

На правах рукописи



**Кижаев Иван Владимирович**

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

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
**Тимофеев Виктор Николаевич**

Официальные оппоненты: **Фризен Василий Эдуардович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Электротехники», заведующий кафедрой;

**Плотников Сергей Михайлович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», кафедра «Автоматизации производственных процессов», профессор.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Защита состоится 20 сентября 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.12, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, корпус №14, ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** 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.

**Степень разработанности темы.** Существенный вклад в создание МГД устройств металлургического назначения сделали отечественные ученые Кирко И. М., Вольдек А. И., Гельгафт Ю. М., Верте Л. А., Сарапулов Ф. Н., Фризен В. Э., Тимофеев В. Н. Среди зарубежных ученых следует отметить авторов Jakovics A., Вааке E., Nаске В., Lupi 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 плавно-литейное производство алюминиевых сплавов, а также вопросов, касаемых увеличения производительности и долговечности МГД-насосов и по сей день остается актуальной задачей.

**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.

**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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи работы, описаны основные результаты, научная новизна и практическая ценность работы, отражены вопросы апробации и достоверности полученных результатов, а также дано краткое содержание работы.

**В первой главе** проведён анализ основных типов устройств МГД-насосов, а также методов их расчета и проектирования; проведен обзор и обоснование выбора конструкции МГД-насоса для перекачивания алюминиевого расплава.

В результате обзора установлено, что разнообразие МГД-насосов металлургического назначения зависит от конкретных задач и факторов. К данным устройствам предъявляются определенные требования, так как они, зачастую, работают при высоких температурах с агрессивными металлами. В связи с большим рабочим зазором магнитный поток в плоских МГД-насосах металлургического назначения значительно слабее, чем в классических аналогах, и, как следствие, токовая нагрузка обмоток в них значительно выше. Поэтому из достаточно широкого спектра конструктивных исполнений МГД-насосов большая их часть не пригодна для использования ввиду специфики эксплуатации. И самыми приемлемыми остаются плоские линейные индукционные насосы с плоскими концентрическими катушками (рисунок 1).

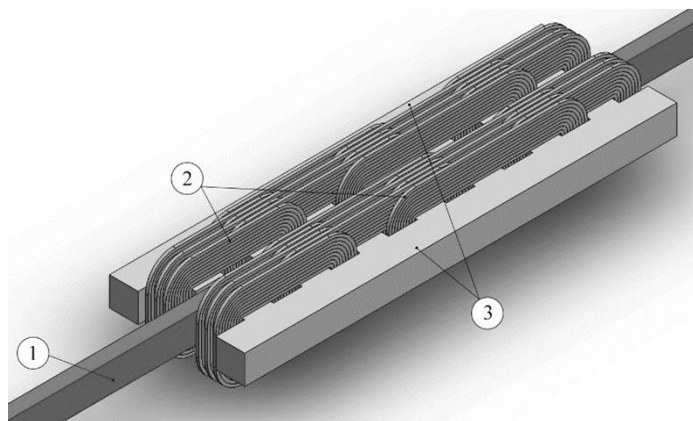


Рисунок 1 – Эскиз МГД-насоса: 1 – канал с жидким металлом; 2 – обмотки; 3 – магнитопроводы

Плоские линейные МГД-насосы имеют различное математическое описание протекающих в них процессов. Каждое из них имеет различия в сложности вычислений и используемых допущений, например, решение задачи по анализу электромагнитного поля проводится при значительном упрощении гидродинамической части. В аналитических моделях жидкий металл представляется как твердое однородное изотропное тело, движущееся относительно системы координат с постоянной скоростью. Это допущение позволяет провести анализ электромагнитного поля, определить геометрические размеры и параметры электрической схемы замещения.

Существуют как одномерные, так и двухмерные аналитические модели МГД-насосов (рисунок 2), однако, несмотря на достоинства одномерной теории, она не может быть применена к анализу электромагнитного поля МГД-насосов металлургического назначения. Для исследования данных машин необходимо использовать, как минимум, двухмерные расчетные модели, предложенные Огарковым Е. М., Соловьевым Г. И., Yamatiga 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.

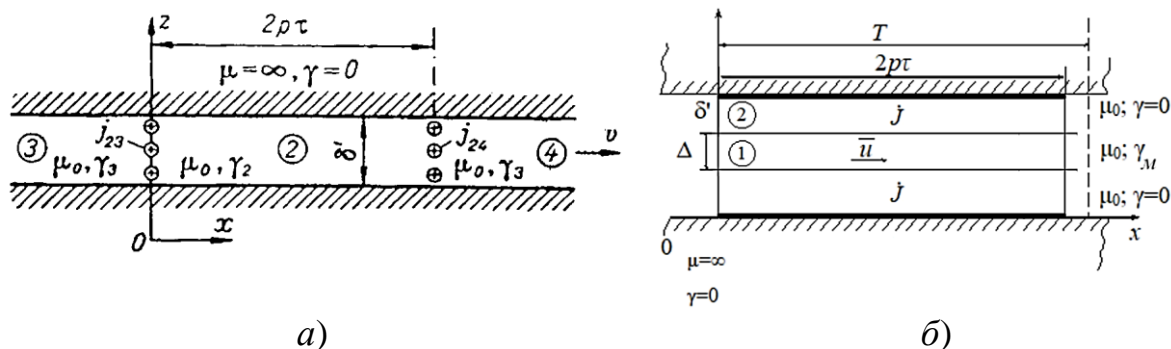


Рисунок 2 – упрощенная расчетная модель плоской линейной машины:  
а – одномерная; б – двухмерная

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

$$j(t, x) = J_m \cos(\omega t - \pi x/\tau), \quad (1)$$

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.

Расчет электромагнитного поля в рассмотренных моделях проводится с использованием конечных интегральных преобразований на основе рядов Фурье, или с использованием бесконечных интегральных преобразований на основе интегралов Фурье.

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 и несимметрии фаз в обмотке. Индукторы МГД-насосов металлургического назначения имеют небольшое количество пазов. В этой связи сопротивления фаз обмотки индуктора МГД-насоса неодинаковы. Поэтому многофазная обмотка индуктора представляет собой несимметричную нагрузку.

Расчетная модель, позволяющая учесть дискретность распределения токовой нагрузки и несимметричность сопротивления фаз в двухмерной постановке, рассмотрена в работах Тимофеева В. Н. (рисунок 3). Данная модель использовалась для описания электромагнитных процессов в МГД-перемешивателях расплава в печи/миксере с односторонним индуктором, и не использовалась для анализа электромагнитных характеристик МГД-насосов для транспортировки жидких металлов.



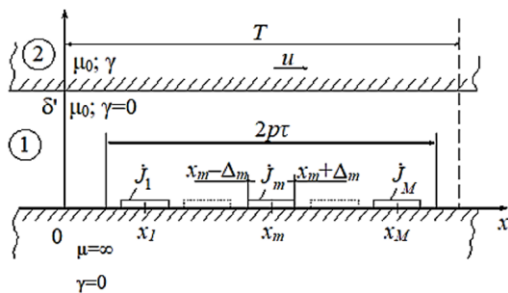


Рисунок 3 – Расчетная модель индуктора линейной индукционной машины с дискретной токовой нагрузкой

Обмотка индуктора представлена в виде бесконечно тонких токовых слоев, расположенных на поверхности сердечника в соответствии с расположением пазов, комплексная линейная плотность тока,  $A/m$ :

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

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

**Во второй главе** предложена аналитическая математическая модель плоского линейного индукционного МГД-насоса с двухсердечниковым индуктором. На рис. 4 представлен 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, с футеровкой 5, внешней обшивкой из стали 3 и жидким металлом 4.

