

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке Пермского
национального исследовательского
политехнического университета,
доктор физико-математических наук,

 А.И. Швейкин
_____ 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации

Докторская диссертация «Математическое моделирование поведения
металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их
поверхности от неметаллических включений» выполнена на кафедре «Общая
физика».

В период подготовки докторской диссертации соискатель Илларион
Леонидович Никулин работал в должности доцента на кафедре «Общая
физика» ПНИПУ, научным консультантом выступал профессор кафедры
«Общая физика», доктор физико-математических наук, профессор Виталий
Анатольевич Демин.

В 2008 г. И.Л. Никулин защитил диссертацию «Математическое
моделирование теплофизики формирования монокристаллической отливки»
на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности
05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ», под руководством доктора технических наук, профессора Алексея
Ивановича Цаплина.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

***1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в
диссертации***

Автор является инициатором работ, посвящённых проблемам очистки
поверхности расплава жаропрочных никелевых сплавов от оксидных плёнок.
В цикле работ [12, 14–16, 17, 18], посвящённых расчёту проникновения
переменного магнитного поля в расплав, в соавторстве с А.В. Перминовым и
А.И. Цаплиным предложена и развита оригинальная математическая модель

диффузии магнитного поля в проводник; автор лично разработал теорию и реализовал вычислительный алгоритм расчёта магнитного поля индуктора, совместно с А.В. Перминовым разработал теорию расчёта магнитного поля индукционных токов, осреднённых объёмной силой Лоренца и источников джоулевой теплоты, лично разработал и реализовал вычислительный алгоритм решения задачи тепломассопереноса. Расчёты мощности тепловыделения и структуры течений при различных частотах проведены совместно с А.В. Перминовым. В цикле работ [6, 8, 9, 11, 19], выполненных без соавторов, автор лично ставит задачи, разрабатывает методику вычислительных экспериментов, проводит их, обрабатывает и интерпретирует результаты. Здесь определены основные возможности воздействия на расплав с целью очистки поверхности от оксидной плёнки. В работе разрабатывает метод эффективной теплопроводности. В работах [5, 7] автор совместно с А.В. Перминовым автоматизировал проведение серийных вычислительных экспериментов и произвел обработку результатов и дал их интерпретацию. Серия работ [1–4, 17] выполнена при научном консультировании проф. В.А. Демина. Автором выведено и обобщено уравнение упруго-напряжённого состояния тонкой плёнки на поверхности расплава, реализован алгоритм расчёта взаимодействия расплава, перемешиваемого ПМП, и плёнки на его поверхности, сформулирован критерий, показывающий области обобщённых частот и напряжённостей ПМП, в которых оксидные плёнки на поверхности могут быть стабильными. Автор провел численное моделирование, предложил интерпретацию результатов, обсуждение которых происходило вместе с соавторами. В задаче [13], посвящённой модификации процесса восстановления титана (идея предложена проф. А.И. Цаплиным), автором разработан модуль расчёта БМП, индукционных токов и силы Лоренца, возбуждаемых в расплаве (модуль конвекции расплава разработан В.Н. Нечаевым и Цаплиным А.И.), рассчитаны частоты и мощности индуктора, позволяющие увеличить энергетическую эффективность процесса восстановления титана. Также автор диссертации принимал участие в обсуждении результатов моделирования и написания статьи. Помимо всего прочего, автором единолично выполнен обзор [17], на основании которого выработаны подходы к описанию моделируемых процессов. В патенте [22] выступал руководителем магистранта.

2. Научная новизна диссертационного исследования

1. Разработана новая комплексная математическая модель взаимодействия тепломассопереноса в расплаве металла в условиях его нагрева при перемешивании переменным магнитным полем и упруго-напряжённой поверхностной плёнки.

2. Методами вычислительного эксперимента выявлены связи упруго-напряжённого состояния оксидной плёнки на поверхности расплава с параметрами ПМП, причём «посредником» в указанных связях является

расплавленный металл, который перемешивается и нагревается этим полем, а плёнка тормозит металл и увеличивает тепловое излучение на его поверхности.

3. 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.

