

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Никулина Иллариона Леонидовича
«Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхностей от неметаллических включений»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы исследования

Диссертация Никулина Иллариона Леонидовича посвящена разработке комплекса математических моделей и численных методик для исследования поведения металлических расплавов при наличии тонкой пленки на поверхности в условиях воздействия магнитного поля и установления технологических режимов, способствующих очищению поверхности металлических расплавов от оксидных пленок и устранению перегрева. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения энергетической эффективности и улучшения качества изделий в условиях развития современных технологий черной и цветной металлургии, например, при производстве губчатого титана или индукционной плавки никелевых сплавов. В рамках отмеченного подхода выделяют следующие технические проблемы – формирование оксидной пленки на поверхности металлических расплавов, что может приводить к снижению качества продукции, а также дополнительный нагрев, возникающий в результате протекания экзотермической реакции при магнийтермическом производстве титана или при усилении магнитного поля в результате индукционной плавки никелевых сплавов.

Наиболее эффективным и менее трудозатратным методом решения отмеченных технических проблем является использование подходов вычислительной математики и теплофизики, что очень подробно изложено в рецензируемой работе. Кроме того, математическое моделирование рассматриваемых процессов позволяет не только получить решения, имеющие отношения к данной технической проблеме, но и сформулировать математические модели, использование которых возможно для широкого спектра технических задач. Отмеченная широта и универсальность подхода тоже иллюстрируют необходимость развития математического моделирования в свете неуклонного роста производительности вычислительных систем.

Следует также отметить, что проведенные исследования полностью соответствуют направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации в

рамках перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создания систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

С учетом всего выше сказанного, тема диссертационной работы Никулина Иллариона Леонидовича является важной и актуальной.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем работы – 299 страниц. Текст диссертации содержит 87 рисунков и 25 таблиц. Список литературы включает 237 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и решаемые задачи, показаны научная новизна и практическая значимость, отмечены методология и методы исследования, описаны личный вклад автора и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит описание математических моделей, используемых для моделирования переноса магнитного поля в проводящей среде, где рассмотрены постоянное, бегущее, вращающееся и переменное магнитные поля. На основании литературного обзора описаны эффекты воздействия отмеченных магнитных полей на проводник. Соискатель отдельно представил список работ, которые можно использовать для проверки созданных математических моделей и разработанных численных алгоритмов в рамках решения рассматриваемого класса задач. Проведен обзор моделей, используемых для описания тонких пленок на основе методов молекулярной динамики, термодинамического и континуального подходов. Представлен также небольшой обзор моделей лучистого теплообмена применительно к решению рассматриваемых задач, который включает два подхода – учет излучения за счет введения виртуальных слоев с анизотропным коэффициентом теплопроводности и метод сферических гармоник. В конце главы вынесены основные результаты.

Во второй главе представлена математическая модель, описывающая конвекцию расплавленного металла под действием переменного магнитного поля и взаимодействие с тонкой оксидной пленкой на поверхности расплава. Соискатель отметил ряд допущений, в рамках которых происходит решение задачи, включающий наличие оси симметрии, стационарность процесса, малость магнитного числа Рейнольдса, а также плоскую и недеформируемую форму поверхности расплава, постоянство физических свойств рабочей

среды и гармонический закон для изменяющегося магнитного поля. В результате система определяющих уравнений с учетом представленных допущений включает в себя дифференциальные уравнения Максвелла для описания электромагнитной части, дифференциальные уравнения Обербека–Буссинеска для описания тепломассопереноса, а также дифференциальное уравнение деформации пленки. Система уравнений замыкается соответствующими граничными условиями. Соискатель описал особенности численной реализации с использованием метода конечных разностей, а также представил подробную верификацию разработанной математической модели и созданного численного алгоритма на модельных задачах, имеющих как аналитические решения, так и результаты экспериментальных исследований. В конце главы вынесены основные результаты.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования, основанного на определяющих уравнениях и граничных условиях, сформулированных во второй главе. Соискатель подробно описал результаты моделирования тепломассопереноса в случае чистого металла и при наличии оксидной пленки. Проанализировано влияние параметра диффузии переменного магнитного поля, числа Прандтля и высоты расплава на напряженность магнитного поля, ротор осредненной силы Лоренца, мощность джоулевых источников, скорость и температуру внутри расплава. Проведено сравнение вкладов выталкивающей силы и силы Лоренца в результирующее движение. Отдельно проанализированы возможности очистки поверхности расплава от оксидной пленки. Установлено, что наиболее устойчивыми являются дискообразные пленки малого радиуса. Предложен критерий стабильности пленки, являющийся по смыслу интегральной нагрузкой, определяющей деформацию в центре пленки.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию поведения магниевого расплава в стальной реторте при наличии бегущего магнитного поля. Соискатель сформулировал допущения при проведении моделирования и записал определяющие уравнения с соответствующими начальными и граничными условиями. В результате численного решения полученной краевой задачи установлено, что использование бегущего магнитного поля позволяет уменьшить перегрев реторты в зоне реакции, а также снижает выброс тепла в атмосферу и экономит до 40% энергии.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы по проведенному анализу.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректностью математических постановок задач, использованием апробированных вычислительных алгоритмов и расчетных схем, а также сравнением результатов численного анализа с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- разработана математическая модель тепломассопереноса в расплаве металла при наличии переменного магнитного поля и оксидной пленки на поверхности расплава;
- выявлены связи упруго-напряженного состояния оксидной пленки на поверхности расплава с параметрами переменного магнитного поля;
- предложена методика расчета осредненных силовых и тепловых эффектов переменного магнитного поля, позволяющая рассчитывать амплитуды переменных магнитных полей индукционных токов;
- предложен метод эффективной теплопроводности, заключающийся в замене участков с радиационным теплообменом участками с эквивалентным диффузионным механизмом теплопереноса, что позволяет применять методы сквозного счёта для областей, разделённых зазором, не прибегая к процедуре теплового сопряжения отдельных частей;
- разработана методика оценки стабильности оксидной пленки, позволяющая прогнозировать деформацию и разрушение пленки при изменении напряженности магнитного поля;
- показано, что применение бегущего магнитного поля в технологии восстановления губчатого титана позволяет достичь ряда положительных эффектов, связанных с использованием теплоты реакции для поддержания температуры расплава и подведением чистого магния из объёма реторты.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в