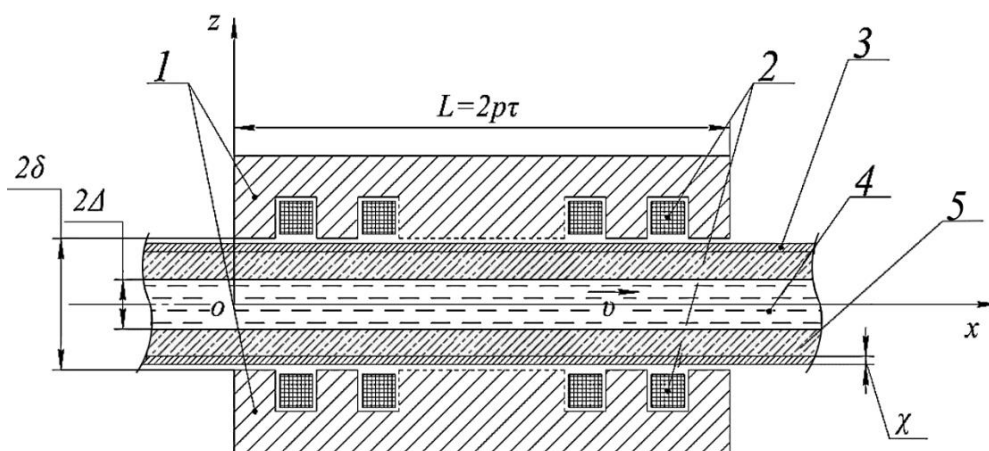


Рисунок 4 – Эскиз двухстороннего МГД-насоса

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.

Для упрощения решения электромагнитной задачи были приняты допущения и в результате получена расчетная модель (рисунок 5)



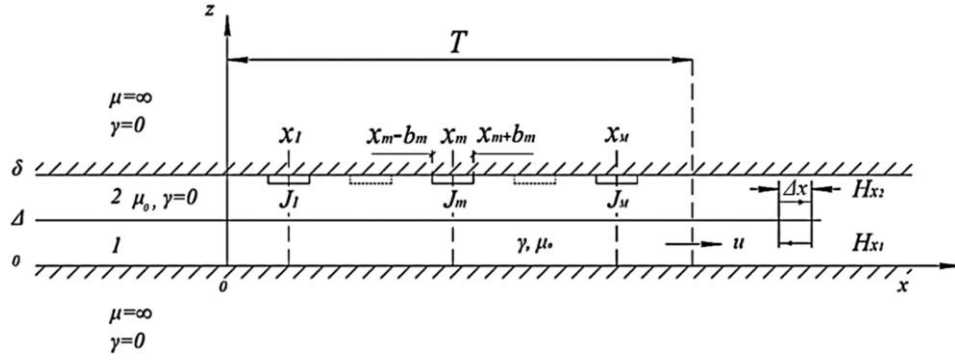


Рисунок 5 – Расчетная модель МГД-насоса:  $x_1-x_M$  – координаты середины  $m$ -ного паза;  $T$  – длина индуктора,  $m$ ;  $b_m$  – половина ширины  $m$ -го паза,  $m$

Решение находится в двух областях:  $(0 \leq z < \Delta)$  и  $(\Delta < z \leq \delta)$ , где  $z$  – высота расчетной области,  $m$ . Для напряженности электрического поля справедливы дифференциальные уравнения:

Для области 1:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_1}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}_1}{\partial x^2} - i\mu_0\gamma\omega\dot{E}_1 - \mu_0\gamma u \frac{\partial^2 \dot{E}_1}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

где  $i = \sqrt{-1}$ ;  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  – магнитная постоянная,  $\text{Гн/м}$ ;  $\gamma$  – удельная электропроводность расплава,  $1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$ ;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота,  $1/\text{с}$ ;  $u$  – скорость движения жидкого металла,  $\text{м/с}$ .

Для области 2:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}_2}{\partial x^2} = 0. \quad (5)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \dot{E}_1}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial \dot{E}_2}{\partial z} \right|_{z=\delta} = \begin{cases} -i\omega\mu_0 \dot{J}_m; & x_m - b_m < x < x_m + b_m, \\ 0 & \end{cases} \quad (6, 7)$$

$$\left. \frac{\partial \dot{E}_2}{\partial z} - \frac{\partial \dot{E}_1}{\partial z} \right|_{z=\Delta} = i\omega\mu_0\sigma\chi E_2, \quad (8)$$

где  $\sigma$  – удельная электропроводность стальной стенки канала,  $1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$ ;  $\chi$  – толщина стенки канала,  $\text{м}$ ;  $x_m$  – координата центра  $m$ -ного паза,  $\text{м}$ . Канал из нержавеющей и немагнитной стали используется для транспортировки низкотемпературных неагрессивных металлов, например свинца, лития, натрия и др.

Дифференциальные уравнения (4), (5) и граничные условия (6)-(8) представляют собой математическую модель МГД-насоса для аналитического метода решения краевой задачи. Подставив постоянные интегрирования в преобразованные граничные условия и решив полученную систему уравнений удалось получить выражения комплексной напряженности электрического поля:

$$\dot{E}_{1n}(x, z) = -i \frac{4\omega\mu_0}{T} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{ch(\varrho_n z)}{k_n Q_n} C_{n1} e^{ik_n x}; \quad \dot{E}_{2n}(x, z) = -i \frac{4\omega\mu_0}{T} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{\theta_n(z)}{k_n^2 Q_n} C_{n1} e^{ik_n x}, \quad (9, 10)$$

где  $Q_n = k_n \operatorname{ch}(\varphi_n \Delta) \operatorname{sh}(k_n(\delta - \Delta)) + G_n \operatorname{ch}(k_n(\delta - \Delta));$  (11)

$$C_{n1} = \sum_{m=1}^M J_m \sin(k_n b_m) e^{-ik_n x_m}; \quad \theta_n(z) = k_n \operatorname{ch}(\varphi_n \Delta) \operatorname{ch}(k_n(z - \Delta)) + G_n \operatorname{sh}(k_n(z - \Delta));$$
 (12, 13)

$$G_n = 2(\varphi_n \operatorname{sh}(\varphi_n \Delta) + \xi A_2 \operatorname{ch}(\varphi_n \Delta)); \quad \xi = i\omega \mu_0 \sigma \chi.$$
 (14, 15)

$$\varphi_n = \sqrt{k_n^2 + i\mu_0 \gamma \omega + ik_n \mu_0 \gamma u \tau}.$$
 (16)

По известным выражениям напряженности электрического поля, определяются составляющие вектора магнитной индукции:

$$\dot{B}_{z1} = -\frac{i4\mu_0}{T} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{\operatorname{sh}(\varphi_n z)}{Q_n} C_{n1} e^{ik_n x}; \quad \dot{B}_{z2} = -\frac{i4\mu_0}{T} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{C_{n1}}{k_n Q_n} \theta'_n(z) e^{ik_n x},$$
 (17, 18)

где  $\theta'_n(z) = P_n \operatorname{sh}(k_n(z - \Delta)) + G_n \operatorname{ch}(k_n(z - \Delta)), \quad P_n = k_n \operatorname{ch}(\varphi_n \Delta).$  (19, 20)

Комплексная электромагнитная мощность, отдаваемая обмоткой индуктора в зазор:

$$\underline{S}_{em} = -2l \sum_{m=1}^M \int_{x_m - b_x}^{x_m + b_x} \dot{E}_2(x, \delta) J_m^* \partial x = \frac{i16\omega \mu_0 l}{T} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{C_{n1} C_{n2}}{k_n^3 Q_n} \theta_n(\delta),$$
 (21)