4. Разработан новый вычислительный метод, позволяющий применять ал-горитмы сквозного счёта к составным системам, содержащим тонкие зазоры с радиационным теплообменом. Он основан на представлении такой системы с различными механизмами теплопереноса единым анизотропно-теплопроводным телом, свойства которого подлежат определению.

5. Впервые разработана методика оценки стабильности оксидной плёнки, позволяющая прогнозировать деформацию и разрушение плёнки при изменении напряжённости на различных частотах ПМП.

6. При помощи математического моделирования определены технологические параметры бегущего магнитного поля, которые позволяют достичь в технологии восстановления губчатого титана следующих положительных эффектов: повысить энергетическую эффективность процесса путём использования теплоты реакции для поддержания температуры расплава, продлить рабочий ресурс реторты, снижая её перегрев, а также повысить стабильность процесса восстановления титана подведением чистого магния из объёма реторты.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность данных, представленных в диссертационной работе, подтверждается согласием результатов тестирования отдельных блоков программ с аналитическими решениями [1, 8, 9], сравнением результатов вычислительных экспериментов с известными результатами других авторов, полученными как в натуральных, так и в вычислительных экспериментах [8, 9]. Сходимость расчётов показана на сгущающихся сетках в работе [5]. Адекватность модели проверена сравнением с результатами промышленного эксперимента.

4. Практическая значимость исследования

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в разработке новых математических методов, позволяющих рассчитывать радиационный теплообмен, диффузию ПМП в проводник и связанных с ней осреднённых джоулевого тепловыделения и силы Лоренца, а также в создании новой методики прогнозирования упруго напряжённого состояния оксидной

плёнки на поверхности металлического расплава в ПМП. Разработаны комплексные математические модели, позволяющие изучать влияние БМП на тепломассоперенос в реакторе для производства титана и ПМП на сопряженные тепломассоперенос в никелевом расплаве и упруго напряжённые состояния тонкой плёнки на поверхности этого расплава.

Практическая значимость состоит в разработке вычислительных алгоритмов и программных комплексов, позволяющих прогнозировать отклик сложных технических гидродинамических систем, таких как реактор для производства титана или покрытый оксидной плёнкой металл в индукционной печи на параметры накладываемого магнитного поля. Результаты работы могут быть применены на АО «Протон-Пермские моторы», применяются в АО «Региональном научно-исследовательском и проектном институте титана и магния», г. Березники и в учебном процессе в Пермском национальном исследовательском университете, г. Пермь; факты внедрения и полезности подтверждены соответствующими справками и актами.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы ФИО опубликовано 53 научные работы, в том числе 3 в ведущих рецензируемых изданиях, 16 – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и/или SCOPUS, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ и 1 патент.

Публикации в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и SCOPUS

1. **I.L. Nikulin, V.A. Demin** Mathematical model of oxide film deformation on the surface of a metallic melt in an alternating magnetic field / PNRPU Mechanics Bulletin 2022 № 1, P. 72-88. Перевод на англ. И.Л. Никулин, В.А. Демин Математическая модель деформирования оксидной плёнки на поверхности металлического расплава в переменном магнитном поле // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2022, № 1, С. 72–88, DOI: 10.15593/perm.mech/2022.1.07 (SCOPUS) (вклад автора 9 с. /17 с.)

Представлена математическая модель деформации плёнки движением расплава с учётом температурного расширения. Численно исследованы деформации плёнки для различных геометрий «индуктор-расплав» при вариации частоты. Выявлено, что плёнки более стабильны в геометрии «общее дно»: расширяется частотный диапазон стабильности и возможны большие радиусы плёнок. Приведены результаты верификации математической модели.

2. **I.L. Nikulin, V.A. Demin, A.V. Perminov** Surface film deformation by melt moving in an alternating magnetic field and the integral criterion of such film stability // *Fluid Dynamics Research*, 2022, Vol, 54, № 2, P. 1-17. (**Web of Science**) (вклад автора 9 с. / 18 с.)

