукторов МГД-насоса использовался трехфазный лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) номинальной мощностью 15 *КВА*. На вход ЛАТРа подается синусоидальное трехфазное напряжение 380 *В*.

На выходе, для измерения энергетических характеристик, устанавливается измерительный комплект К505, который позволяет измерять токи, напряжения и мощности на каждую фазу. Верификация математической модели проводилась с помощью сравнения интегральных характеристик экспериментальной и математическими моделями. Обмотки каждого индуктора соединены в звезду, а обмотки индукторов соединены параллельно. Схема включения обмоток к источнику питания будет иметь вид, представленный на рисунке 4.7.

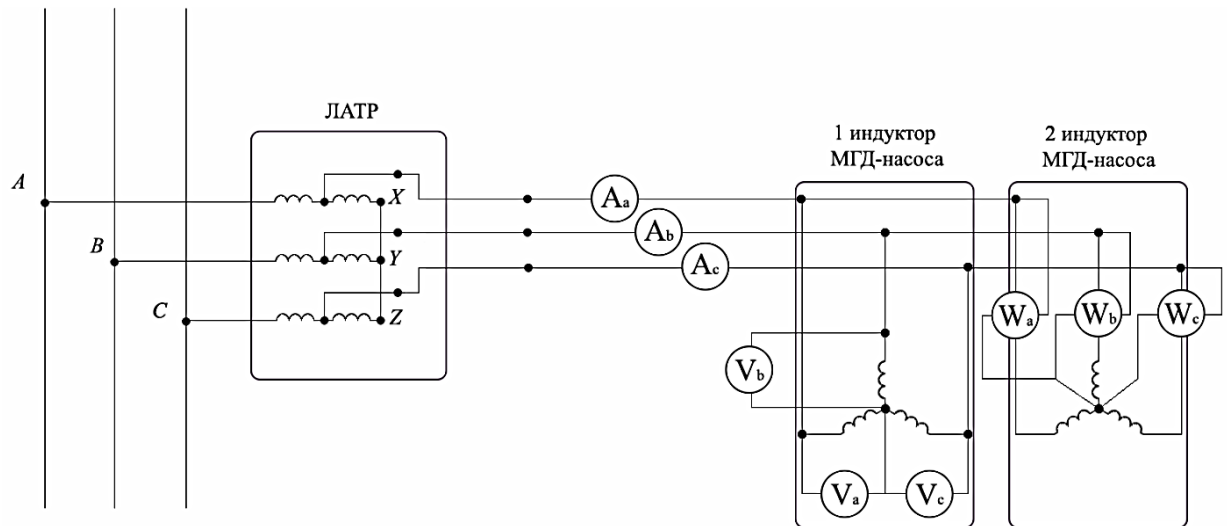


Рисунок 4.7 – Схема подключения обмоток МГД-насоса к источнику питания

Полученные в ходе эксперимента и расчетные интегральные параметры МГД-насоса представлены в таблице 4.1. Измерения проводились по фазным токам с шагом в 5 А. Расчетные данные были получены при помощи разработанной компьютерной модели, описанной в предыдущих главах данной работы. Эксперимент №4 с током в катушках 20 А был выполнен, однако К505 не позволяет измерять токи свыше 15 А, без использования трансформатора тока. Соответственно экспериментальные данные для измерений в таблице 4.1 отсутствуют

Таблица 4.1

Фаза	Экспериментальные данные				Расчетные данные			
	U_{ϕ} , В	I_{ϕ} , А	$P_{\text{инд}}$, Вт	$\cos\varphi$	U_{ϕ} , В	I_{ϕ} , А	$P_{\text{инд}}$, Вт	$\cos\varphi$
1 эксперимент								
А	35	5	46	0,26	34,7	5	44,9	0,259
В	39	5	48	0,24	39,2	5	47,4	0,242
С	83	6	97	0,2	69,5	5	67,7	0,195

2 эксперимент								
A	69	10	183	0,26	69,4	10	179,7	0,259
B	78	10	190	0,24	78,4	10	189,7	0,242
C	139	11	300	0,2	139	10	271	0,195
3 эксперимент								
A	104	15	405	0,26	104,1	15	404,4	0,259
B	120	15	432	0,24	117,6	15	424,8	0,242
C	215	15	645	0,2	208,5	15	609,8	0,195
4 эксперимент								
A	-	-	-	0,26	138,8	20	718,9	0,259
B	-	-	-	0,24	156,8	20	758,9	0,242
C	-	-	-	0,2	278	20	1084,2	0,195

Средние расхождения между экспериментальными и расчетными данными в пределах 5%, что позволяет сделать вывод об адекватности математических моделей и использовать их для дальнейшего проектирования установок с аналогичным конструктивным исполнением.

4.2 Исследование гидродинамических и тепловых процессов в экспериментальной установке и их сравнение с результатами математического моделирования

Верификация математической модели проводилась путем сравнения результатов математического моделирования гидродинамических и тепловых процессов с полученными экспериментальными данными, полученными в результате измерений. Сравнение в гидродинамической части будет осуществляться измерением скоростей жидкого металла, а тепловую задачу будем сравнивать по нагреву металла и обмоточных секций. Измерения скоростей жидкого металла проводилось с помощью ультразвуковых датчиков скорости.

Основные размеры и геометрия исследуемой области канальной части представлены на рисунке 4.8. Ток в индукторах МГД-насоса 15 А, с частотой 50 Гц.

