

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


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)  
ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, 620002  
тел.: 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный);  
тел.: (343) 374-38-84  
e-mail: rector@urfu.ru web: www.urfu.ru

№ \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ»

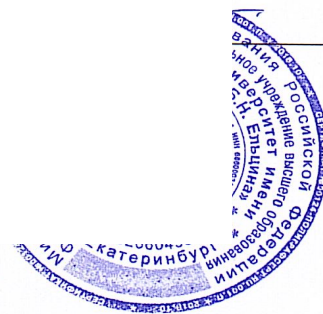
Проректор по науке

ФГАОУ ВО «Уральский  
федеральный университет  
имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина»



Германенко А. В.

\_\_\_\_\_ 2023 г.



**ОТЗЫВ  
ведущей организации**

**ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»**  
на диссертацию Никулина Иллариона Леонидовича  
«Математическое моделирование поведения металлических расплавов в  
электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических  
включений»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 1.2.2 - «Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ»

В представленной на отзыв диссертационной работе и автореферате Никулина И.Л. выполнены обобщающие научные исследования, направленные на решение научной проблемы математического описания и моделирования связанных физических процессов, происходящих внутри и на поверхности расплавов в индукционных плавильных установках.

## **Актуальность темы**

При проектировании различных технических устройств важным этапом является проведение предварительных исследований физических процессов. Эти исследования можно проводить с использованием натуральных образцов и физических моделей, однако эти испытания имеют относительно высокую стоимость. Очевидно, что переход к исследованию процессов с использованием математических и компьютерных моделей существенно ускоряет процесс разработки любого технически сложного устройства. В индукционных плавильных установках происходят взаимосвязанные физические процессы различной физической природы, поэтому применяемые методы исследования должны учитывать эту взаимосвязь. Еще одним фактором, затрудняющим разработку адекватных моделей физических процессов, является существенный разброс масштабов полей в устройствах различного технического назначения, работающих в различных режимах работы. Это сказывается на необходимости обоснования применения тех или иных методов расчета процессов в зависимости от величин чисел физического подобия, характерных для конкретных режимов работы установок. В исследуемых автором установках наблюдаются взаимосвязанные друг с другом электромагнитные, гидродинамические и термодинамические процессы, а также процессы взаимодействия движущегося металла с тонкими оксидными пленками на его поверхности. Направленные на совершенствование технологических процессов процедуры подбора режимов работы, а также обоснование изменения конструкции агрегатов, в которых процессы одной физической природы влияют на процессы другой физической природы, без использования комплексного подхода к моделированию практически невозможны. Поэтому считаем, что тема работы является актуальной.

**Цель диссертации** формулируется как "разработка комплекса математических моделей для анализа взаимодействия магнитного поля на системы, состоящие из расплавленного металла с неметаллом на поверхности, и определения технологических режимов, позволяющих устранить перегрев и очищать поверхность металла от солей или оксидных пленок". Для достижения поставленной цели автор предлагает решить ряд задач:

- Разработка математической модели состояния оксидной пленки на поверхности металла, нагреваемого в переменном магнитном поле на примере вакуумной плавильной установки для получения жаропрочных никелевых сплавов.
- Создание численной модели и проведение с ее помощью исследований поведения расплавленного металла в индукционной печи, а также напряженного состояния оксидной пленки на его поверхности при различных параметрах магнитного поля, создаваемого индуктором.
- Разработка использующих результаты моделирования технических решений, направленных на очистку поверхности расплава от оксидной пленки.
- Создание на основе разработанной модели методики прогнозирования стабильности оксидной пленки на поверхности расплава.
- Разработка математической модели новой конструкции реактора восстановления титана, использующей индуктор бегущего магнитного поля для перемешивания расплавленного магния, моделирование технологических режимов и оценка эффективности применяемых решений.

Сформулированные автором задачи соответствуют поставленной цели проводимых исследований, а решение сформулированных задач полностью отражено в тексте диссертации.

**Научная новизна** на наш взгляд может быть отражена в следующих тезисах:

1. Разработана новая комплексная математическая модель теплопереноса в расплавленном металле при его нагреве в переменном магнитном поле при наличии на поверхности металла упруго-напряженной пленки.
2. Методами вычислительного эксперимента выявлены связи упруго-напряженного состояния оксидной пленки на поверхности расплава с параметрами переменного магнитного поля, вызывающего нагрев и перемешивание расплава.
3. Впервые разработана методика оценки стабильности оксидной пленки на поверхности расплава, позволяющая прогнозировать разрушение

оксидной пленки при изменении параметров переменного магнитного поля, в котором находится расплав с пленкой на его поверхности.

4. В результате математического моделирования определены требуемые параметры бегущего магнитного поля, в которое требуется поместить реактор для получения губчатого титана для достижения положительных эффектов по увеличению энергетической эффективности и стабильности технологического процесса, а также продления рабочего ресурса оболочки реактора.