где  $l$  – ширина индуктора, м;  $J_m^*$  – сопряженный комплекс тока  $m$ -ого слоя, А/м;

$$C_{n2} = \sum_{m=1}^M J_m^* \sin(k_n b_m) e^{ik_n x_m}.$$
 (22)

Электромагнитная сила, действующая на индуктор, в направлении оси  $x$ ,  $H$ , равна интегральной силе, действующей на жидкий металл в активной зоне канала:

$$F_{em} = \operatorname{Re} \left\{ 2l \sum_{m=1}^M \int_{x_m - b_m}^{x_m + b_m} \dot{B}_{z2}(x, \delta) J_m^* \partial x \right\} = \operatorname{Re} \left\{ i \frac{16\mu_0 l}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{C_{n1} C_{n2}}{k_n^2 Q_n} \theta_n(\delta) \right\}.$$
 (23)

Электромагнитная сила создает в канале электромагнитное давление,  $H/m^2$ :

$$P_{em} = F_{em} / 2\Delta \cdot l.$$
 (24)

Зная среднюю скорость расплава в канале  $u$  и электромагнитное давление, развиваемое МГД-насосом, можно построить расход-напорную характеристику, где расход  $Q$ ,  $m^3/ч$ :

$$Q = u \cdot 2\Delta \cdot l.$$
 (25)

Если предположить, что сопротивления фаз обмотки индуктора МГД-насоса одинаковы, то из выражения (21) можно определить:

$$\underline{z}_{em} = \underline{S}_{em} / mI^2; \quad r_F = 2\tau f F_{em} / mI^2.$$
 (26, 27)

При этом сопротивления  $z_{em}$  и  $r_f$  являются элементами последовательной схемы замещения (рисунок б), где  $r_1$  - активное сопротивление фазы обмотки индуктора МГД-насоса;  $x_\sigma$  - индуктивное сопротивление рассеяния;  $x_2$  - главное индуктивное сопротивление.

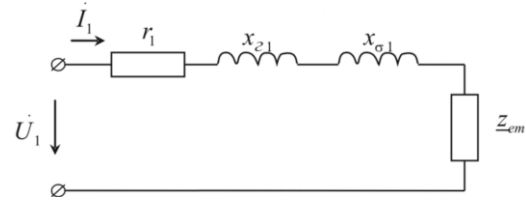


Рисунок б – Последовательная схема замещения

Для удобства, параметры схемы замещения можно привести к безразмерному виду, приняв за базовое – главное индуктивное сопротивление:

$$x_2 = 4\mu_0 2l f m W_1^2 / p . \quad (28)$$

Полученные выражения позволяют определить  $z_{em}$  также для каждой отдельной фазы. При определении  $C_{n1}$  суммирование по  $m$  проводится от  $m=1$  до  $M$ , так как электромагнитное поле создается токами всех пазов обмотки. Определяя  $C_{n2}$  суммирование проводится только по пазам, принадлежащим конкретной фазе. Для рассчитываемого индуктора с перекрещивающимися обмотками  $C_{n2}$  согласно рисунку 7-б определяется для фаз А:  $m = 2, 5$ ; В:  $m = 4, 7$ ; С:  $m = 1, 3, 6, 8$ .

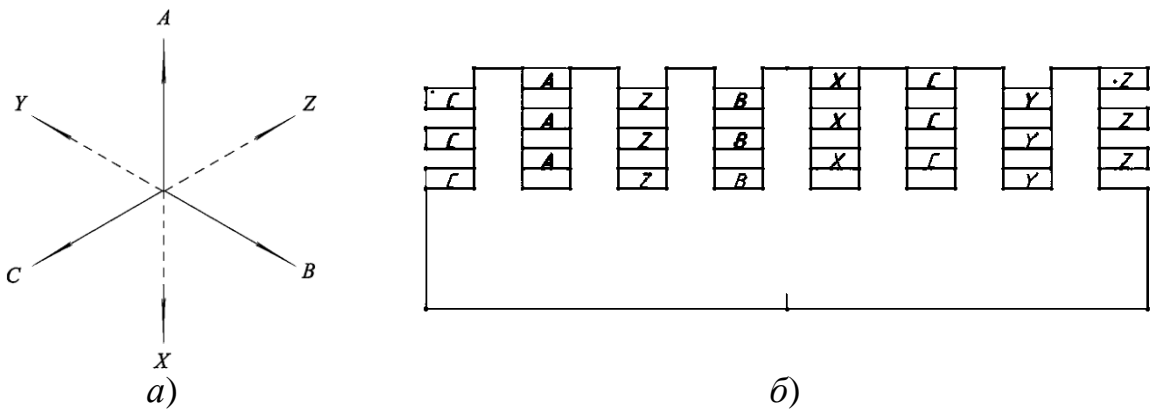


Рисунок 7 – Векторная диаграмма токов (а) и расположение проводников фаз в сердечнике индуктора (б)

Из анализа полученных выражений следует, что безразмерные характеристики индукционной линейной машины определяются следующими параметрами:

1. Количеством пазов  $M$  и их расположением по длине индуктора.
2. Амплитудно-фазовыми характеристиками синусоидальных токов в пазах  $\dot{J}_m = J_m e^{i\Psi_m}$ .  $J_m$  и  $\Psi_m$  – 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 ха-

рактических МГД-насоса. На рисунке 8 представлены зависимости относительных активной мощности  $\hat{P}_{em}$  и реактивной мощности  $\hat{Q}_{em}$  относительно скольжения для различных величин коэффициента добротности  $\varepsilon$ . При  $M = 8$ ;  $J_m = 3 \cdot 10^6 e^{i\psi_m}$ ;  $\Psi_{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8} = 240; 0; 60; 120; 180; 240; 300; 60$ .