Предложен критерий, позволяющий прогнозировать стабильность плёнки при изменении напряжённости переменного магнитного поля. Показано, что прогноз с применением предложенного критерия хорошо согласуется с решением полной задачи тепломассопереноса.

3. **I.L. Nikulin, V.A. Demin** Simulation of the metal melt convection and its viscoelastic interaction with dielectric film in an alternating magnetic field / *Metals and Materials International*, 2022, №28, P.2166–2179 DOI 10.1007/s12540-021-01131-2 (**Web of Science**) (вклад автора 8 с. / 14 с.)

Смоделированы течения расплава при индукционной плавке. Показано, что для некоторого диапазона частот переменного магнитного поля возможны расходящиеся на поверхности течения, которые удерживают на поверхности плёнку. При этом деформация сжатия и растяжения компенсируются, и плёнка оказывается стабильной.

4. **I.L. Nikulin, V.A. Demin, A.V. Perminov** Movement of a melt and elastic-stressed state of its oxide film in the process of induction melting // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, Vol. 94, № 6, P. 1444-1455. Перевод на англ. И.Л. Никулин, В.А. Демин, А.В. Перминов Движение металлического расплава и упруго-напряженные состояния оксидной пленки при индукционной плавке // *Инженерно-физический журнал*, 2021, Т.94, № 6, С. 1477-1488. (**Web of Science**) (вклад автора 6 с./ 12 с.)

Численно исследованы деформации, возникающие в плёнке, полностью покрывающей поверхность расплава при его движении в переменном магнитном поле разных частот. Выявлена граница перехода от индукционно навязанных течений к тепловым режимам. Приведены результаты проверки адекватности математической модели.

5. **I.L. Nikulin, A.V. Perminov** Simulation of the Averaged Flow of a Metal Melt in an Alternating Magnetic Field with Variable Amplitude and Frequency // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, Vol. 93, № 3, P. 556-566. Перевод на англ. И.Л. Никулин, А.В. Перминов Моделирование осредненного течения расплава металла при варьировании амплитуды и частоты переменного магнитного поля // *Инженерно-физический журнал*, 2020, Т. 93, № 3, С.577-586. (**Web of Science**) (вклад автора 6 с./ 10 с.)

Численно исследовано влияние свойств расплава на характер движения металла. Построены карты режимов, из которых видно, для каких частот

и напряжённостей магнитного поля свойства влияют на структуру течений, а где нет.

6. **I.L. Nikulin** Analysis of AMF Impact on Oxide Scab Rupture and Surface Cleaning in Induction Melting Technology // Magnetohydrodynamics, 2019, Vol. 55, № 1/2, P. 141-148. (**Web of Science**) (вклад автора 8 с./ 8 с.)

Численно проведён анализ технологических режимов «плавления» и «разгона плёны». Анализируются вязкие напряжения, необходимые для разрыва плёнки. Показано, что в режиме «разгон плёны» вязкие напряжения приблизительно в полтора раза выше, чем в режиме «плавление».

7. **I.L. Nikulin, A. V. Perminov** Mathematical modelling of frequency and force impacts on averaged metal flows in alternating magnetic field // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, Vol. 128, P. 1026-1032. (**Web of Science**) (вклад автора 4 с./ 7 с.)

Показано, что по изменению зависимости скорости от напряжённости магнитного поля можно определить доминирующий механизм формирования структуры течения: лоренцев или архимедов. Предложен численный критерий, который позволяет определить доминирующий механизм. На плоскости частота-напряжённость магнитного поля построены карты доминирующих механизмов.

8. **I.L. Nikulin** Analysis of possibilities of melt surface cleaning by controlling AMF frequency and distribution // Magnetohydrodynamics, 2017, Vol. 53, № 3, P. 537-546. (**Web of Science**) (вклад автора 10 с./ 10 с.)

Исследованы возможности очистки поверхности расплава от плёнки за счёт изменения пространственного распределения и частоты магнитного поля. Показано, что наиболее эффективно перестройка течений и удаление плёнок с поверхности происходит при уменьшении частоты до некоторого характерного значения. Приведены результаты верификации математической модели.