**Теоретическая значимость диссертации** заключается на наш взгляд в разработке обоснованных, верифицированных и представленных в обобщенном виде математических моделей связанных электромагнитных, гидродинамических и теплофизических процессов, а также процессов взаимодействия расплава с тонкими пленками на его поверхности в индукционных плавильных установках.

**Практическая значимость для науки и производства** состоит в разработке вычислительных алгоритмов и комплексов созданных компьютерных программ, позволяющих прогнозировать характер протекающих процессов в индукционных плавильных установках. В ходе исследований получены важные результаты для некоторых приложений, таких как реактор для производства титана и вакуумная индукционная плавильная печь. Представленные в работе в виде карт состояний результаты исследований позволяют производить масштабирование результатов без проведения дополнительных вычислительных экспериментов в некотором диапазоне критериев физического подобия процессов в указанных установках.

Таким образом, научная и практическая значимость диссертации не вызывает сомнений.

**Обоснованность и достоверность результатов работы** обеспечивается подтверждением представленных в работе полученных в ходе математического моделирования данных с экспериментальными данными, полученными в ходе вычислительных и натурных экспериментов, проведенных другими авторами при решении близких задач.

Результаты диссертационной работы характеризуются, как имеющие научное обоснование и завершенные, обеспечивающие основу для дальнейших исследований.

**Соответствие паспорту научной специальности** работы по нашему мнению согласуется в пунктах: 1). "Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений" в части разработки модели упруго-напряженного состояния оксидных пленок на поверхности расплава, 2). "Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий" в части разработки метода моделирования связанных физических процессов, 3). "Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента" в части разработки программных комплексов для численного моделирования связанных физических процессов в индукционных вакуумных печах и установках для получения губчатого титана (подтверждается получением свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ), 8). "Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента" в части получения в обобщенном виде карт режимов поверхностных и объемных течений, а также карты стабильности пленки на поверхности расплава.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Разработанные в диссертации программные комплексы, а также полученные в ходе исследований и представленные в обобщенном виде карты режимов поверхностных и объемных течений, а также карта стабильности пленки рекомендуются к использованию в проектных организациях и научно-производственных предприятиях, занимающихся изготовлением вакуумных индукционных печей при разработке и модернизации плавильных установок. Полученные в результате исследований требования к величине внешнего бегущего магнитного поля могут лечь в основу технического задания на проектирование модернизированной установки для получения губчатого титана.

## Оценка содержания диссертации и автореферата

Представленная для отзыва диссертация написана грамотным научно-техническим языком, качественно иллюстрирована, содержит все необходимые пункты. В тексте диссертации встречаются опечатки, но этот факт не меняет общего положительного впечатления при прочтении работы. Содержание автореферата полностью соответствует положениям диссертации. Результаты работы изложены в достаточном количестве публикаций в отечественных и зарубежных научных журналах. Работа прошла достаточную апробацию на конференциях различного уровня, а также на нескольких научных семинарах.

### Замечания по работе

1. Приведенная в п. 1.1.3 математическая модель слабо согласуется с реальными установками, в которых зазор между индуктором и вторичным элементом присутствует всегда. Поэтому величина магнитного поля на поверхности вторичного элемента сильно зависит от соотношения величины немагнитного зазора и полюсного деления. Таким образом, магнитное поле созданное индуктором в слое диэлектрика в виду того, что магнитные полюса располагаются в одной плоскости. Не совсем понятно, почему здесь не приведена более общая модель из [229], на которую ссылается автор?

2. В модели, описанной в п. 1.1.4 на первый взгляд не учитывается скольжение, как это сделано в модели из п. 1.1.3.

3. Метод моделирования теплопереноса в системах с участками радиационного теплообмена ранее неоднократно использовался при встраивании в модели на основе метода эквивалентных тепловых схем, который при равномерном разбиении участка моделируемой среды практически тождественен методу конечных разностей, используемого автором. Пример использования этого подхода, например, опубликован здесь: [Структурное моделирование тепловых процессов в электротермических установках: учебное пособие / В.В. Гоман, С.М. Мезенин, В.А. Прахт, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, С.А. Федореев; под общ. ред. Ф.Н. Сарапулова. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. – 343 с.].

4. В подзадаче тепломассопереноса (п. 2.4) принято, что тепловые потери отсутствуют. Чем обосновывается это положение? Можно

предположить, что в рассматриваемой установке дно тигля и его боковая стенка охлаждаются неодинаково в виду того, что индуктор имеет водяное охлаждение, а дно тигля – нет. Можно ли оценить, насколько эта неравномерность может сказаться на структуре течений?