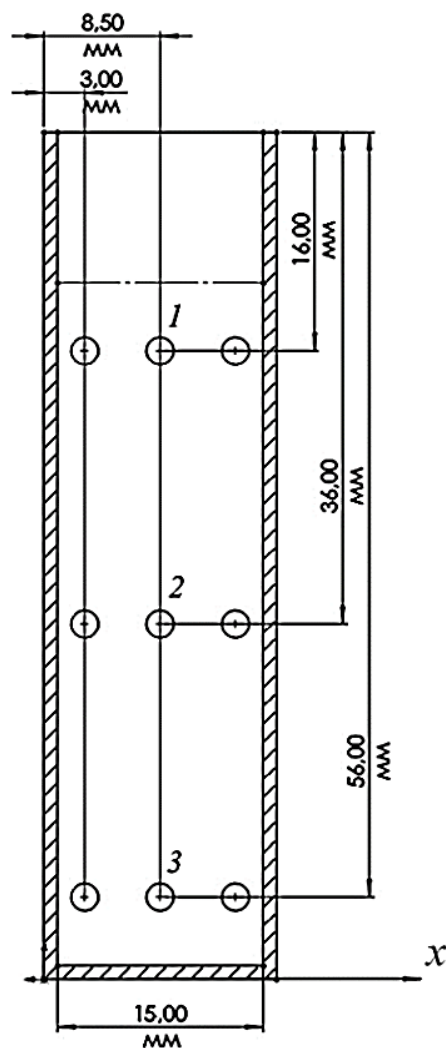


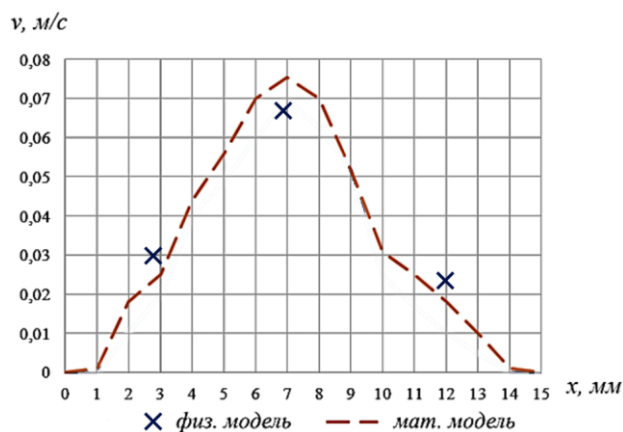
Рисунок 4.8 – Основные размеры и положение контрольных точек

Измерения скоростей проводились в девяти основных точках, расположенных на поверхности расплава 1 в центре 2, и в нижней части канала 3.

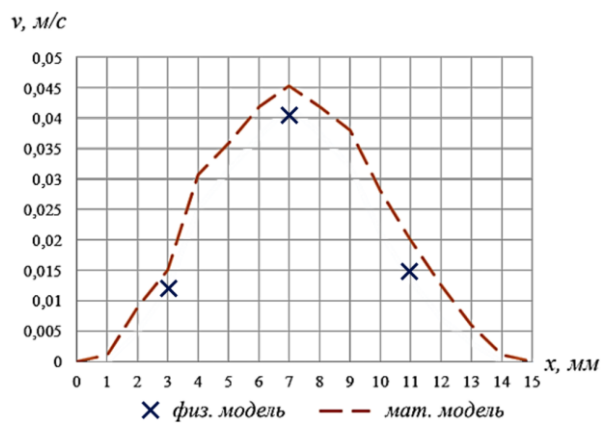
На созданной математической модели, аналогичной по геометрическим и энергетическим параметрам экспериментальной, решена электромагнитная, гидродинамическая и тепловая задачи. Результаты математического моделирования были сравнены с результатами, полученными в ходе эксперимента.

При подключении обмоток МГД-насоса к сети напряжения в обзорном окне видно, как эвтектический сплав резко «вытягивается» из одной части канала в другую. Течение, при этом, имеет несущественные завихрения, а в установившемся режиме принимает ламинарный вид.

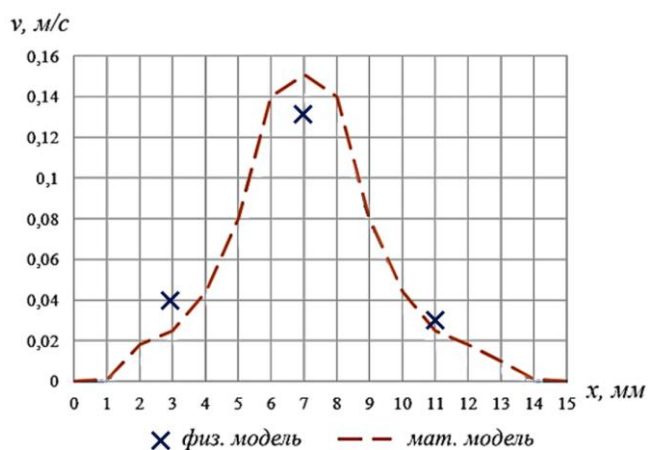
На рисунке 4.9 построены графики распределения осредненной скорости на контрольных точках, где сплошной линией обозначены результаты измерений, а прерывистой результаты математического моделирования.



а)



б)



в)

Рисунок 4.9 – Осредненные во времени значения скорости в контрольных точках:
 а – в верхней части канала; б – в нижней части канала; в – в центральной части
 канала

В результате измерений сравнение результатов показало, что отклонение составляет не более 10%. Однако это не говорит о достоверности полученных результатов предложенной математической модели, так как измерение скорости ультразвуковым датчиком в локальных участках с завихрениями на физической модели достаточно проблематично, ввиду сложного характера течения.

Для проверки адекватности результатов решения тепловой задачи в экспериментальной модели была выполнена процедура измерения температур металла в канале и катушечных секциях. Для измерения использовался цифровой термометр с выносным датчиком температуры, максимально допустимая температура которого 230 °С. Расположение температурных датчиков 3, 4

представлено на рисунке 4.10. Полученные показания температур приведены на рисунках 4.11, 4.12.