9. **I.L. Nikulin** Mathematical modelling of AMF geometry and frequency impacts on volume and surface melt flows at induction melting // Magnetohydrodynamics, 2016, Vol. 52, № 4, P. 513-526. (**Web of Science**) (вклад автора 14 с./ 14 с.)

Численно исследованы структуры течений, реализующиеся в расплаве при вариации высоты столба, геометрии «индуктор-расплав» и частоты магнитного поля. Выявлена область параметров, в которой реализуется зона стабильности плёнок – часть поверхности расплава, в которой скорости направлены к центру, что способствует накоплению и

удержанию плёнок. Приведены результаты верификации математической модели.

10. **I.L. Nikulin, A.V. Perminov** Numerical investigation of electromagnetic effects and averaged metal melt flows generated by high frequency alternating magnetic field // *Magnetohydrodynamics*, 2016, Vol. 52, № 1/2, P. 135–143. (**Web of Science**) (вклад автора 5 с./ 9 с.)

Анализируются структуры течений, реализующиеся на разных частотах. Приведена зависимость максимума функции тока от частоты. Показано, что наиболее интенсивные течения реализуются при параметре диффузии переменного магнитного поля (безразмерной частоте) равном десяти.

11. **I.L. Nikulin** Numerical simulation of melt flow control by controlling averaged electromagnetic forces generated in high frequency magnetic field // *Magnetohydrodynamics*, 2016, Vol. 52, № 4. P. 527-534. (**Web of Science**) (вклад автора 8 с./ 8 с.)

Предложена индукторная печь с двумя независимыми индукторами. Такая конструкция позволяет реализовать два режима работы: «нагрев» и «очистка поверхности». Смоделирована работа предложенной печи, показано, что время очистки поверхности от оксидных плёнок составляет около 30 с.

12. **A.V. Perminov, I.L. Nikulin** Mathematical Model of the Processes of Heat and Mass Transfer and Diffusion of the Magnetic Field in an Induction Furnace // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, Vol. 89, № 2, P. 397-409. Перевод на англ. А.В. Перминов, И.Л. Никулин Математическая модель процессов тепломассопереноса и диффузии магнитного поля в индукционной печи // *Инженерно-физический журнал*, 2016, Vol. 89, № 2, С. 388–399. (**Web of Science**) (вклад автора 7 с./ 12 с.)

Представлена математическая модель тепломассопереноса в расплаве металла, помещённого в переменное магнитное поле. Подробно описана методика расчёта осреднённых компонент силы Лоренца и джоулево мощности тепловыделения. Получена зависимость объёмной мощности тепловыделения от частоты.

13. **A.I. Tsaplin, I.L. Nikulin, V.N. Nechaev** Modelling of Electromagnetic Actions in Sponge Titanium Production // *Magnetohydrodynamics*, 2015, Vol. 51, № 4, P. 749-756. (**Web of Science**) (вклад автора 3 с./ 8 с.)

Разработана математическая модель новой конструкции реактора, содержащего индуктор бегущего магнитного поля, для производства титана магнийтермическим методом. Показано, что применение бегущего магнитного поля позволяет уменьшить перегрев реторты и расплава, использовать теплоту экзотермической реакции

восстановления титана для поддержания температуры магния, увеличить энергетическую эффективность производства и уменьшить выбросы в атмосферу.

14. **I. Nikulin, A. Perminov** The Mathematical Model of Metal Melt State Under Induction Melting // Applied Mechanics and Materials, 2015, vol. 770, P. 242-247. (**Web of Science**) (вклад автора 4 с./ 6 с.)

Представлена математическая модель тепломассопереноса в расплаве металла, помещённого в переменное магнитное поле. Исследуется проникновение переменного магнитного поля в проводник и генерация в нём индукционных токов. Построены поля джоулева тепловыделения на различных частотах.

15. **I.L. Nikulin, A.V. Perminov, A. I. Tsaplin** Mathematical model of conducting fluid convection in a non-uniform alternating magnetic field // Magnetohydrodynamics, 2013, Vol. 49, № 1/2, P. 3-9. (**Web of Science**) (вклад автора 3 с./ 7 с.)