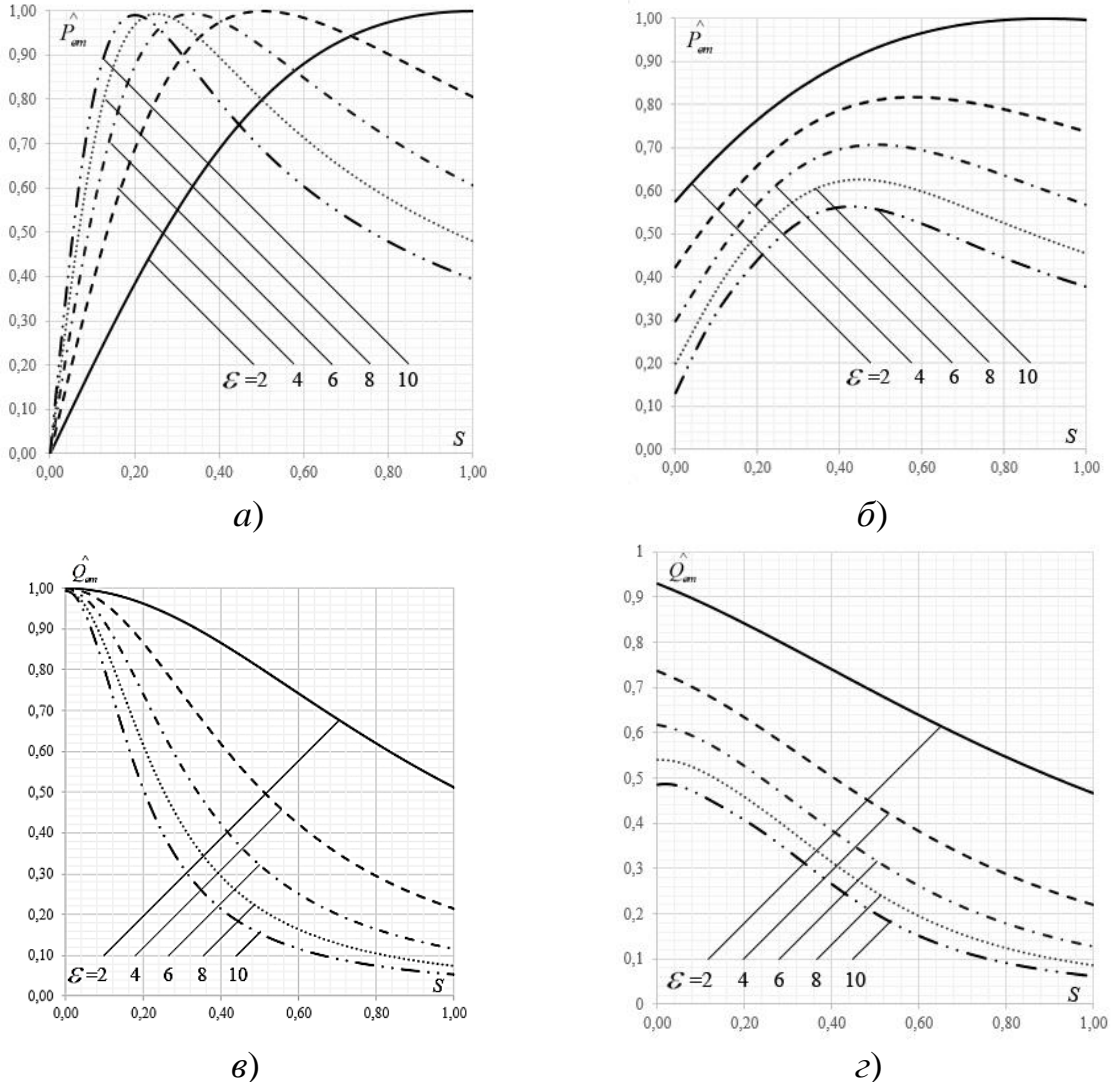


Рисунок 8 – Зависимости относительной: *а* – активной мощности без учета продольного краевого эффекта; *б* – активной мощности с учетом продольного краевого эффекта; *в* – реактивной мощности без учета продольного краевого эффекта; *г* – реактивной мощности с учетом продольного краевого эффекта

На рисунке 8 видно, как продольный краевой эффект приводит к «заваливанию» характеристик и снижению максимальных активной и реактивной мощностей, причем тем больше чем выше коэффициент добротности  $\varepsilon$ .

В заключительной части второй главы для проверки достоверности полученных аналитических выражений в программном комплексе ANSYS Multiphysics создана параметрическая двумерная численная модель системы «МГД-насос – жидкий металл». Модель позволяет задавать основные параметры индуктора МГД-насоса: геометрические размеры, такие как ширина и

высота паза; энергетические параметры, такие как плотность тока, количество пазовых зон и схема включения.

В численной математической модели размеры и свойства для основных областей были приняты аналогичным из аналитической модели. В результате была построена расчетно-сеточная модель системы «индуктор-канал» (рисунок 9).

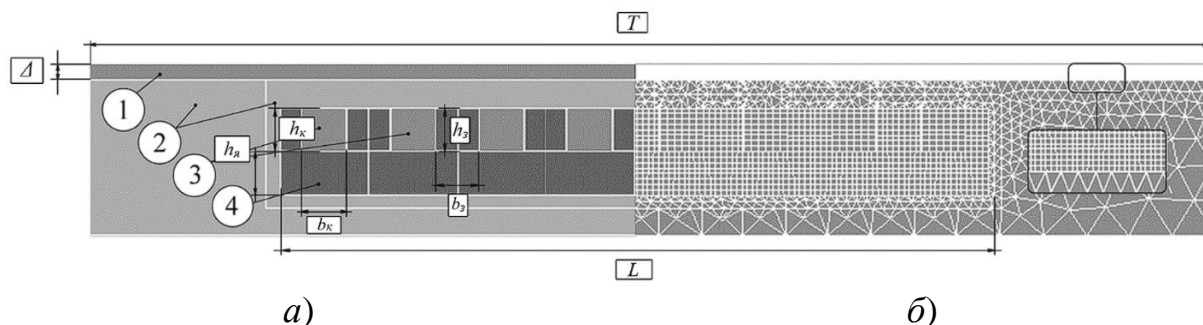


Рисунок 9 – Расчетная (а) и сеточная (б) модель системы «индукционный МГД-насос – рабочее тело»: 1 – канал с жидким металлом; 2 – воздушный зазор; 3 – катушки; 4 – магнитопровод

На рисунке 10 приведены распределения зависимости относительных активной и реактивной мощностей от скольжения в аналитической и численной моделях, где сплошной линией показаны величины, полученные численным способом, а штриховой – результаты аналитического решения при аналогичных для аналитической модели параметрах.

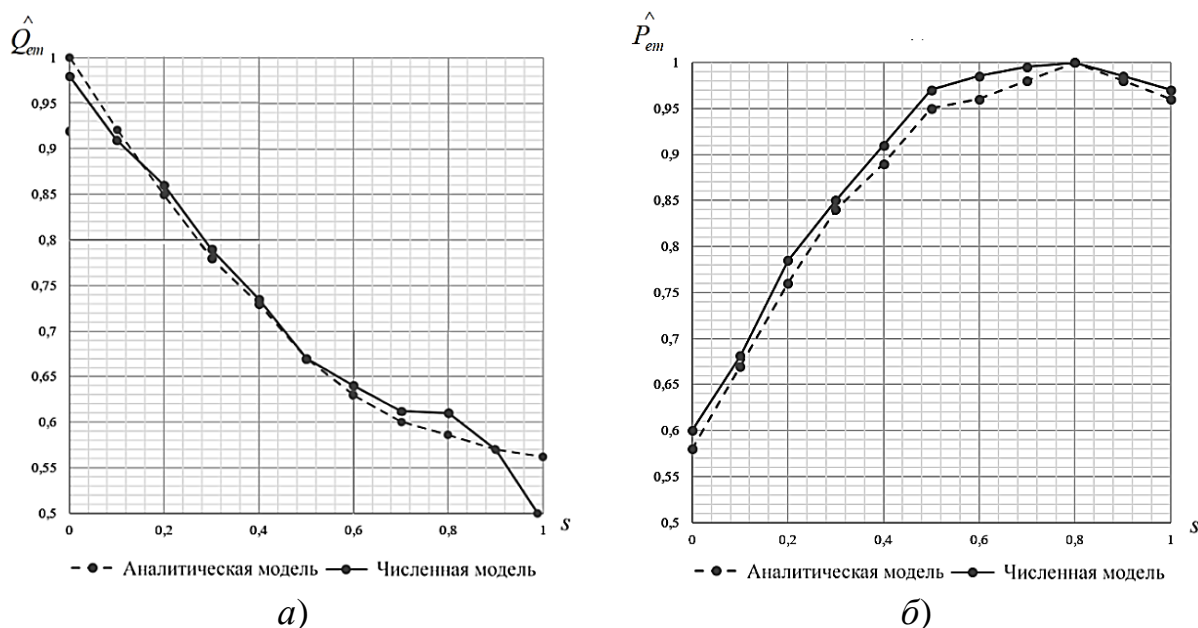


Рисунок 10 - Зависимость относительных: а – реактивной мощности; б – активной мощности от скольжения при коэффициенте добротности  $\varepsilon = 2$

Полученные геометрические размеры и параметры схемы замещения МГД-насоса позволяют сформировать требования к источнику питания. Совпадение расчетных зависимостей подтверждает достоверность полученных аналитических выражений и правомерность их использования при определении электромагнитных характеристик МГД-насоса.

