

## ОТЗЫВ

официального оппонента Халилова Руслана Ильдусовича на диссертацию соискателя **Соколова Игоря Владимировича** на тему **«Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

### Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Соколова И.В. «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов» посвящена разработке алгоритмов управления течениями расплава в магнитогидродинамических перемешивателях, а также численных моделей для исследования этих течений.

Основной целью разработки этих алгоритмов и моделей является определение общих принципов управления течениями за счет изменения режимов питания катушек индуктора электромагнитного перемешивателя, создающих в расплаве комбинацию бегущего и пульсирующего магнитных полей, и вызывающих одно- или многоконтурные течения расплава в зависимости от выбранного режима питания индуктора. Исследование влияния асимметрии питающих токов индуктора на распределение электродинамических усилий и структуру течений в расплаве имеет как теоретическую, так и практическую значимость для развития магнитной гидродинамики.

Актуальность выбранной темы определяется потребностью гибкого управления структурой течения расплава в электромагнитных перемешивателях, используемых для приготовления специальных сплавов, в установках зонной плавки и направленной кристаллизации, когда не удается добиться достаточной равномерности распределения примеси без изменения структуры течения, либо в тех случаях, когда требуется управлять формой границы расплавленной зоны.

Новизна защищаемых автором исследований заключается в полученных им зависимостях, позволяющих предсказать структуру течений при различных режимах питания индуктора.

Цель данной работы – исследование структуры магнитного поля при различных режимах питания индуктора линейной индукционной машины, её **Влияние** на характер течения в жидкометаллическом вторичном элементе под



действием бегущего магнитного поля, а также на изменение эффективности перемешивания.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, и заключения. Полный объем диссертации составляет 116 страниц, включая 62 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 114 наименований.

### **Новизна и достоверность основных выводов и результатов работы**

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Показано, что изменение начального сдвига фаз токов, питающих электромагнитный перемешиватель, влияет на течения во расплаве.
2. Для анализа течений в расплаве впервые применен метод симметричных составляющих.
3. Показано, что основной вклад в возникновение разнонаправленных усилий в расплаве вносит взаимодействие бегущего и пульсирующего магнитного поля.
4. Представлены зависимости скорости и времени перемешивания примеси в расплаве под действием электромагнитного перемешивателя от соотношения и фазового сдвига симметричных составляющих токов линейного индуктора.
5. Сформированы рекомендации по выбору режимов работы электромагнитных перемешивателей с бегущим магнитным полем, учитывающие соотношение симметричных составляющих токов питания индуктора.

### **Ценность для науки и техники**

Возможность рассмотрения разложения токов питания на симметричные составляющие упрощает анализ режимов работы перемешивателя, что представляет значительный интерес.

Отдельно стоит отметить, что наличие токов нулевой последовательности значительно изменяет характер течений в расплаве, в качестве управляющего параметра может служить начальная фаза токов нулевой последовательности.

Предложенный подход исследования режимов питания может найти широкое применение и в других МГД устройствах, таких как, электромагнитные насосы для перемешивания жидкометаллических теплоносителей, устройствах очистки и расходомерии.



## Общая оценка диссертационной работы

Данная диссертационная работа выполнена на актуальную тему, позволяет упростить создание численных моделей МГД-перемешивателей, а также анализировать режимы работы при несимметричном питании индуктора.

К достоинствам диссертации, помимо результатов, следует отнести и то, что диссертант показал владение современными методами и численного и экспериментального исследования процесса течения. Необходимо отметить, что при проведении исследований, автором выполнен большой объем работ по проектированию, разработке и созданию экспериментальных установок; осуществлению экспериментов и обработке результатов.

В качестве замечаний по работе можно отметить следующие:

1. Терминология «валидация экспериментальных данных». Описанный в разделе 2.5. алгоритм действий больше соответствует термину «верификация», когда производится сравнение численных и экспериментальных данных с целью доказательства применимости выбранной численной модели для описания процесса или явления.
2. Из текста диссертации не понятно чем вызвано значение погрешности 10% для удовлетворения согласия численных и экспериментальных данных для гидродинамической задачи и значение погрешности 5% для электродинамической задачи.
3. Недостаточно полно обоснованы преимущества временных затрат на расчет электромагнитной задачи с применением алгоритма (11 секунд) против продолжительности решения задачи в трехмерной постановке (5 минут). С точки зрения решения единичной электромагнитной задачи и 5 минут и 11 секунд не являются критичными. Даже серия расчетов с целью поиска оптимальных параметров, требующая многократных решений, в некоторых случаях является приемлемой с точки зрения затрат по времени.
4. В главе 2 описывается эксперимент со сплавом галлия, цинка и олова. Каким образом проверяется важнейшая для расчетов и экспериментов характеристика – электропроводность?

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

## Заключение

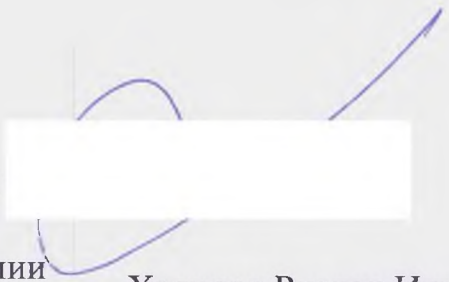
Подход к анализу течений, представленный в диссертационной работе, который заключается в использовании разложения токов питания методом симметричных составляющих представляется перспективным в установках с бегущими магнитными полями.



Диссертационная работа Соколова Игоря Владимировича «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов» удовлетворяет требованиям, установленным в пункте 9 Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к кандидатским диссертациям. В работе предложен подход к анализу течений в установках с бегущими магнитными полями, представляющийся перспективным. Представленная работа соответствует паспорту специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Автор диссертационного исследования «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов», Соколов Игорь Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Официальный оппонент,  
к.т.н., старший научный сотрудник  
лаборатории Физической гидродинамики  
«Института механики сплошных сред  
Уральского отделения Российской академии  
наук» - филиала Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки Пермского федерального  
исследовательского центра Уральского  
отделения Российской академии наук,


  
Халилов Руслан Ильдусович

19 сентября 2022г.

614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1

Тел. +7 (342) 237-83-81, электронная почта: [khalilov@icmm.ru](mailto:khalilov@icmm.ru)

Подпись к.т.н., с.н.с. «ИМСС УрО РАН»  
Халилова Руслана Ильдусовича удостоверяю  
Ученый секретарь Ученого совета  
«ИМСС УрО РАН», к.ф.-м.н.

  
Юрлова Наталия Алексеевна