Представлена математическая модель тепломассопереноса в расплаве металла, помещённого в переменное магнитное поле. Приводится методика расчёта магнитного поля индуктора, смоделированы его структуры. Приводятся распределения полей индукционных токов и джоулевых мощностей тепловыделения для различных частот.

16. **I.L. Nikulin, A.V. Perminov** The mathematical model of nickel melt convection in the induction melting. The solving of the magnetic subproblem // PNRPU Mechanics Bulletin, 2013, № 3, P. 200-218. Перевод на англ. И.Л. Никулин, А.В. Перминов Математическая модель конвекции никелевого расплава при индукционном переплаве. Решение магнитной подзадачи // Вестник ПНИПУ. Механика, 2013, № 3, С 192-209. (**SCOPUS**) (вклад автора 4 с./ 6 с.)

Разработана математическая модель тепломассопереноса в расплаве металла, помещённого в переменное магнитное поле. Приведены основные уравнения переноса импульса и тепловой энергии. Подробно анализируются управляющие критерии и граничные условия. Исследована сходимость решения на сгущающихся сетках.

Публикации в журналах, входящих в Перечень ВАК

17. **И.Л. Никулин** Силовые и энергетические воздействия магнитного поля на проводящую среду. Модели и эксперименты // Вестник Пермского университета. Физика, 2020, Вып. 2, С. 10-37. (**Перечень ВАК**) (вклад автора 38 с./ 38 с.)

Выполнен обзор существующих методов и технологий воздействия на проводящие среды постоянным, бегущим и переменным магнитными полями. Проанализированы общие уравнения электромагнетизма применительно к движущейся проводящей среде, приведены важные для описания безразмерные критерии. Для каждого вида приложения магнитного поля рассмотрены математические модели, уравнения моделей записаны настолько подробно, насколько этого достаточно для расчёта соответствующего воздействия. По каждому виду поля приведены данные натурных и вычислительных экспериментов.

18. И.Л. Никулин, А.В. Перминов Моделирование индукционных процессов в проводящем цилиндре, помещенном в неоднородное переменное магнитное поле. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2013, № 1(165), С. 188-195. (Перечень ВАК) (вклад автора 5 с./ 8 с.)

Разработана математическая модель тепломассопереноса в расплаве металла, помещённого в переменное магнитное поле. На основании технологического процесса определены основные управляющие параметры и граничные условия. Приведены результаты расчётов индукционных полей и мощности тепловыделения.

19. И.Л. Никулин Применение сквозного счета к составным системам, содержащим участки с радиационным теплообменом / Математическое моделирование, 2009, Т. 21, № 10, С. 3-6. (Перечень ВАК) (вклад автора 4 с./ 4 с.)

Предложена методика моделирования участков с радиационным теплообменом, построенная на замене областей с излучением областями с диффузионным механизмом переноса тепловой энергии. Скачок температуры на границах зазора с радиационным теплообменом моделируется введением виртуального слоя с эффективным коэффициентом теплопроводности. Показана сходимость решения на сгущающихся сетках.

Свидетельства защиты прав РИД

20. И.Л. Никулин, А.В. Перминов, В.А. Демин Вычислительное моделирование движения расплава в переменном магнитном поле и его взаимодействие с поверхностной оксидной плёнкой. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617351 (2022 г.)

Зарегистрирован программный комплекс, в котором реализована математическая модель, описанная в работах [1-12, 14-18]. На основе технологических параметров индукционной печи и свойств шихты данный комплекс позволяет рассчитывать магнитные поля индуктора и

индукционных токов, плотности индукционных токов, силы Лоренца и мощность джоулева тепловыделения, распределения скоростей и температур в расплаве, а также напряжённо-деформированное состояние оксидной плёнки на поверхности расплава.

21. В.Н. Нечаев, А.И. Цаплин, **И.Л. Никулин** Вычислительное моделирование неравновесных процессов тепломассопереноса в реакторе для получения пористого титана при осуществлении внешних электромагнитных воздействий. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616960 (2016 г.)