**В третьей главе** для уточнения геометрических размеров индуктора и режимов его работы проведены электромагнитный, гидродинамический и тепловой расчеты в трехмерной постановке. Определены безразмерные коэффициенты, позволяющие дать предварительную оценку электромагнитных и гидродинамических процессов, протекающих в канальной части МГД-насоса.

Электромагнитная задача сводится к решению системы уравнений (29-31) для комплексного векторного магнитного потенциала  $\dot{A}$ , с граничными условиями (32, 33):

$$\nabla^2 \dot{A} = -\mu_a \dot{\delta}; \quad \nabla \dot{\delta} = 0; \quad \dot{\delta} = -\gamma j \omega \dot{A} + \bar{v} \times (\nabla \times \dot{A}); \quad (29-31)$$

$$A_{n2} = A_{n1}; \quad A_{\tau 2} / \mu_0 \mu_2 = A_{\tau 1} / \mu_0 \mu_1, \quad (32, 33)$$

$\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;  $\dot{\delta}$  – вектор комплексной плотности тока, А/м<sup>2</sup>;  $\bar{v}$  – вектор скорости, м/с;  $\nabla$  – оператор набла.

Термогидродинамические процессы можно описать системой уравнений для несжимаемой жидкости, состоящей из уравнения сохранения массы (34), движения (35) и энергии (36):

$$\nabla \bar{u} = 0; \quad (34)$$

$$(\partial \rho_0 \bar{u} / \partial t) + \nabla (\rho_0 \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho(T) \bar{g} + \bar{f}_{эм}; \quad (35)$$

$$(\partial \rho_0 h / \partial t) + \nabla (\rho_0 \bar{u} h) = -\nabla (\lambda \nabla T) + q_{эм}, \quad (36)$$

где  $p$  – давление, Па;  $\bar{\tau}$  – тензор вязких напряжений;  $h$  – энтальпия, Дж/кг;  $T$  – температура, °С;  $\bar{f}_{эм}$  – удельная электромагнитная сила, Н/м<sup>3</sup>;  $q_{эм}$  – удельная Джоулева энергия, Вт/м<sup>3</sup>.

Проведена предварительная оценка характера гидродинамических процессов через безразмерные критерии подобия гидродинамики и магнитной гидродинамики. Число Гартмана  $Ha$  характеризует отношение электромагнитных сил к вязким, Число Рейнольдса  $Re$  характеризует отношение инерционных сил к вязким:

$$Ha = B_0 \sqrt{\gamma / \eta} l_0 = 60000; \quad Re = \rho_{ал} v_0 l_0 / \eta = 1250000, \quad (42)$$

где магнитная индукция  $B_0 = 1$  Тл; удельная электрическая проводимость алюминия  $\gamma_{ал} = 3,6 \cdot 10^6$  1/(Ом · м); динамическая вязкость алюминия  $\eta = 0,001$  кг/(м · с); характерный размер  $l_0 = 1$  м; плотность алюминия  $\rho_{ал} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>; характерная скорость  $v_0 = 0,5$  м/с.

Полученные значения показывают, что электромагнитное поле оказывает существенное влияние на движение расплава, и режим течений, будет иметь турбулентный характер. Соответственно для будущего решения необходимо использовать модели турбулентности. В результате принятых условий построена геометрия расчетной модели МГД-насоса с количеством элементов = 111976 (рисунок 11).

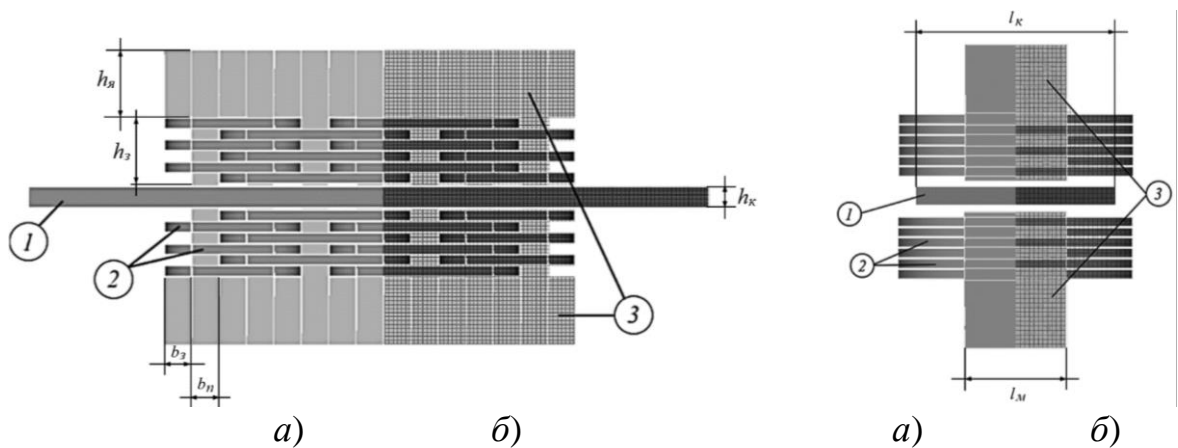


Рисунок 11 – Расчетная (а) и сеточная (б) модель МГД-насоса: 1 – канал с жидким металлом; 2 – катушки; 3 – магнитопроводы

Решение электромагнитной задачи позволяет уточнить геометрические размеры сердечника исходя из распределения в нем магнитной индукции. В ходе решения электромагнитной задачи определена высота ярма и средние значения магнитной индукции в зубцах. Получены картины распределения магнитной индукции (рисунок 12) в магнитопроводах при плотности тока  $\delta = 6 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ . В номинальном режиме средняя магнитная индукция в зубцах близка к 1 Тл, в ярме среднее значение индукции составляет 0,7 Тл.

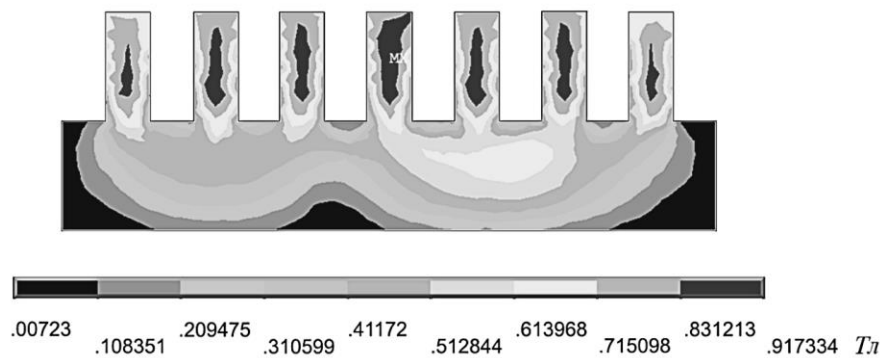


Рисунок 12 – Распределение магнитной индукции в магнитопроводах двухстороннего индуктора

С помощью модуля экспорта полученных данных в программном продукте ANSYS CFX и численного моделирования в трехмерной постановке решена гидродинамическая задача. Получена картина векторного распределения электромагнитных сил в продольном сечении канала (рисунок 13) и скоростей расплава (рисунок 14).

