

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, Минакова Андрея Викторовича на диссертацию Никулина Иллариона Леонидовича «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических включений» на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы

Диссертационная работа Никулина И.Л. посвящена проблемам совершенствования таких металлургических технологий как индукционная плавка и производство губчатого титана. В работе с помощью разработанных оригинальных математических моделей, созданных комплексов программ и систематического вычислительного моделирования выполнено решение реальных технологических проблем: устранение перегрева и очистки поверхности расплава от неметаллических включений при индукционной плавке и повышение энергоэффективности процесса получения губчатого титана. Эти задачи являются актуальными для развития цветной металлургии Российской Федерации.

С научной точки зрения задачи, решенные в рамках диссертации, также представляются актуальными, поскольку рассматриваются сложные мультифизические явления, для построения математических моделей которых необходимы знания из многих разделов науки: механика и электродинамика сплошных сред, теория упругости, теплофизика, методы численного решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Создание таких сложных математических моделей и программных комплексов, основанных на них, остро необходимы для дальнейшего более углублённого понимания процессов, протекающих в рассматриваемых технологических системах, и дальнейшего их совершенствования. Поскольку существующие коммерческие пакеты моделирования (в основном зарубежного производства) типа «Ansys», «Comsol Multiphysics», «FlowVision» и пакеты с открытым кодом «Open Foam» не содержат в себе готовых средств решения подобных задач, возникает необходимость разработки оригинальных программных продуктов, позволяющих проводить комплексные исследования методами математического моделирования. Эти задачи были успешно решены в данной работе.

Следует отметить, что данная тематика относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ (п. 8.

«Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика») и входит в перечень критических технологий РФ (п. 26. «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»). Таким образом, актуальность исследований, выполненных в диссертационной работе И.Л. Никулина «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических включений», не вызывает сомнений и результаты исследований представляют, как теоретический, так и практический интерес.

Краткая характеристика основного содержания работы

Диссертационная работа Никулина И.Л. состоит из списка обозначений, введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Диссертации изложена на 299 страницах (с двумя приложениями 311 страниц), содержит 87 рисунков, 25 таблиц. Библиография представляется достаточно полной и насчитывает 237 источников.

Первая глава является обзорной и содержит три смысловые части, описывающие математические модели отдельных элементов рассматриваемых технических систем: 1) модели тепломассопереноса в расплавленном металле, помещённом в электромагнитное поле, 2) модели, представления тонких плёнок, 3) модели, описывающие радиационный теплообмен. В первой части главы идёт подробный анализ моделей, описывающий действие магнитного поля с различными способами его приложения (постоянное, бегущее, вращающееся и переменное) на проводящую жидкость. Приведены основные уравнения и управляющие критерии. Описаны эффекты, возникающие в жидкости при действии указанных магнитных полей. Дополнительно рекомендованы работы, которые можно использовать для верификации разрабатываемых математических моделей. Во второй части изложены молекулярно-динамический, термодинамический и континуальный подходы к описанию тонких плёнок. В третьей части рассмотрены методы описания радиационного теплообмена. Здесь же Никулиным И.Л. предложен «метод моделирования теплопереноса в системах с радиационными участками при помощи анизотропии коэффициента теплопроводности».

Во второй главе разработана математическая модель взаимодействия расплава и поверхностной оксидной плёнкой при индукционной плавке. Детально проанализирован технологический процесс индукционной плавки многокомпонентных никелевых сплавов, показаны причины появления плёнок. Проведён анализ состояния плёнки, получены уравнения её состояния, показывающие связь плёнки и металла, движущегося в переменном магнитном поле. Для расчёта объёмных силы Лоренца и мощности тепловыделения автором предложена оригинальная

методика, позволяющая с помощью метода осреднения и метода многих масштабов выделить независимые от времени осреднённые компоненты силы и мощности. Описывается компьютерная реализация разработанной модели, и следует отметить, что Никулин И.Л. является непосредственным разработчиком оригинального программного продукта, на который получено свидетельство о государственной регистрации. Значительная часть второй главы посвящена подтверждению корректности как отдельных блоков, так и модели в целом. Показано соответствие результатов моделирования натурным экспериментам, а также расчётам других авторов.