Зарегистрирован программный комплекс, в котором реализована математическая модель, описанная в работе [13]. Данный комплекс позволяет рассчитывать тепломассоперенос в расплаве магния при магнийтермическом производстве титана. При наличии индуктора бегущего магнитного поля рассчитывается вклад электромагнитных сил, позволяющих управлять конвективными потоками магния.

22. И.Р. Дроздов., **И.Л. Никулин** Волоконно-оптический датчик температуры // Патент на полезную модель №140576 (2014 г.)

Предложена конструкция тигля для индукционной плавки с каналом, в которое уложен оптический световод с записанными в нём брэгговскими решётками. Такая конструкция позволяет измерять пространственное распределение температуры металла непосредственно во время индукционной плавки, так как внешнее переменное магнитное поле не оказывает влияние на излучение в световоде и на решётки, реагирующие на изменение температуры.

Публикации в журналах, входящих в РИНЦ, материалы конференций и тезисы докладов

23. И.Р. Дроздов, **И.Л. Никулин** Волоконно-оптический датчик температуры на основе решеток показателя преломления // Вестник современной науки, 2015, № 5, С. 24-28.

24. **I. Nikulin**, V. Demin Numerical simulation of heat and mass transfer in a metal melt and deformations in a dielectric film during induction melting // Russian Conference on Magnetohydrodynamics, September 20-22, 2021, Perm, Russia.

25. **I.L. Nikulin**, V.A. Demin The influence of the melt flow on the state of surface oxide film during an induction melting // Non-Equilibrium Processes in Continuous Media: Intern. Symp., Perm, Sept. 16th-18th, 2021: progr. and book of abstr., 2021, P. 91. <http://npcm-perm.tilda.ws/#rec158012007>

26. **И.Л. Никулин**, В.А. Демин Численное моделирование тепломассопереноса в металлическом расплаве и диэлектрической плёнке при

индукционной плавке // XXII Зимняя школа по механике сплошных сред, г. Пермь, 22-26 марта 2021 г. тез. докл., 2021, С. 235.

27. **И.Л. Никулин**, В.А. Демин Математическое моделирование упругонапряжённого равновесия диэлектрической плёнки на поверхности проводящей жидкости в переменном магнитном поле // Пермские гидродинамические научные чтения: сб. материалов VII Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти проф. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова, г. Пермь, 22-24 окт. 2020 г, 2020. С. 304-306.

28. **И.Л. Никулин**, В.А. Демин Математическая модель динамики диэлектрической плёнки на поверхности расплава металла в высокочастотном магнитном поле // Пермские гидродинамические научные чтения // сб. материалов VI Всерос. конф., посвящ. памяти проф. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова, г. Пермь, 28–29 нояб. 2019 г., 2019. С. 121-123.

29. **I. Nikulin** Analysis of melt surface cleaning possibilities by controlling frequency and spatial distribution of alternating magnetic field // Russian Conference on Magnetohydrodynamics, June 18–21, 2018, Perm, Russia: book of abstracts / Inst. of Continuous Media Mechanics UB RAS, Пермь: Ново-принт, 2018, P. 93.

30. **I. Nikulin**, A. Perminov, E. Bryukhanova Modeling of averaged metal flows in an alternating magnetic field with a radiation heatsink from a free surface // Russian Conference on Magnetohydrodynamics, June 18–21, 2018, Perm, Russia: book of abstracts/ Inst. of Continuous Media Mechanics UB RAS, Пермь: Новопринт, 2018, P. 94.

31. T. Karasev, **I. Nikulin**, A. Perminov Numerical modeling of flows and surface stresses in melt-oxide scab system during induction heating // Russian Conference on Magnetohydrodynamics, June 18–21, 2018, Perm, Russia: book of abstracts / Inst. of Continuous Media Mechanics UB RAS, Пермь: Ново-принт, 2018, P. 52.

32. **И.Л. Никулин**, С.А. Никулина Анализ динамики реверсирования поверхностных течений проводящей жидкости в высокочастотном магнитном поле // Пермские гидродинамические научные чтения: сб. материалов V Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти проф. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова, г. Пермь, 26-29 сент. 2018 г. Пермь: Perm University Press, 2018, С. 222-224.