- создании математической модели и разработке вычислительного алгоритма для изучения как сопряженного тепломассопереноса в расплаве металла при наличии магнитного поля и оксидной пленки на поверхности расплава, так и поведения магниевое расплава в стальной реторте при наличии бегущего магнитного поля;
- использовании полученных данных для удаления оксидной пленки с поверхности расплава с целью интенсификации процесса, а также оптимизации технологии восстановления губчатого титана за счет применения бегущего магнитного поля.

Содержание **автореферата** полностью отражает содержание диссертации, а сам автореферат отвечает всем предъявляемым требованиям.

Основные положения диссертации апробированы на всероссийских и международных конференциях. По результатам исследований опубликованы 53 работы, из которых 16 в журналах, входящих в международные базы цитирования, из которых четыре написаны автором диссертации без соавторов, три в журналах из Перечня ВАК, из них две без соавторов. Получены два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и один патент на полезную модель.

Замечания к диссертационной работе

1. При описании работ, рекомендуемых для верификации моделей тепломассопереноса при наличии магнитного поля, следовало более подробно описать каждую постановку с представлением области решения, определяющих уравнений и краевых условий. Корректнее было поместить этот пункт после описания численной методики.

2. Обзор моделей, описывающих радиационный теплообмен, следовало начать с уравнения переноса излучения.

3. При описании принятых допущений соискатель отметил постоянство свойств материалов и в качестве обоснования указал, что перепады температур при интенсивной конвекции внутри расплава не превышают 1 К. При этом на рисунке 3.12(б) перепад температуры достигает 80 градусов.

4. Обычно для описания радиационного теплообмена в безразмерном граничном условии третьего рода вместо радиационного числа Био используют число Старка.

5. Моделирование конвективного теплопереноса проведено в ламинарном приближении, хотя результаты были получены для высоких значений числа Грасгофа (до 10^8 в задаче теплопереноса в расплаве металла при наличии магнитного поля и оксидной пленки на поверхности расплава и $Gr = 2 \cdot 10^{11}$ в задаче теплопереноса в расплаве магния в стальной реторте при наличии бегущего магнитного поля). Если при $Gr \leq 10^8$ еще можно согласиться с таким подходом, то для $Gr = 2 \cdot 10^{11}$ необходимо дополнительное обоснование.

6. Следовало более подробно описать численную методику для рассматриваемых уравнений. Почему применялся метод установления для решения уравнений эллиптического типа при определении напряженности магнитного поля, хотя есть более эффективные методы решения таких уравнений? При этом разностное уравнение Пуассона для функции тока решалось методом последовательной верхней релаксации.

7. На рисунке 2.23 представлены результаты сравнения структуры течения с данными работы Крамер и др. [34]. Соискателю следует объяснить причины различия масштабов вторичных течений в угловых зонах вблизи границ Γ_{bottom} и Γ_{top} .

8. В главе 3 проанализировано влияние числа Прандтля в широком диапазоне. Какие физические расплавы металла рассматривались при $Pr = 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}$?

9. В безразмерном граничном условии третьего рода для температуры (4.7) на границе Γ_{cool} должно быть число Био, поскольку число Нуссельта является определяемым параметром. Это же замечание касается соотношения (4.8) и таблицы 4.3.

10. В тексте диссертации встречаются опечатки и неточности. Например, уравнение теплопроводности (2.86) записано неверно; условие на границе Γ_{top} в (2.89) записано неверно; условия на границе Γ_{axis} в (4.2) и (4.7) записаны неверно. В подписи к рисунку 4.1 указаны цифровые обозначения различных частей реактора, хотя на самом рисунке эти обозначения отсутствуют.

Соответствие диссертационной работы указанной специальности

Диссертационная работа Никулина Иллариона Леонидовича «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхностей от неметаллических включений» по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: пункту №1 – «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»; пункту №3 – «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», пункту №8 – «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», пункту №9 – «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий».

Заключение

Указанные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации Никулина Иллариона Леонидовича «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхностей от неметаллических включений», которая является законченной научно-квалификационной

работой, содержит решение задачи, имеющей большое практическое значение для науки и техники.

Диссертационная работа соответствует требованиям п.9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и 12.10.18 № 1168), а ее автор Никулин Илларион Леонидович достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

заведующий научно-исследовательской лабораторией
моделирования процессов конвективного теплопереноса

Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский Томский
государственный университет»

(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36,

(3822) 529-852, rector@tsu.ru, <http://www.tsu.ru>),

доктор физико-математических наук

(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),

профессор

Шерemet Михаил Александрович

04 мая 2023 года

Подпись М. А. Шеремета удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета ТГУ



Н. А. Сазонтова