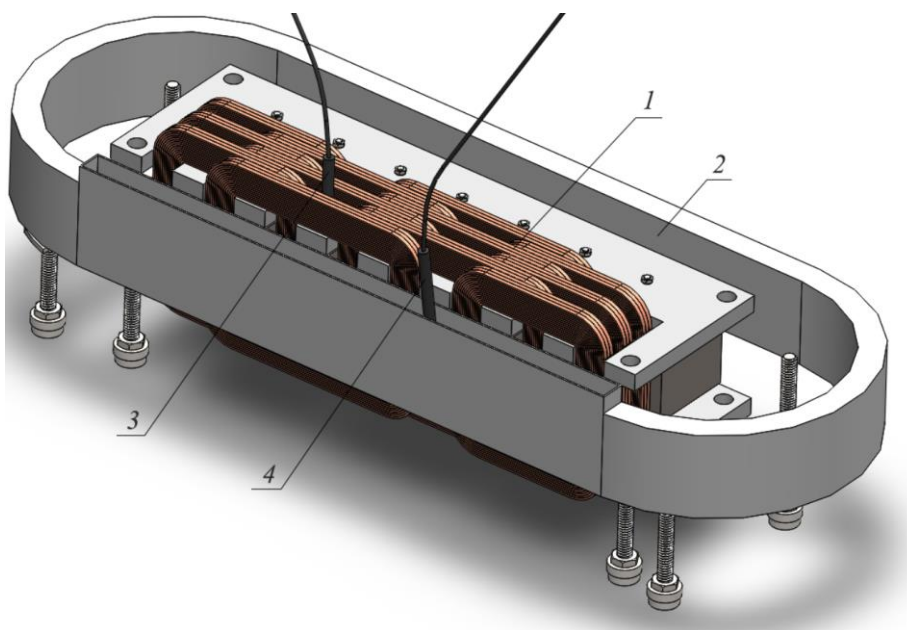
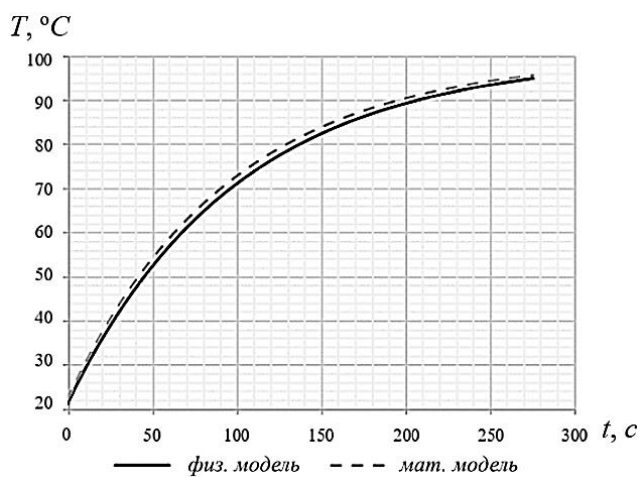
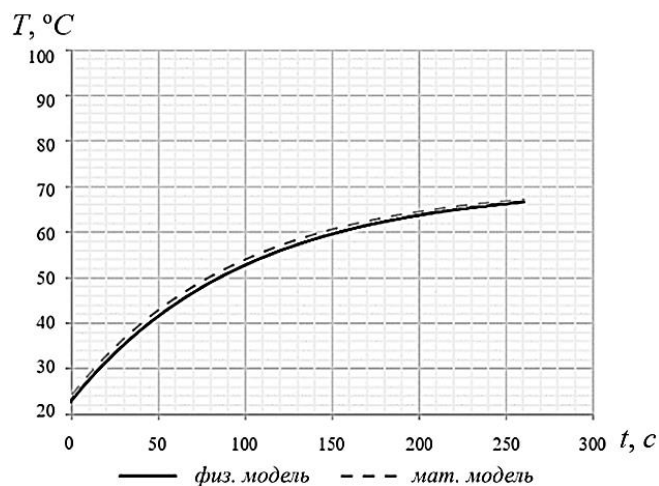


Рисунок 4.10 – Положение температурных датчиков, где: 1 – индуктор МГД-насоса; 2 – канальная часть; 3 – первый температурный датчик; 4 – второй температурный датчик



а)



б)

Рисунок 4.11 – Кривая нагрева обмоток МГД-насоса при токе в обмотке 15 А: а – без применения активного охлаждения; б – с применением активного охлаждения

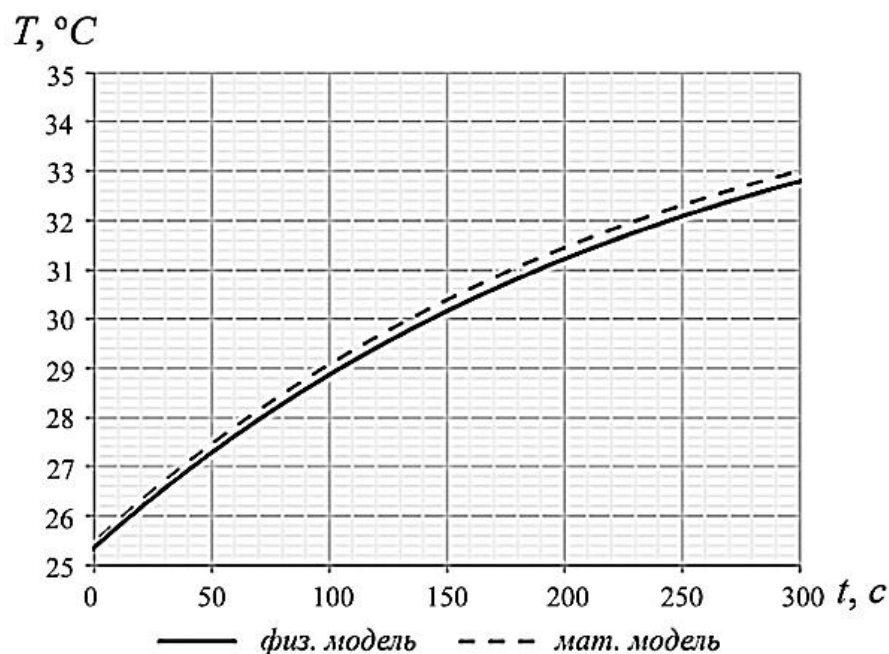


Рисунок 4.12 – Кривая нагрева эвтектического низкотемпературного сплава

Как видно из полученных кривых результаты математического моделирования аналогичны измеренным данным на физической модели. Что доказывает достоверность и адекватность тепловой математической модели МГД-насоса.

4.3. Моделирование подъема жидкого металла с помощью МГД-насоса

Для исследования подъема жидкого металла с помощью МГД-насоса на заданную высоту была построена математическая модель согласно рисунку 4.6 – б. Допущения, материалы и геометрия индукторов приняты аналогично вышеописанным моделям. Далее выполнен гидродинамический расчет с видоизмененным каналом. В ходе решения получено распределение векторного поля скоростей в канале (рисунок 4.13).

Приняв геометрические размеры математической модели постоянными было произведено моделирование при различных углах наклона канальной части, что позволило определить максимальную высоту подъема жидкого металла.