В третьей главе представлены результаты моделирования различных аспектов, связанных с индукционной плавкой: вариация частоты и напряжённости магнитного поля, взаимного расположения индуктора и металла, свойств расплава. Определён критерий, помогающий определить доминирующий в формировании структуры течения механизм. Выявлены способы очистки поверхности расплава непосредственно во время плавки. Смоделированы предложенные новые конструкции индукционных печей. Изучены напряжённо-деформированные состояния поверхностной плёнки. Предложена методика оценки стабильности оксидной плёнки.

В четвёртой главе разработана модель тепломассопереноса в реакторе для производства титана для двух конструкций: с индуктором бегущего магнитного поля и с шахтной печью. Здесь же приведены результаты моделирования режимов работы обоих вариантов реактора и показано, что конструкция с индуктором обладает некоторыми преимуществами: продляется ресурс реторты, очищается поверхность магния от солей, тепло экзотермической реакции восстановления титана используется для поддержания температуры расплавленного магния.

В заключении подведены основные итоги работы.

В Приложении 1 приведены свидетельства о защите результатов интеллектуальной деятельности: два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и патент на полезную модель. В приложении 2 – справка о применении результатов в АО «Региональный научно-исследовательский институт титана и магния», справка о возможности применения результатов на АО «Протон-Пермские моторы» и акт внедрения в учебный процесс Пермского национального исследовательского политехнического университета, сотрудником которого является И.Л. Никулин.

Научная новизна полученных результатов, по мнению оппонента, состоит в следующем.

Разработана новая математическая модель взаимодействия расплава металла в условиях его нагрева и перемешивания переменным магнитным полем и упруго-напряжённой поверхностной плёнки. Выявлены связи

упругонапряжённого состояния оксидной плёнки на поверхности расплава с параметрами ПМП. Предложена оригинальная методика расчёта осреднённых силовых и тепловых эффектов ПМП, позволяющая рассчитывать амплитуды переменных магнитных полей индукционных токов, а также выделять осреднённые, не зависящие от времени составляющие силы Лоренца и мощности источников джоулевой теплоты. Разработан новый вычислительный метод, позволяющий применять алгоритмы сквозного счёта к составным системам, содержащим тонкие зазоры с радиационным теплообменом. Разработана методика оценки стабильности оксидной плёнки, позволяющая прогнозировать деформацию и разрушение плёнки при изменении напряжённости на различных частотах ПМП. При помощи математического моделирования определены технологические параметры бегущего магнитного поля, которые позволяют повысить эффективность процесса восстановления титана.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Степень достоверности полученных результатов представляется достаточно высокой. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Математические модели, разработанные автором, являются следствием фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии. Для реализации математических моделей были использованы известные численные методики, которые также хорошо апробированы. Разработанные автором математические модели и численные методики прошли подробную верификацию на решении большого количества задач с известными аналитическими решениями, натурными экспериментальными данными и результатами вычислений других авторов. Об адекватности разработанных автором моделей также можно косвенно судить по согласованию основных закономерностей на качественном уровне с промышленным экспериментом.

Практическая значимость

Диссертационное исследование, несмотря на то, что во многом имеет фундаментальный характер, тем не менее, обладает значительной практической значимостью. Созданные математические модели, программные комплексы и полученные на их основе физические закономерности могут быть применены в конструкторских бюро металлургических предприятий и научно-исследовательских институтах, занимающихся проектированием индукционных печей, металлургических реторт, МГД перемешивателей и другого литейного оборудования. Результаты работы непосредственно относятся к исследованиям и оптимизации теплогидравлических и электромагнитных процессов в существующих технологиях индукционной плавки, а также производству губчатого титана. Практическая значимость диссертационного исследования подтверждается справками и актами с предприятий, в

интересах которых проводилась настоящая работа. Таким образом, разработанные Никулиным И.Л. математические модели и полученные с их помощью результаты помогли в решении прикладных технологических задач.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Диссертационное исследование И.Л. Никулина содержит все три составляющих названия специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и соответствует отрасли «технические науки». Полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности 1.2.2 по областям исследования в пунктах: 2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий. 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента. 6. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей (технические науки). 8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента. 9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки).