33. **И.Л. Никулин**, А.В. Перминов, С.А. Никулина Влияние частоты и напряженности переменного магнитного поля на осреднённые течения металла // Пермские гидродинамические научные чтения : сб. материалов V Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти проф. Г. З. Гершуни, Е.

М. Жуховицкого и Д. В. Любимова, г. Пермь, 26-29 сент. 2018 г. Пермь: Perm University Press, 2018, С. 225-227.

34. Е. В. Брюханова, **И. Л. Никулин** Моделирование осредненных течений металла в переменном магнитном поле с радиационным теплоотводом со свободной поверхности // ВНКСФ 24 Двадцать четвертая Все-рос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых, г. Томск, 31 марта - 7 апр. 2018 г.: материалы конф., информ. бюл./ Екатеринбург : Изд-во АСФ России, 2018, С. 435-436.

35. А. В. Перминов, **И. Л. Никулин**, Т. О. Карасев Моделирование течений и поверхностных напряжений в расплаве покрытым оксидной пленкой, во время индукционной плавки // Пермские гидродинамические научные чтения: сб. материалов V Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти проф. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова, г. Пермь, 26-29 сент. 2018 г. Пермь: Perm University Press, 2018, С. 243-245.

36. **И. Л. Никулин** Влияние параметров переменного магнитного поля на течения в проводящей жидкости // XX Зимняя школа по механике сплошных сред: тезисы докладов, Пермь, 13-16 февр. 2017 г. Пермь: Новопринт, 2017, С. 243.

37. **И. Л. Никулин**, И. С. Файзрахманова, А. В. Перминов Моделирование конвективных течений в условиях интенсивного теплообмена и высокочастотного магнитного поля // Неравновесные процессы в сплошных средах: материалы междунар. симп., г. Пермь, 15-18 мая 2017 г.. В 2 т. Т. 2, Пермь: Издат. центр ПГНИУ, 2017, С. 113-115.

38. **I. Nikulin**, A. Perminov, I. Fayzrakhmanova High frequency non-uniform magnetic field impact on average flows in metal melt // EFMC11: 11th European Fluid Mechanics Conference, Spain, Seville, Sept. 12-16, 2016.

39. A. Teimurazov, **I. Nikulin**, P. Frick, F. Stefani Numerical simulations of liquid metal convection in a cylindrical vessel of the apparatus for titanium reduction // EFMC11: 11th European Fluid Mechanics Conference, Spain, Seville, Sept. 12-16, 2016.

40. В.Н. Нечаев, А.И. Цаплин, **И.Л. Никулин** Математическое моделирование при получении пористого титана // СМЗ – Соликамский Магний-евый Завод 1936-2016: междунар. науч.-техн. конф., г. Соликамск, 16 марта 2016 г.: тезисы, Соликамск: Типограф, 2016, С. 12-13.

41. **I.L. Nikulin**, A.V. Perminov Mathematical model of heat and mass transfer in conductive fluid under the action of high frequency magnetic field // Russian conference on Magneto Hydrodynamics, June 22–25, 2015, Perm, Russia: book of abstracts. Пермь: Пресстайм, 2015, Р. 67.

42. I.L. Nikulin, A.I. Tsaplin, V.N. Nechaev The influence of electromagnetic steering at the magnesium melt dynamics in industrial reactor // Russian conference on Magneto Hydrodynamics, June 22–25, 2015, Perm, Russia: book of abstracts. Пермь: Пресстайм, 2015, P. 66.

43. И.Л. Никулин, А.В. Перминов Математическая модель тепломассопереноса в расплаве в тигле индукционной печи // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл., г. Пермь, 24-27 февр. 2015 г. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2015, С. 221.

44. И.Л. Никулин, А.В. Перминов Математическое моделирование тепломассопереноса в расплаве в тигле индукционной печи // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред: сб. ст. Пермь: Изд-во Ин-та механики УрО РАН, 2015, С. 224-229.

45. А.И. Цаплин, В.Н. Нечаев, И.Л. Никулин Моделирование электромагнитных воздействий в технологии восстановления и вакуумной сепарации пористого титана // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. 24–25 сент. 2015 г. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015, С. 237-243.