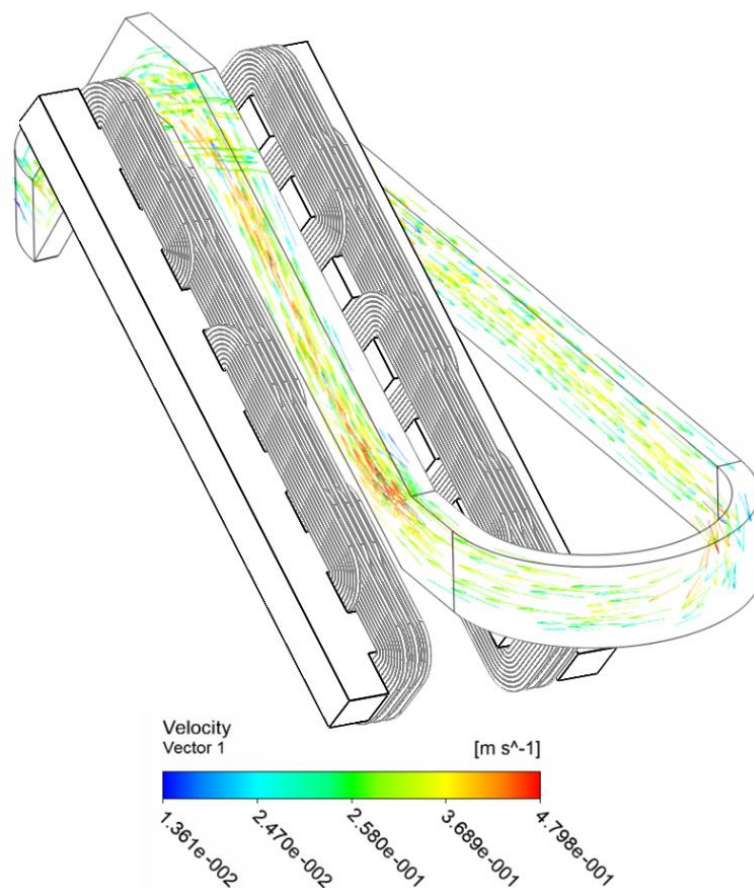


Рисунок 4.13 – Векторное поле скоростей жидкого металла в канальной части

При этом с преодолением гидростатического давления жидкого металла максимально возможный подъем составляет 600 мм, что эквивалентно 30 градусам наклона. Для увеличения высоты подъема жидкого металла необходимо увеличивать длину машины, а также повышать линейную токовую нагрузку в обмотках.

Расположение контрольных точек для измерения скоростей ультразвуковым датчиком сохранились, согласно рисунку 4.8. Однако на данной модели измерения скорости в канальной части проводились не в непосредственной близости к индукторам МГД-насоса, а в противоположной части, где течение принимает более ламинарный вид. Так как в участке рядом с индукторами образуется свободная поверхность жидкого металла, в которой измерение скорости затруднительно. Полученные результаты (рисунок 4.14) также имеют схожий вид и характер, как и в случае плоского замкнутого канала.

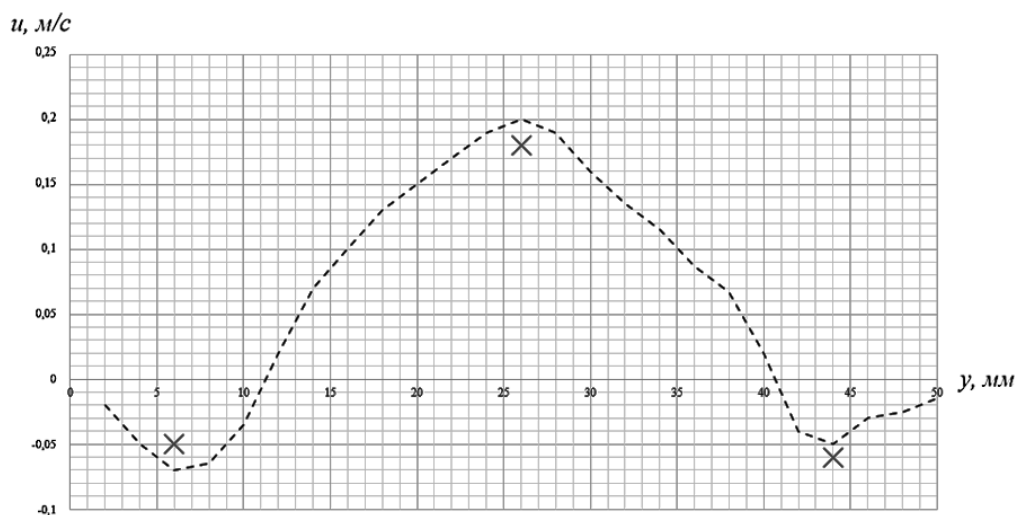


Рисунок 4.14 – График осредненной скорости в центральной части канала по высоте y

Сплошной линией показано распределение скорости расплава в канале физической модели, прерывистой – распределение скорости в математической модели. Максимум скорости также располагается в центральной части канала, что соответствует данным, полученным в предыдущем эксперименте.

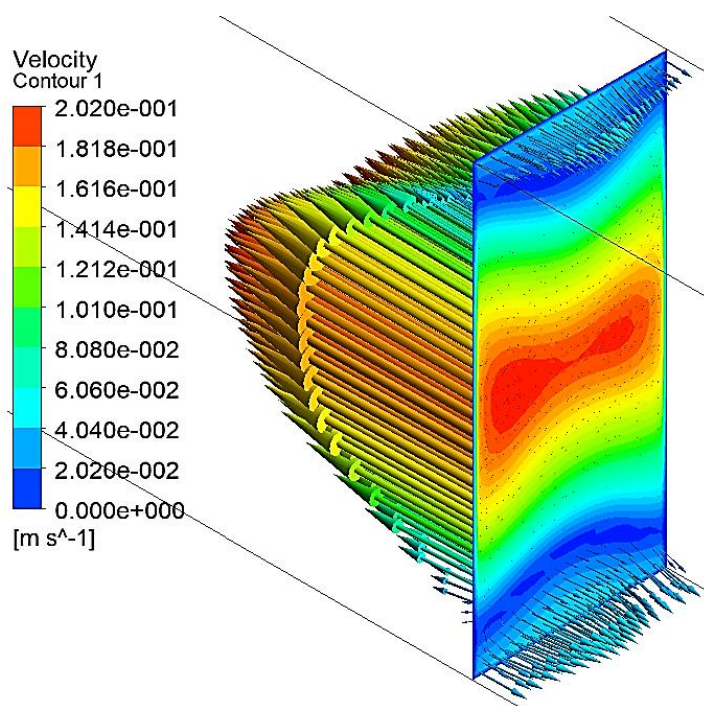


Рисунок 4.15 – Профиль скорости в поперечном сечении канальной части

Сравнение результатов показало, что отклонение величин, полученных в ходе математического моделирования, от экспериментальных данных также не превышает 10%, что говорит о достаточной достоверности получаемых гидродинамических потоков с использованием предложенной математической модели.