Замечания по работе

1. При описании взаимодействия расплава и тонкой пленки на его поверхности использовано допущение о том, что пленка является неподвижной. На мой взгляд, это довольно сильное приближение, которое нуждается в дополнительном обосновании.

2. Неясно, почему при расчете сил, действующих на пленку со стороны расплава, пренебрегается нормальными составляющими.

3. В работе предложена методика расчёта осреднённых полей лоренцевой силы и мощности джоулевой теплоты для учета гармонических колебаний электромагнитного поля. При этом турбулентными пульсациями расплава и турбулентным теплопереносом в третьей главе пренебрегается. Между тем турбулентный перенос в данной задаче может быть весьма значительный. Необходимо было привести соответствующие оценки.

4. В четвертой же главе при моделировании течений магния турбулентный перенос моделируется введением эффективной

турбулентной вязкости и теплопроводности. Непонятно с чем связано такая последовательность.

5. В таблице 2.7 приведены результаты исследований влияния величины временного шага на точность моделирования задачи об остывании пластины. Указано, что использовалась неявная схема, поэтому непонятно с чем связано наличие экстремума погрешности при значении множителя временного шага равного $\kappa=6,05 \cdot 1000$.

6. Выбор переменных функции тока и завихренности и соответствующих схем для численной реализации разработанных математических моделей является неудачным, поскольку как показано на рисунке 2.24 не позволяет автору в полной мере исследовать особенности рассматриваемых им течений на подробных сетках из-за развития численных неустойчивостей.

7. Анализу результатов решения тестовой задачи (2.8.3) о нестационарном теплопереносе уделено недостаточное внимание. Приведено сопоставление с экспериментом только по амплитуде колебаний температуры. Следовало привести еще сравнение частот колебаний. Результат исследования влияния детализации сетки на точность совпадения с экспериментом неочевиден.

8. В четвертой главе приведена постановка моделирования задачи о движении магниевого расплава в процессе производства титана. При этом теплота экзотермической химической реакции входит в качестве параметра только в граничное условие для тепловых потоков на поверхности расплава, а не выделяется в объеме как это происходит в реакторе. Это допущение нуждается в комментариях.

9. Нижняя часть реторты в конце процессе заполнена титановой губкой, которая будет значительно влиять на структуру течения в донной части. Поэтому полученные автором характеристики течения применимы только к начальной стадии работы реактора.

10. Неясно как, заменяя шахтную печь индуктором с БМП, можно дополнительно полезно использовать 52кВт тепла, выделяющегося в реакции.

11. По тексту работу содержатся многочисленные опечатки. На странице 112 в последнем абзаце. На странице 113 в первом абзаце. На странице 164 в первой строке. Размерность коэффициента теплоотдачи, указанная на странице 123 неверная ($\text{Вт}/\text{м}^2$). И другие.


Общее заключение

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Автореферат верно и достаточно полно отражает содержание диссертации. Все основные результаты диссертационной работы опубликованы в специализированных ведущих российских и международных журналах.

Диссертационная работа Никулина Иллариона Леонидовича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой на основании проведенных автором исследований, получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области разработки математических моделей для описания связанных электромагнито-теплогидравлических процессов в металлических расплавах, имеющее важное значение для развития механики и электродинамики сплошных сред и методов моделирования технических систем.


Диссертация Никулина Иллариона Леонидовича «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических включений» полностью соответствует паспорту специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», а соискатель Никулин Илларион Леонидович заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Доктор физико-математических наук (специальность 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы), директор Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

 Минаков Андрей Викторович

«02» мая 2023 г.

Я, Минаков Андрей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Никулина Иллариона Леонидовича «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических включений», и их дальнейшую обработку.


Подпись
Делопроизв
«02»

Место работы – ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», адрес: 660074, г. Красноярск, ул. Ак. Кириленко, д. 28, корп. Б, кабинет № 225, тел. 8 (391) 291-29-67, e-mail: Aminakov@sfu-kras.ru