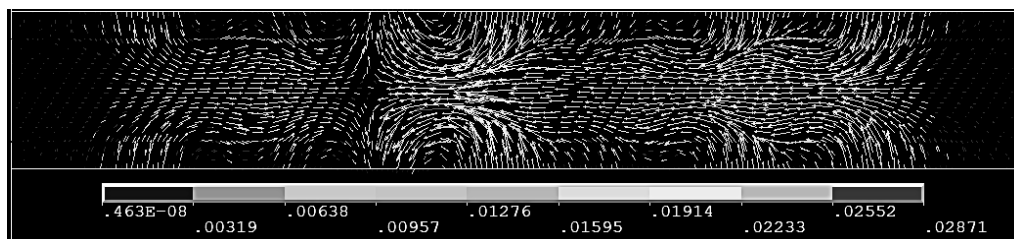


Рисунок 13 – Векторные поля электромагнитных сил в продольном сечении канала



На рисунке 14 представлена картина распределения скорости в продольном течении канала. Рядом со стенками возникают обратные потоки металла, которые образуются за счет сложных контуров токов, обусловленных поперечным краевым эффектом. Поперечный краевой эффект описывает вихревую природу вторичных токов, которые вызывают помимо тяговой составляющей еще и силы сжатия или растяжения.

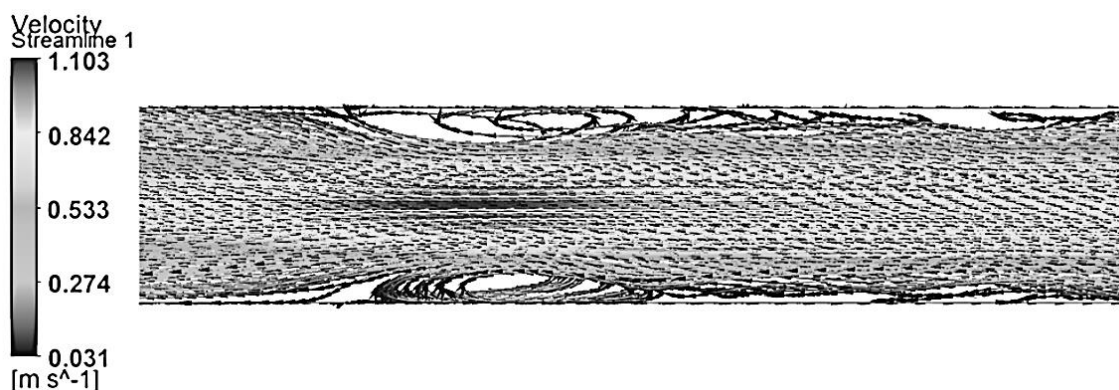


Рисунок 14 – Векторное распределение скорости расплава в продольном сечении канальной части

Проведено исследование возможности подъема расплава с помощью МГД-насоса на высоту  $\Delta h$ , эквивалентную напору  $H$ . Для этого, с сохранением длины машины, изменялся наклон индуктора МГД-насоса вместе с канальной частью. Для определения зависимости давления в канале  $P$  от расхода жидкости  $Q$  (рисунок 15), используется интегральная электромагнитная сила, действующая на жидкий металл в активной зоне канала длиной  $l_{can}$ .

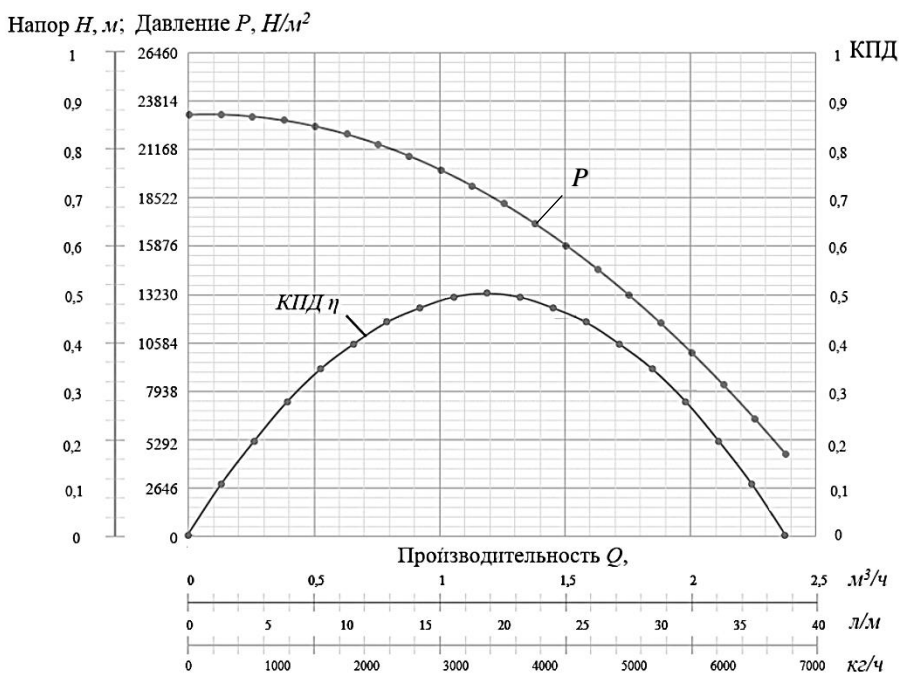


Рисунок 15 – Расход-напорная характеристика МГД-насоса

При развиваемом давлении  $16 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$  МГД-насос преодолевает гидростатическое давление расплава алюминия и позволяет поднять его на высоту в 0,6 метра при этом производительность данного МГД-насоса будет составлять  $4200 \text{ кг/ч}$ . Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности преодоления разности высот  $\Delta h$ .

Согласно системе уравнений, описывающих термогидродинамические процессы, данная модель позволяет определить распределение температуры в МГД-насосе. На рисунке 16 представлены распределения температур индукторов МГД-насоса без и с использованием принудительного воздушного охлаждения, при значении плотности тока  $\delta = 6 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ .

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  $103^\circ\text{C}$  и  $90^\circ\text{C}$  до  $77^\circ\text{C}$  и  $63^\circ\text{C}$  соответственно.

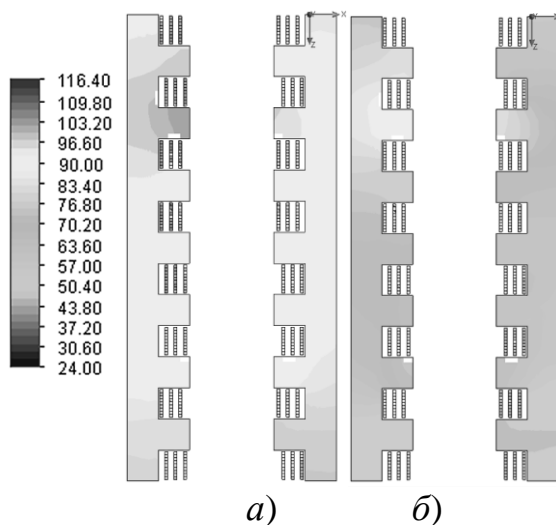


Рисунок 16 – Распределение температур индуктора МГД-насоса в продольном сечении

**В четвёртой главе** представлены результаты экспериментальных исследований на физической модели МГД-насоса.

Модель изготовлена в масштабе 1:3, с учетом критериев подобия физической модели. Индуктор МГД-насоса представлен на рисунке 17. Состоит данное устройство из магнитопровода 1, обмоточных секций 2 и конструктивных элементов, сохраняющих положение обмоточных слоёв.