4.4 Моделирование рабочего процесса транспортировки жидкого металла из миксера в печь переплава

Как отмечалось выше, больший интерес представляет оценка эффективности данной установки в режиме перекачивания расплава из печи переплава в раздаточный миксер. Для большей наглядности и имитации рабочего процесса системы транспортировки жидкого металла под моделью миксера находится подъемное устройство, позволяющее поднимать и опускать данный элемент установки. Для заливки в миксер и сливания из печи эвтектики в моделях имеются съемные, распечатанные на 3D-принтере пластиковые крышки (рисунок 4.16).



Рисунок 4.16 – Окно для заливки эвтектического сплава в модель печи

На данном комплексе проведен ряд экспериментов при различных токах в индукторах МГД-насоса. Исследования проводились по измерению времени на перекачивание 6 кг (1 л) эвтектического сплава. При токах в обмотках индуктора менее 15 А, в сплаве не создавалось достаточного усилия, чтобы преодолеть гидростатическое давление и соответственно процесс перекачки отсутствовал.

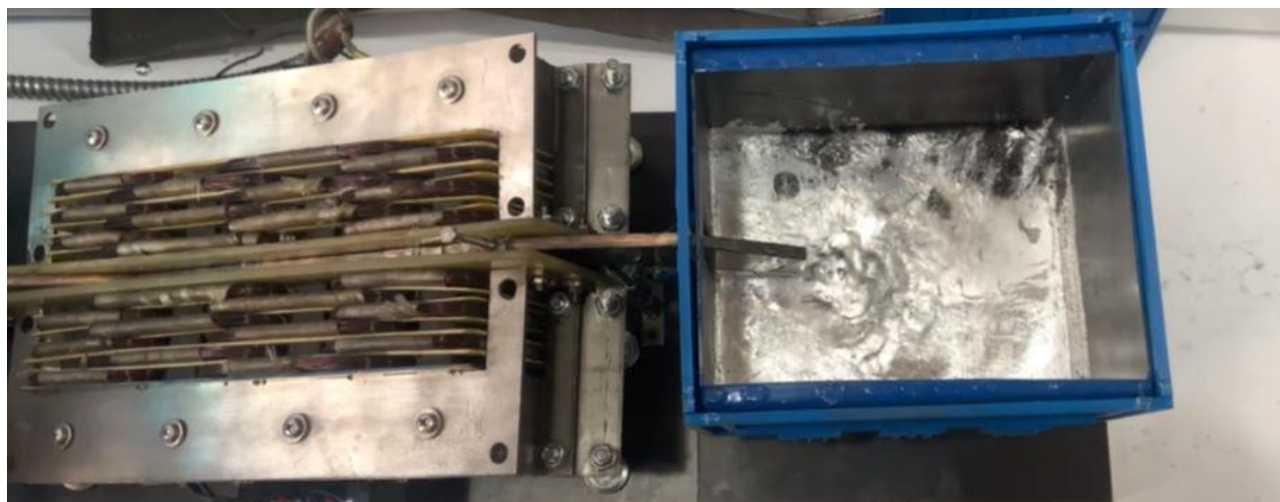


Рисунок 4.17 – Процесс перекачивания эвтектического сплава из модели миксера в модель печи переплава

Минимально возможное время транспортировки 6 кг эвтектического сплава на основе Галлия 15 секунд. Данный результат удалось получить при токе в индукторах 25 А. Однако данный режим использовался кратковременно, так как при увеличении токов обмотки перегревались и требовалось принудительное воздушное охлаждение обмоток.

4.5 Выводы по разделу

При сравнении результатов, полученных в ходе математического и физического моделирования, расхождение между ними составило не более 10%. Соответственно, предложенные электромагнитные, гидродинамические и

тепловые математические модели подходят для получения точных результатов моделирования физических процессов, протекающих в МГД-насосах.

Распределения скоростей жидкого металла в каналах математической и физической моделей схожи по характеру и средним величинам. Средняя разность результатов между моделями равна 10%. Это обусловлено пренебрежением в математической модели конструктивными элементами, такими как щеки для стягивания и шпильки. Также немаловажную роль в разности результатов сыграл коэффициент заполнения пазов. В математической модели данный коэффициент равен 50%, когда в физической модели коэффициент заполнения равен 40% соответственно линейная токовая нагрузка в физической модели несколько ниже, чем в математической.

Результаты же теплового эксперимента получились идентичными в физической и математической моделях. Разность результатов менее 5%, что свидетельствует адекватности построенной тепловой модели. Применение активного воздушного охлаждения позволило повысить величину линейной токовой нагрузки и развиваемое усилие соответственно, однако применение в таком энергетическом режиме крайне ограничено по времени.

Физическая модель позволила верифицировать результаты математического моделирования, что позволяет использовать ее для будущего проектирования опытно-промышленных образцов МГД-насосов.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе анализа существующих конструкций МГД-насосов определены и формализованы требования к плоскому линейному индукционному МГД-наосу, направленные на повышение технологической эффективности его применения в металлургии для транспортировки алюминия и сплавов на его основе. Предложены наиболее перспективные конструкции плоских линейных индукционных МГД-насосов. В частности, конструкция с перекрещивающимися обмотками, позволяющая эффективно охлаждать обмоточные секции, а также выровнять индуктивное сопротивление фаз для улучшения рабочих характеристик МГД-насоса.

2. Разработана аналитическая модель плоского линейного индукционного МГД-насоса, проведен экспресс-анализ электромагнитных характеристик МГД-насоса, определены основные геометрические размеры и параметры схемы замещения, необходимые для выбора источника питания установки.