46. И.Л. Никулин, А.В. Перминов Моделирование конвекции жидкого металла в тигле индукционной печи // Актуальные задачи механики сплошных сред: тез. докл. и программа Всерос. науч.-практ. конф., г. Пермь, 18-19 нояб. 2014 г. Пермь: ПГГПУ, 2014, С. 36.

47. И.Р. Дроздов, И.Л. Никулин Разработка волоконно-оптического датчика температуры на основе решеток показателя преломления // Прикладная математика, механика и процессы управления: тез. докл. всерос. науч.-техн. интернет-конф. студентов и молодых ученых, Пермь, 4-19 нояб. 2013 г. CD ROM, Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014, С. 176-177.

48. И. Р. Дроздов, И. Л. Никулин Разработка конструкции волоконно-оптического датчика температуры на основе решеток показателя преломления // Прикладная математика, механика и процессы управления: материалы Всерос. науч.-техн. интернет-конф. студентов и молодых ученых, г. Пермь, 4-19 нояб. 2013 г. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014, С. 286-294.

49. И.Л. Никулин, А.В. Перминов Конвекция металлического расплава в неоднородном переменном магнитном поле // Теплофизика и энергетика: конф. с междунар. участием "VIII Всерос. семинар вузов по теплофизике и энергетике", г. Екатеринбург, 12-14 нояб. 2013 г.: сб. тез. докл. Екатеринбург: УрФУ, 2013, С. 121.

50. И.Л. Никулин, А.В. Перминов Математическая модель конвекции проводящей жидкости в неоднородном переменном магнитном поле // XVIII

Зимняя школа по механике сплошных сред : тез. докл., г. Пермь, 18-22 февр., 2013 г. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2013, С. 261.

51. А.И. Цаплин, И.Л. Никулин, А.В. Перминов Конвекция проводящей жидкости в неоднородном переменном магнитном поле // Российская конференция по магнитной гидродинамике: тез. докл., г. Пермь, 18-22 июня 2012 г. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2012, С. 103.

52. В.А. Демин, И.Л. Никулин, М.И. Петухов Межфазные процессы как источник макроскопического движения в открытых системах // Сборник тезисов докладов минисимпозиума “Задачи механики деформируемых сред с поверхностями раздела” / ИВМ СО РАН, г. Красноярск, 2022.

53. И.Л. Никулин, В.А. Демин, С.А. Никулина Численное моделирование разрыва поверхностной пленки движением расплава в переменном магнитном поле // XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, 13-17 февраля 2023 г. Тезисы докладов. – Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2023 г. – 392 с.

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

Диссертация И.Л. Никулина «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических включений» соответствует специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим областям исследования, указанным в паспорте специальности: п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п. 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

7. Соответствие диссертационной работы требованиям, установленным п. 13 и п. 14 «Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ»

Диссертация Иллариона Леонидовича Никулина «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических включений»

- является законченной квалификационной работой, в которой изложены результаты теоретических исследований технологических

процессов производства губчатого титана магнийтермическим способом и индукционной плавки жаропрочных никелевых сплавов в разрезе очистки поверхности расплава от неметаллических включений, таких как расплавленные соли или оксидные плёнки;

- соответствует требованиям Порядка присуждения учёных степеней в ПНИПУ и п. 9 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями, принятыми Постановлением Правительства РФ от 21 сентября 2016 г. № 335 и содержит разработанные и научно обоснованные теоретические положения, методические и программные средства для изучения закономерностей и формирования движения металлических расплавов электромагнитными полями с целью очистки их поверхностей от неметаллических включений;

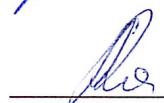
- **рекомендуется к защите** на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Общая физика». Присутствовало на заседании 26 человек. Результаты голосования: «за» – единогласно, протокол № 14 от «22» февраля 2023 г.

Заведующий кафедрой «Общая физика»
доктор физ.-мат. наук, доцент

 / А.В. Перминов

Секретарь кафедры «Общая физика»

 / М.А. Коновалова