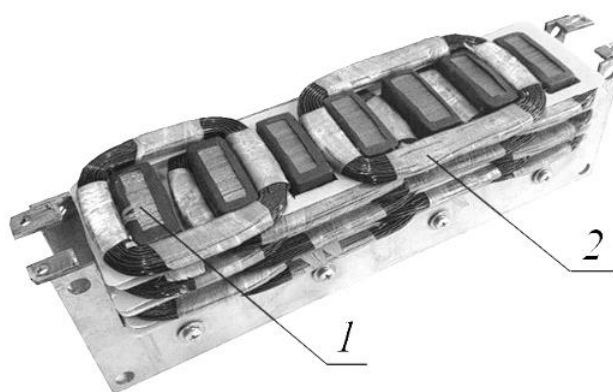


Рисунок 17 – Индуктор двустороннего МГД-насоса

Обмотки укладываются по две на один слой с чередованием согласно схеме (рисунок 18). Данный конструкционный тип укладки обмоток с воздушными каналами и чередованием слоев по высоте паза позволяет хорошо охлаждать ее и выравнять индуктивное сопротивление фаз.

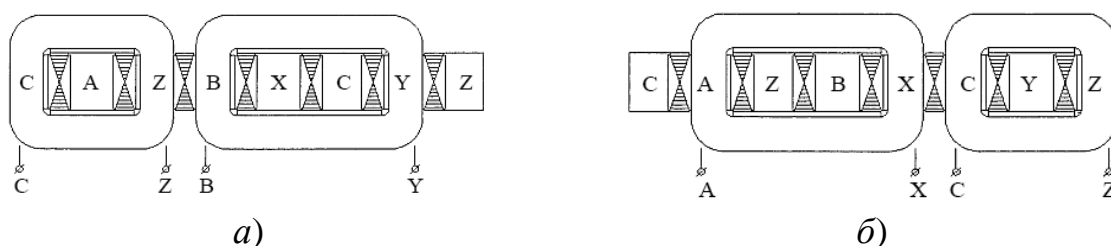


Рисунок 18 – Схема включения секций трёхфазной обмотки, каждая секция состоит из двух слоёв: *а* – верхний слой; *б* – нижний слой

Модель системы транспортировки металла представлена на рисунке 19 и состоит из моделей печи переплава и миксера, а также МГД-насоса с каналной частью для транспортировки низкотемпературного эвтектического сплава.

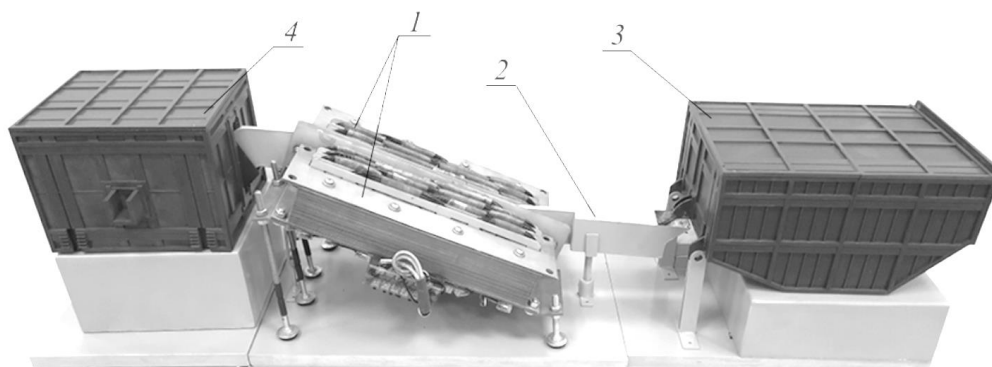


Рисунок 19 – Физическая модель системы транспортировки низкотемпературного расплава: 1 – индуктор МГД-насоса; 2 – каналная часть; 3 – модель печи переплава; 4 – модель миксера

В качестве источника питания индуктора МГД-насоса используется 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, состоящий из измерителя напряжения, тока и мощности. Обмотки каждого односердечникового индуктора соединены в звезду, и включены параллельно. Схема включения обмоток к источнику питания представлена на рисунке 20.

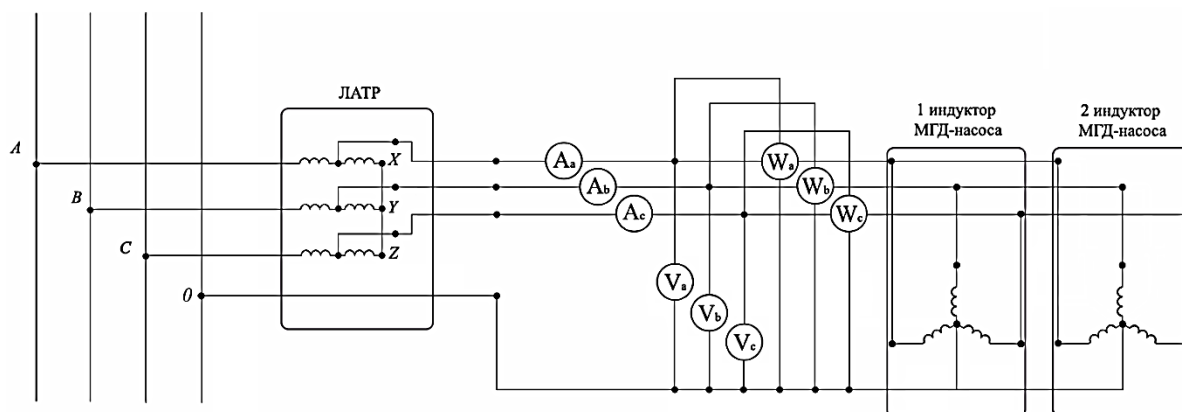


Рисунок 20 – Схема подключения обмоток МГД-насоса к источнику питания

Для верификации математической модели измерены интегральные характеристики МГД-насоса. Полученные в ходе эксперимента и расчета данные представлены в таблице 1. Измерения проводились по фазным токам с шагом в 5 *А*.

Для проверки адекватности решения тепловой задачи проведены измерения температуры катушек с помощью цифровых температурных датчиков с последующим сравнением с результатами математического моделирования. Полученные данные сведены к графикам, представленным на рисунке 22.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных и расчетных измерений

Фаза	Экспериментальные данные				Расчетные данные			
	$U_{\phi}$ , В	$I_{\phi}$ , А	$P_{\phi}$ , Вт	$\cos\varphi$	$U_{\phi}$ , В	$I_{\phi}$ , А	$P_{\phi}$ , 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								
А	69	10	183	0,26	69,4	10	179,7	0,259
В	78	10	190	0,24	78,4	10	189,7	0,242
С	139	11	300	0,2	139	10	271	0,195
3 эксперимент								
А	104	15	405	0,26	104,1	15	404,4	0,259
В	120	15	432	0,24	117,6	15	424,8	0,242
С	215	16	645	0,2	208,5	15	609,8	0,195
4 эксперимент								
А	-	-	-	0,26	138,8	20	718,9	0,259
В	-	-	-	0,24	156,8	20	758,9	0,242
С	-	-	-	0,2	278	20	1084,2	0,195