3. Разработана универсальная параметрическая численная модель и алгоритм расчета, которые на базах программных продуктов ANSYS Multiphysics и SolidWorks позволяют исследовать электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы в плоских МГД-насосах. Модель позволяет создавать геометрию расчетной области, задаваться свойствами материалов и решать электромагнитную, тепловую и гидродинамическую задачи.

4. Подтверждена адекватность аналитической и численной математических моделей путем сравнения с данными натуральных экспериментов на лабораторной установке системы транспортировки низкотемпературных сплавов. Погрешности в сопоставлении электромагнитных характеристик обусловлены допущениями, принятыми в математической и разреженностью конечно-элементной сетки в численных моделях. Совпадение результатов позволяет сделать вывод о правомерности использования данных моделей при проектировании аналогичных установок.

Список использованных источников

1. Losev G., Shvydkiy E., Sokolov I. et al. Effective stirring of liquid metal by a modulated travelling magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. 2019. Vol. 55, no. 1. P. 107–114.
2. Koal, K. Strömungsbeeinflussung in Flüssigmetallen durch rotierende und wandernde Magnetfelder. 2011. URL: http://slubdd.de/katalog?TN_libero_mab215624965.
3. Сарапулов С. Ф. Индукционные магнитогидродинамические машины технологического назначения для электромеханического воздействия на металлические расплавы. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005091119>.
4. Хацаюк М. Ю. Индукционная установка с МГД воздействием на высоколегированные алюминиевые сплавы в процессе их приготовления и разлива // Дисс. канд. техн. наук / Хацаюк Максим Юрьевич. 2013. – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина. URL: https://lib.ideafix.co/rus/inquiry/disser/defence_arch/?dnid=878.
5. Фризен В. Э. Индукционные комплексы для инновационных электрометаллургических технологий // Дисс. докт. техн. наук / Фризен Василий Эдуардович. 2014. – Екатеринбург. Уральский федеральный университет. URL: https://mpei.ru/Science/Dissertations/dissertations/Dissertations/FrizenVE_diss.pdf.
6. Авдулов А. А. Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине // Дисс. канд. техн. наук / Авдулов Антон Андреевич. 2015. – Красноярск. Сибирский федеральный университет. URL: <http://research.sfu-kras.ru/node/11662>.
7. Швыдкий Е. Л., Сокунов Б. А., Бычков А. С., Соколов И. В. Электромагнитное перемешивание кристаллизующегося слитка индуктором с неравномерной линейной нагрузкой // *Вопросы электротехнологий*. 2018. № 1. С. 20–26.
8. Первухин, М. В. Электротехнология и оборудование для получения непрерывнолитых слитков в электромагнитном кристаллизаторе. Теория и

практика. // Дисс. д. техн. наук / 2013. – Новосибирск. Новосибирский государственный технический университет.

9. Сидоров О. Ю., Сарапулов Ф. Н., Бычков С. А., Швыдкий Е. Применение методов конечных элементов и конечных разностей для моделирования кристаллизации расплавов в переменном магнитном поле // Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. 2018. no. 3. P. 80–84.

10. Горемыкин, В. А. Численное и физическое моделирование электромагнитного лотка для транспортировки расплавов алюминия // Дисс. канд. техн. наук / 2015. – Екатеринбург. Уральский федеральный университет. URL: <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=250354&filter=1>.

11. Коняев, А. Ю. Линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями для энергоэффективных технологий // Промышленная энергетика. — 2017. — № 4. — С. 2—7.

12. Losev, G. Adaptation of the linear induction machine power supply to the tasks of liquid metals transportation and mixing // Magnetohydrodynamics. — 2021. — Т. 57, № 1. — С. 85—94.

13. Андреев, А. М. Электромагнитные насосы для основных контуров реакторов на быстрых нейтронах – НИИ электрофизической аппаратуры имени Д. В. Ефремова. Ленинград, 1977 – С. 8.

14. Тамоян, Г. С. Магнитогидродинамические электрические машины и устройства. Учебное пособие по курсу "Специальные электрические машины" – Кафедра электромеханики МЭИ (ТУ), 2004.

15. Тимофеев, В. Н. Применение МГД устройств в металлургии: Учебное пособие по самостоятельной работе – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007 – С. 139.

16. Полищук, В. П. Магнитогидродинамические насосы для жидких металлов / Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К.. – Киев : Наук. Думка, 1989. –256с.

103. Штурман, Г. И. Индукционные машины с разомкнутым магнитопроводом / Г.И. Штурман // Электричество. – 1946. – №10 – С. 35.

17. Лиелпетер, Я. Я. Жидкометаллические индукционные МГД-машины / Я.Я. Лиелпетер. – Рига: Зинатне, 1969. – 246 с
18. Верте, Л. А. Электромагнитный транспорт жидкого металла / Л.А. Верте. – М.: Металлургия, 1965. – 239 с.
19. Огарков, Е. М. Квазитрехмерная теория линейных асинхронных двигателей / Е.М. Огарков. – Пермь: Перм. Гос. Техн. ун-т, 2003. – 240 с..
20. Ricou, R. Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using an incorporated magnet probe / R. Ricaou, C. Vives // - Heat Mass Transfer. - 1982. - Vol. 25. - P. 1579-1588.
21. Бычков, А. В. Трехфазный двухручьевой индукционный магнитогидродинамический насос : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Бычков Алексей Викторович. – Екатеринбург, 2003. – 26с.
22. Сарапулов, Ф. Н. Несимметричные индукционные двигатели с замкнутым и разомкнутым магнитопроводом: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01. / Сарапулов Федор Никитич. – Свердловск, 1982. – 388 с.
23. Велентеенко, А. М. Индукционный перемешиватель алюминиевых расплавов в ковшах. Диссертация на сосискание ученой степени кандидата технических наук. МОРФ. КГТУ. Красноярск – 2004. С. 150.
24. Тир, Л. Л. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах / Л. Л. Тир, М. Я. Столов. - М.: Металлургия. - 1991. - 280 с.
25. Тимофеев, В. Н. МГД технологии в металлургии/ Первухин М. В., Тимофеев С. П., Хацаюк М. Ю. Интенсивный курс Специализация IV. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013 – С. 32.
26. Бааке, Э. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Специализация IV. Издательство "ЛЭТИ", 2013, 250 с.
27. Полищук, В. П. Магнитогидродинамические насосы для жидких металлов / Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К.. – Киев : Наук. Думка, 1989. –256с.
28. Кашманов, И. А. Цилиндрический линейный кондукционный насос. RU Патент № 2526373. H02K44/04 – кондукционные насосы. Общество с ограниченной ответственностью научно-технический центр "АГРО" (ООО НТЦ "АГРО") (RU).