5. В п. 2.5 задача расчета электромагнитного поля разбивается на 2 подзадачи. В чем смысл этого разбиения? Одним из преимуществ данного подхода по утверждению автора является «возможность нахождения именно осредненных сил и источников теплоты». Это преимущество представляется сомнительным т.к. средние значения этих величин можно вычислить в любой численной модели, а современные и даже не совсем современные численные инструменты, реализованные в виде универсальных пакетов для численного расчета полей, делают это автоматически вместо пользователя. Также не совсем понятна причина, по которой автор предлагает вычислять электромагнитное поле относительно напряженности. Функция напряженности магнитного поля в пространстве может иметь резкое изменение на границах областей с различными значениями магнитной проницаемости. Моделирование катушек сложной формы в предложенной постановке также представляется нетривиальной задачей. Чаще всего можно встретить при решении подобных задач формулировку уравнений, записанных относительно векторного магнитного потенциала.

6. Из текста п. 2.7 не ясно по какому принципу осуществляется разбиение сетки? Для различных процессов требования к сетке разные. Например, в задаче расчета электромагнитного поля для его достаточной детализации в объеме, близком к индуктору, размер ячейки должен сопоставляться с величиной глубины проникновения  $\delta$  (1.12), а в гидродинамической задаче требуется более плотная сетка, вблизи границ с наложенным граничным условиям прилипания, где скорость имеет значительный градиент при перемещении от границы вглубь расплава.

7. Естественная тепловая конвекция не имеет физической симметрии в пространстве. Автору стоит объяснить, почему была выбрана осесимметричная формулировка для решения сопряженных уравнений теплопереноса и переноса импульса. Также выбор масштаба модели должен быть обоснован с точки зрения природы разрешения турбулентных или вторичных течений, а не только с точки зрения устойчивости процедуры

поиска решений. Важным фактором для качественного анализа в таких задачах является надлежащий выбор модели турбулентности и качественная ее настройка. Некорректное описание этих явлений приводит к пренебрежению эффектами рециркуляции тепловой энергии между образующимися потоками в тигле, что было отмечено в ряде публикаций:

- Umbrasko, E. Baake, B. Nacke, A. Jakovics Thermal and hydrodynamic analysis of the melting process in the cold crucible using 3d modeling, January 2008 Heat Transfer Research 39(5), 10.1615/HeatTransRes.v39.i5.50;
- Umbrasko, E. Baake, B. Nacke, A. Jakovičs Thermal and Hydrodynamic Analysis of the Melting Process in the Cold Crucible Using 3D modeling Advances in Heat Transfer. Proceeding of the 5th Baltic Heat Transfer Conference. September 19-21, 2007, Saint-Petersburg, Russia;
- E. Baake, Nacke B., A. Umbraško, A. Jakovičs LES modelling of heat and mass transfer in turbulent recirculated flows Fundamental and applied MHD - Ramatuelle, 2002, Vol. 2, pp. 173-178.

Стоит, отметить, что модели были верифицированы экспериментально, поэтому данные замечания не ведут к неадекватности модели, а рекомендуют обосновать выбранные подходы.

8. Требуется пояснения вопрос влияния размеров и расположения поверхностной пленки на структуру течений. Поскольку теплоотвод с поверхности пленки отличается от такового с поверхности расплава в виду разницы в степени черноты пленки и расплава соответственно, центр и периферийные зоны расплава находятся в разных условиях. Учитывается ли это в моделях? Имеет ли смысл учитывать подобные явления?

9. Представленная в главе 4 электромагнитная модель принята в безындукционном приближении, но оценки  $Re_m$  здесь не приводится. При расчетной частоте 0,15 Гц велика вероятность того, что влияние скорости течения расплавленного металла на конфигурацию поля будет значительным.

10. При оценке энергетической эффективности применения индуктора для перемешивания жидкого магния в реторте с помощью бегущего магнитного поля никак не учитываются потери энергии в самом индукторе и его источнике питания.



11. Результаты, полученные автором и оформленные в виде частотной карты режимов поверхностных течений и ряд других построенных карт имеют высокую научно-техническую ценность. Проводились ли исследования по поиску доверительного диапазона этих карт? Имеется ли возможность оценить, как изменяться эти карты если усложнить или уточнить численную модель?

### **Заключение по работе**

Представленная диссертационная работа Никулина И.Л. является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой на основании проведенных автором исследований и теоретических разработок, решена проблема математического описания и моделирования связанных физических процессов, происходящих внутри и на поверхности расплавов в индукционных плавильных установках, которая имеет важное значение для металлургической отрасли страны.

Диссертация отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор, Никулин Илларион Леонидович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по указанной научной специальности.

Отзыв составлен доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой "Электротехника" ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» Фризенем Василием Эдуардовичем.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «Электротехника» ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», протокол №7 от «2» мая 2023 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

Фризен Василий Эдуардович

+7(343)375-47-51

vefrizen@urfu.ru

Подпись  
заверя