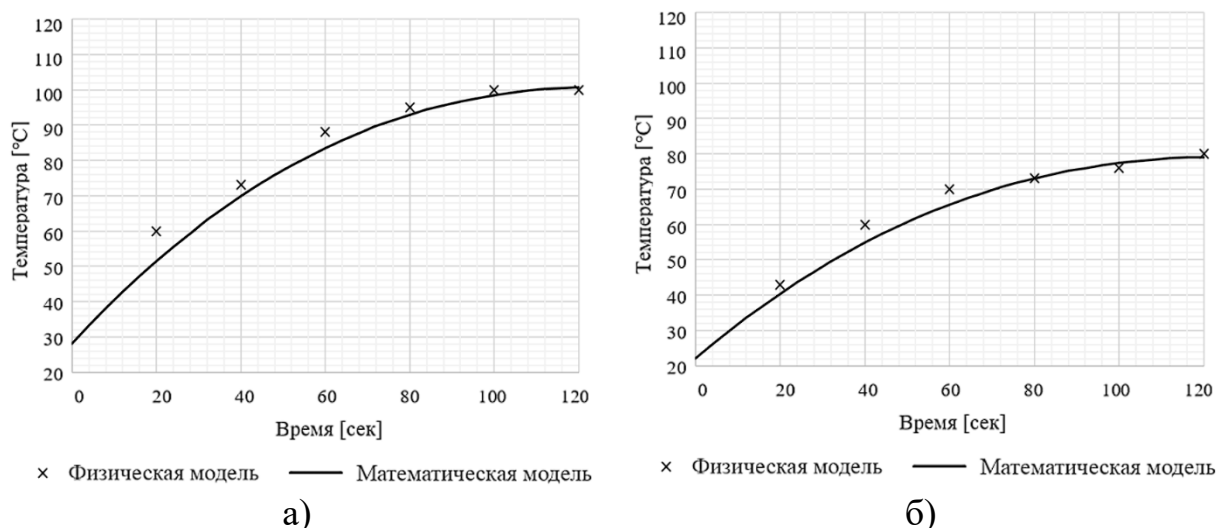


Рисунок 21 – Кривая нагрева обмоток МГД-насоса при плотности тока  $\delta = 20 \text{ А/мм}^2$ : а – без применения активного охлаждения; б – с применением активного охлаждения

Исследование гидродинамических процессов и верификация построенной модели в экспериментальной установке проводились путем измерения скоростей движения расплава в канале на экспериментальной установке и математической модели. Основные размеры и геометрия исследуемой области канальной части представлены на рисунке 22. Ток в индукторах МГД-насоса 15 А, с частотой 50 Гц.

Измерения скоростей проводились в девяти основных точках, расположенных вблизи расплава 1 в центре 2, и в нижней части канала 3. На рисунке 23 приведена картина профиля скорости в поперечном сечении канала. Рас-

хождение результатов измерения осредненных скоростей обусловлены сложностью измерения скорости в областях с высокой турбулентностью и множественными завихрениями.

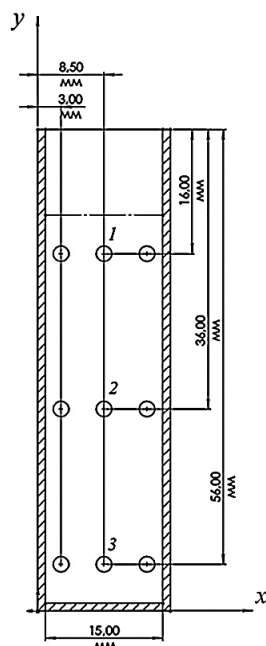


Рисунок 22 – Основные размеры и положение контрольных точек

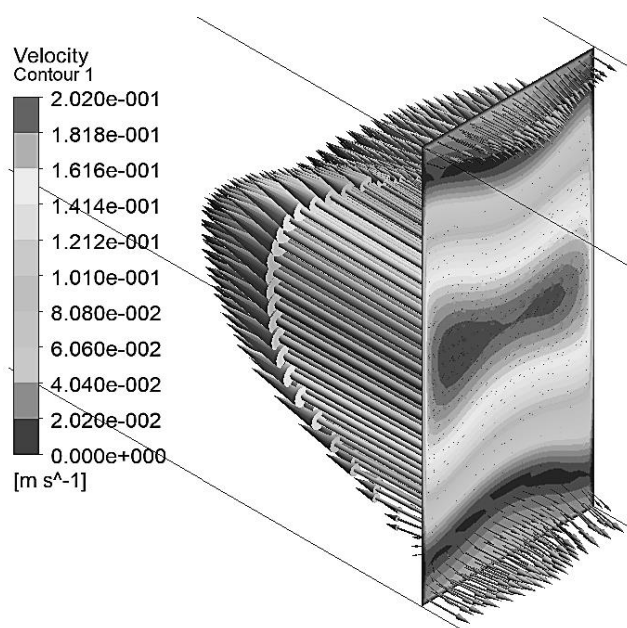


Рисунок 23 – Профиль скорости в поперечном сечении канальной части

При сравнении результатов математического и физического моделирования, удалось получить приемлемые значения электромагнитных, гидродинамических и тепловых характеристик. Соответственно, предложенные электромагнитные, гидродинамические и тепловые математические модели можно использовать для моделирования физических процессов, конструирования МГД-насосов, а также вынесения рекомендаций для их проектирования.

## 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 анализ интегральных электромагнитных характеристик МГД-насоса, определены основные геометрические размеры и параметры схемы замещения, необходимые для выбора источника питания установки.

3. Разработана 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. Изготовлена физическая модель МГД-насоса с использованием критериев подобия, которая позволяет провести натурные эксперименты и верифицировать математические модели. 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 разряженностью конечно-элементной сетки в численных моделях. Совпадение результатов позволяет сделать вывод о правомерности использования данных моделей при проектировании аналогичных установок.

**Перспективами дальнейшей разработки темы являются:**

1. Проведение исследования эффективности использования несинусоидального тока различных форм;

2. Разработка алгоритмов эффективного управления МГД-насосами металлургического назначения;

3. Исследование влияния термогравитационных явлений и разработка критериев оценки их воздействия на качество функционирования МГД-насосов.

4. Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации МГД-насосов металлургического назначения.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

*в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК*

1. Исследование продольного краевого эффекта в двухсторонних линейных индукционных машинах с жидкометаллическим ротором / **И. В. Кижяев**, В. Н. Тимофеев, М. Ю. Хацаюк // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия: Техника и Технологии. Том: 12. Номер: 2. – 2019. С. 240-249.

2. Математическое моделирование индукционного мгд-насоса для транспортировки расплава алюминия. / И. В. Кижяев, В. Н. Тимофеев, М. Ю. Хацаюк // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия: Техника и Технологии. Том: 16. Номер: 2. – 2023. С. 228-244.

*в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus:*

3. Mathematical simulation of electromagnetic and hydrodynamic processes in the MHD-pump / **I. V. Kizhaev**, M. Y. Khatsayuk, V. N. Timofeev // Журнал: Magnetohydrodynamics. Том: 55. Номер: 3. Институт физики Латвийского Университета. – 2019. С. 337-345.

*в других изданиях:*

4. Создание моделей индукционной единицы и сравнительный анализ скоростей течения расплава в канале / А. А. Гуляшинов, **И. В. Кижаяев**, В. Н. Тимофеев // Сборник научных трудов. В 9-ти частях. Наука. Технологии. Инновации. – 2018. С. 76-79.

5. Математическое моделирование гидродинамических процессов в МГД-насосе численным методом / **И. В. Кижаяев**, В. Ю. Андрющенко, В. Н. Тимофеев, А. В. Фомин // Сборник научных трудов. В 9-ти частях. Наука. Технологии. Инновации. – 2018. С. 43-46.

6. Математическое моделирование гидродинамических процессов в МГД-насосе при различных соотношениях ширины рабочей области к ширине канала / **И. В. Кижаяев**, В. Н. Тимофеев, М. Ю. Хацаюк // Научный периодический электронный рецензируемый журнал «SCI-Article.ru». Номер: 84. – 2020. С. 114-121.

7. Longitudal edge effect in induction MHD-pumps / **I. V. Kizhaev**, M. Y. Khatsayuk, V. N. Timofeev // Материалы международной студенческой конференции. Проспект Свободный – 2018Ю. – 2018. С. 452-454.