17. Радкевич, Н. А. Винтовой электромагнитный насос. RU Патент № 2106735. H02K44/04 – кондукционные насосы.
30. Тарасов, Ф. Е. Индукционный МГД-насос с одноплоскостной концентрической обмоткой индуктора для транспортировки магния. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Екатеринбург, 2015 – С. 18.
31. Охременко, Н. М. Основы теории и проектирования лнейных индукционных насосов для жидких металлов. М., 1968.
32. Al-Habahbeh, O. M. Review of magnetohydrodynamic pump applications. Al-Saqqa M./ Safi M. / Abo Khater T.. Alexandria Engineering Journal. Volume 55, Issue 2, June 2016, Pages 1347-1358.
34. Ivo, D. Magnetohydrodynamic Pumps with Permanent Magnets for Pumping Molten Metals or Salts. Vaclav Kotlan/ Bohus Ulrych/ Vaclav Valenta. Electroscope Journal.Czech Technical University, Faculty of Electrical Engineering, Praha, Czech Republic. University of West Bohemia, Faculty of Electrical Engineering, Plzen, Czech Republic. ŠKODA JS a. s. (Nuclear Machinery), Plzen, Czech Republic. Ročník 2009. Číslo III.
35. Степанов, А. А. Магнитогидродинамический насос. RU патент № 2 219 645 С2. H02K 44/02. ОАО «Северсталь».
36. Витковский, И. В. Электромагнитный индукционный насос. RU патент № 2 529 521 С1. H02K 44/06. ОАО «НИИЭФА имени Д. В. Ефремова».
37. Тимофеев, В. Н. Патент RU 2 683 596 С9. Индуктор линейной индукционной машины. МПК H02K 41/025 (2006.01). СПК H02K 41/025 (2019.02).
38. Беляев, Е. Ф. Математическое моделирование электромагнитных полей в неоднородных неподвижных средах. Электрические машины и электромашинные системы: Межвуз. сб. научн. тр. / Е.Ф. Беляев. – Пермь.: Политехн. Институт, 1987. – С. 49.
39. Гринберг, Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений, Л.: Издательство АН СССР, Москва, 1948. 727 с.
40. Вилнитиса, А.Я. Концевой эффект в линейных асинхронных двигателях / А.Я. Вилнитиса, М.С. Дриц. – Рига: Зинатне, 1981. – 256с.

41. Сарапулов, Ф. Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учеб. пос. / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 431 с.
42. Dukowicz, J.K. Analysis of linear induction machines with discrete winding and finite iron length / J.K. Dukowicz. – IEEE Ind. Appl. Soc. Milwaukee; New York, 1973. – 250 p.
43. Hartmann, J. Hg-Dynamics II. Experimental investigations on the flow of mercury in a homogeneous magnetic field / J. Hartmann, F. Lazarus // Det Kgl Danske Vid Sels Mat-Fys Medd. — 1937. — Vol. 15, no. 7. — P. 1—45.
44. Hartmann, J. Hg-dynamics I: theory of the Laminar Flow of an Electrically Conductive Liquid in a Homogeneous Magnetic Field / J. Hartmann // Mat. Fys. Medd. — 1937. — T. 15, № 6. — С. 1—28.
45. Вольдек, А. И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л., «Энергия», 1970. – С. 38.
46. Вольдек, А. И. Продольный краевой эффект во вторично цепи линейной индукционной машины. Труды ТПИ, серия А, 1968, №266.
47. Мищенко, В. Д. Технология электромагнитного транспортирования легких сплавов / Мищенко В.Д., Микельсон А.Э., Крумень Ю.К.. – М.: Металлургия, 1980. – 128с.
48. Баранов, Г. А. Расчет и проектирование индукционных МГД-машин с жидкометаллическим рабочим телом / Г.А. Баранов, В.А. Глухих, И.Р. Кириллов. – М. : Атомиздат, 1978. – 248 с.
49. Иванов-Смоленский, А. В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов- Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов, В.А. Кузнецов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
50. Охременко, Н. М. Поперечный краевой эффект в плоских линейных индукционных насосах / Н.М. Охременко // Магнитная гидродинамика. – 1965. – №3. – С. 75.

51. Yamamura, S. Theories of the linear induction motor and compensated linear induction motor. «IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems». 1972, 91. №4, 1700-1710.
52. Тимофеев, В. Н. Электромагнитные вращатели, перемешиватели и дозаторы алюминиевых расплавов: дис. ... д-ра техн. наук. – Красноярск, 1994. – С. 210.
53. Воробьев, Н. Н. Теория рядов. – М.: Наука, 1986, 408 с.
54. Толстов, Г. П. Ряды Фурье. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука». 1980. 382 с.
55. Тимофеев, В. Н. Трехмерная теория линейного асинхронного двигателя с разомкнутыми типами обмоток. ЛПИ им. М. И. Калинина, Л., 1976, 24 с.
56. Тимофеев, В. Н. Теория одностороннего линейного асинхронного двигателя с шихтованным или массивным вторичным магнитопроводом. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н.
57. Тимофеев, В. Н. Анализ электромагнитных процессов магнитогидродинамического перемешивания жидких металлов. Электричество, 2017, № 1, с. 35-44.
58. Копылов, И. П. Численное моделирование линейных асинхронных двигателей высокоскоростных транспортных систем / И.П. Копылов, Е.Ф. Беляев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1977. –№3. – С. 65
59. Хацаюк, М. Ю. Теория и моделирование магнитогидродинамических процессов в электротехнологических комплексах металлургического назначения: дис. ... д-ра тех. наук : 05.09.10 / М. Ю. Хацаюк. — Красноярск, 2019. — 338 с. — URL: https://etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2019/hacayuk/avtoreferat_hacayuk-myu.pdf.
60. MHD forced convection flow in dielectric and electro-conductive rectangular annuli / S. Siriano [и др.] // Fusion Engineering and Design. — 2020. — Т. 159. — С. 111773.
61. Prediction of PbLi fluid flow and temperature field in a thermal convection loop for qualification of fusion materials / Y. Jiang [и др.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2021. — Т. 172. — С. 121198. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793102100301X>.

62. Siriano, S. Numerical Simulation of Thin-Film MHD Flow for Nonuniform Conductivity Walls / S. Siriano, A. Tassone, G. Caruso // *Fusion Science and Technology*. — 2021. — Т. 77, № 2. — С. 144—158.
63. Induced crystallization principle for rapid 3D printing of steel melts / V. B. Oshurko [и др.] // *Magnetohydrodynamics*. — 2018. — Т. 54, № 4. — С. 343—352
64. Doležel, I. Numerical solution of coupled problems using code Agros2D / I. Doležel, P. Karban, F. Mach, P. Kůs, D. Pánek // *Computing*. — 2013. — Volume 95, Issue 1 Supplement. — P 381.
65. Doležel, I. Advanced adaptive algorithms in 2d finite element method of higher order of accuracy / I. Doležel, P. Karban, F. Mach, B. Ulrych // *Source of the Document Studies in Computational Intelligence*. — 2013. — № 483 — P. 293.
66. Azadeh, Shahidian. Effect of Magnetic Flux Density and Other Properties on Temperature and Velocity Distribution in Magnetohydrodynamic (MHD) Pump / S Azadeh // *IEEE transactions on magnetic*. — 2009. — vol. 45, no. 1, — 18 january.
67. Хацаюк, М. Ю. Математическое моделирование процессов литья и кристаллизации алюминиевых сплавов в электромагнитном поле с учетом свободной поверхности жидкого металла / М.Ю. Хацаюк, А.В. Минаков, М.В. Первухин // *Сборник научных трудов международной конференции “Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий «АПЭЭТ-2014»”*. — 2014. — С. 111.
68. Хацаюк, М. Ю. Индукционная установка с МГД-воздействием в процессе приготовления и разливки высоколегированных алюминиевых сплавов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Красноярск. 2013. — 65 с.
69. Lantzsch, R. Experimental and numerical results on the fluid flow driven by a traveling magnetic field // *Journal of Crystal Growth*. — 2007. — Т. 305, № 1. — С. 249—256.
70. Goldsteins, L. Experimental and numerical analysis of behavior of electromagnetic annular linear induction pump: Theses : 2015GREAI047 / Goldsteins Linards. — Universit'e Grenoble Alpes, 2015. — URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01232570>.

71. Abdullina, K. 3D numerical modeling of liquid metal turbulent flow in an annular linear induction pump / K. Abdullina, S. Bogovalov, Y. Zaikov // *Annals of Nuclear Energy*. — 2018. — Янв. — Т. 111. — С. 118—126.
72. Azulay, A. Magnetic field advection in a rotating magnetic field driven flow induced by a non-ideal inductor // *Physics of Fluids*. — 2018. — Т. 30, № 7. — С. 075—104.
73. Logan, D. L. *A first course in the finite element method* / Cengage Learning, 2016.
74. Grossmann, C. *Numerical treatment of partial differential equations*. Т. 154 / Springer, 2007.
75. LeVeque, R. J. *Finite volume methods for hyperbolic problems*. Т. 31 / Cambridge university press, 2002.
76. Smolyanov, I. Calculation of linear induction motor features by detailed equivalent circuit method taking into account non-linear electromagnetic and thermal properties // *Computers and Mathematics with Applications*. — 2019. — Ноябрь. — Т. 78, № 9. — С. 3187—3199.
77. Смольянов, И. А. Верификация пакетов для расчета течений жидкости в канале при действии внешнего магнитного поля // 109 *Вычислительная механика сплошных сред*. — 2021. — Т. 14, № 3. — С. 322—332.
78. Иваницкий, С. В. Моделирование динамических и установившихся режимов ЛАД в FEMLAB. / С.В. Иваницкий, В.А. Дмитриевский // Тр. Всерос. науч.- техн. конф. с междунар. уч. «Актуальные проблемы ресурсо- и энергосберегающих электротехнологий». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – С. 181.
79. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011619131. Программа импорта и интерполяции источниковых членов уравнений движения и энергии для решения 2D-задачи во FLUENT / М. В. Первухин, М. Ю. Хацаюк. – Регистр. 24.11.2011 г.
80. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011619130. Программа импорта и интерполяции источниковых членов уравнений движения и энергии для решения 3D-задачи во FLUENT / М. В. Первухин, М. Ю. Хацаюк. – Регистр. 24.11.2011 г.

81. Тимофеев, В. Н. Электромагнитные вращатели, перемешиватели и дозаторы алюминиевых расплавов: дис. ... д-ра техн. наук. – Красноярск, 1994. – С. 210.
82. Лиелпетер, Я. Я. Жидкометаллические индукционные МГД-машины / Лиелпетер Я.Я. – Рига: Зинатне, 1969. – 246 с.
83. Вольдек, А. И. Электрические машины. Л., «Энергия», 1974. – С. 840.
84. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - М.: ФИЗМАТЛИТ. - 2001. - 736 с.
85. Остроумов, Г. А. Свободная тепловая конвекция в условиях внутренней задачи / Г. А. Остроумов. - М: Гостехиздат. - 1952. - 286 с. 150
86. Гершуни, Г. З. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий. - М.: Наука. - 1972. - 392 с.
87. Гершуни, Г. З. Устойчивость конвективных течений / Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий. — М.: Наука. - 1989. - 320 с.
88. Кравченко, А. Н. Краевые характеристики в задачах электродинамики / А. Н. Кравченко. - Киев: Наукова думка. - 1989. - 224 с.
89. Повх, И. Л. Магнитная гидродинамика в металлургии / Повх И. Л., Капуста А. Б., Чекин Б. В.. – М. : Металлургия, 1974. – 240 с.
90. Лиелаусис, О. А. Гидродинамика жидко-металлических МГД-устройств / Лиелаусис О.А. – Рига: Зинатне, 1967. – 196 с.