

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19  
по диссертации Никулина Иллариона Леонидовича  
на соискание ученой степени доктора технических наук**

Диссертация «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических включений» по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите «10» марта 2023 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом Д ПНИПУ.01.19, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета № 35-О от «06» апреля 2022 г. в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым – четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. N 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. N 1792-р.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре «Общая физика».

**Научный консультант**– доктор физико-математических наук, профессор Демин Виталий Анатольевич, заведующий кафедрой теоретической физики ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

**Официальные оппоненты:**

**Кривилев Михаил Дмитриевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред» ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет».

**Минаков Андрей Викторович**, доктор физико-математических наук, директор Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

**Шеремет Михаил Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Научно-исследовательской лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург. Отзыв ведущей организации утвержден Германенко Александром Викторовичем, доктором физико-математических наук, доцентом, проректором по науке, заслушан на заседании кафедры «Электротехника» и подписан Фризенем Василием Эдуардовичем, доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Электротехника».

По теме диссертации соискателем опубликовано **53** научных труда, в том числе **22** работы – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени, из них **16** работ – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science Core Collection и Scopus, соискателем получено **2** свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, **1** патент на полезную модель. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

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, описывающая деформации плёнки движением расплава с учётом температурного расширения. Численно исследованы деформации плёнки для различных геометрий «индуктор-расплав» при вариации частоты магнитного поля. Выявлено, что плёнки более стабильны в геометрии «общее дно»: расширяется частотный диапазон стабильности и возможны большие радиусы плёнок. Приведены результаты верификации разработанной математической модели на модельных задачах, проверена сходимость на сгущающихся сетках.*

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), (9/18).

*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 тепло-массопереноса.*

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), (8/14).

*Приведены результаты моделирования 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), (6/12).

*Представлены результаты расчета деформаций, возникающих 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. Приведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, которые свидетельствуют об адекватности предлагаемой 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), (6/10).

*Приведены результаты массового вычислительного эксперимента, в котором изучалось влияние свойств расплава на характер движения металла. Построены карты режимов, из которых видно, для каких частот и напряжённостей магнитного поля свойства расплава наиболее существенно влияют на структуру течений.*

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), (8/8).

*Приведены результаты анализа технологических режимов «плавления» и «разгона плены». Определены вязкие напряжения, необходимые для разрыва плёнки. Показано, что*

в режиме «разгон плены» 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), (4/7).

*Показано, что по изменению зависимости скорости движения расплава 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 области лоренцева и архимедова механизмов формирования течения.*

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), (10/10).

*Методами математического моделирования выявлены 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 проверки вычислительной реализации модели на задачах, имеющих аналитические решения, согласием с результатами натурных экспериментов показана корректность моделирования турбулентного теплопереноса.*

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), (14/14).

*Представлены результаты численного анализа структур 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. Показано согласие расчётных распределения скорости и зависимости скорости от индукции магнитного поля с данными других авторов.*

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), (5/9).

*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, поскольку при этом значении магнитное поле проникает на всю глубину проводника, возбуждая в нём силу Лоренца.*

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), (8/8).

*Предложена модель индукторной печи с двумя независимыми индукторами. Такая конструкция позволяет реализовать два режима работы: «нагрев» и «очистка поверхности». Приведены результаты моделирования работы 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), (7/12).

*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), (3/8).

*Приведено описание математической модели новой конструкции реактора, содержащего индуктор бегущего магнитного поля, для производства титана магнийтепмическим 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), (4/6).

*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, рассчитанные при 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), (3/7).

*Представлена математическая модель теплопереноса в расплаве металла, помещённого в переменное магнитное поле. Приводится методика расчёта магнитного поля индуктора, анализируются результаты моделирования 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), (4/6).

*Представлено описание разработанной математической модели теплопереноса в расплаве металла, помещённого в переменное магнитное поле. Приведены основные уравнения переноса импульса и тепловой энергии. Подробно анализируются управляющие критерии подобия 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), (28/28).

*Приведен обзор существующих методов и технологий воздействия на проводящие среды постоянным, бегущим и переменным магнитными полями. Проанализированы общие уравнения электромагнетизма применительно к движущейся проводящей среде, выделены 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 натуральных 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), (5/8).

*Представлена математическая модель тепломассопереноса в расплаве металла, помещённого в переменное магнитное поле. На основании описания 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), (4/4).

*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. На основе технологических параметров индукционной печи и свойств шихты данный комплекс позволяет рассчитывать амплитуды напряжённостей магнитных полей индуктора и индукционных токов, плотности индукционных токов, силы Лоренца и мощность джоулевого 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. Данный комплекс позволяет рассчитывать тепломассоперенос в расплаве магния при магнийтермическом производстве титана. Для случая наличия 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 котором уложен оптический световод со сформированными 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.*

**Диссертационный совет отмечает,** что на основании выполненных соискателем исследований **разработаны новые математические методы моделирования объектов и явлений, реализованы эффективные численные методы и алгоритмы в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента, проведены комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.**

**Предложены оригинальная методика** вычисления осреднённых силовых и тепловых эффектов, связанных с переменным магнитным полем (силы Лоренца и мощности джоулевых источников теплоты); **новый вычислительный метод**, позволяющий применять алгоритм сквозного счёта к составным системам, содержащим тонкие зазоры с радиационным теплообменом, сводя решение к задаче теплопереноса в анизотропно теплопроводном теле. *На основании анализа результатов комплексных исследований с применением вычислительного эксперимента предложены технические решения и режимы*, позволяющие очищать поверхность расплавленного металла от оксидных плёнок или расплавленных солей при индукционной плавке и при магнийтермическом восстановлении титана.

**Доказаны закономерности** формирования напряжённо-деформированных состояний поверхностной оксидной плёнки для разных параметров магнитного поля при индукционной плавке; **перспективность** использования режимов с понижением частоты магнитного поля после плавления шихты металла для очистки поверхности расплава от оксидной плёнки.

**Введены** новые интегральные критерии: критерий, позволяющий установить доминирующий механизм формирования течения в магнитном поле, критерий стабильности оксидной плёнки.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что разработаны **методики, вносящие вклад в расширение возможностей моделирования** поведения расплава металла с оксидной плёнкой на поверхности при индукционной плавке: **методика расчёта осреднённых силовых и тепловых эффектов** переменного



магнитного поля; методика оценки стабильности плёнки; вычислительный метод, построенный на замещении тонких зазоров с радиационным теплообменом участками с анизотропией теплопроводности, который расширяет границы применимости методов сквозного счёта.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс существующих базовых методов исследования: метод конечных разностей для дискретизации дифференциальных уравнений, метод переменных направлений для разделения переменных, методы решения систем линейных уравнений: скалярная прогонка, последовательная релаксация и *LU*-факторизация, методы решения нелинейных уравнений: метод секущих и дихотомия.

**Изложены** математические модели тепломассопереноса и деформации для технологических процессов индукционной плавки и восстановления титана магнийтермическим способом; вычислительные методы моделирования радиационного теплообмена в тонких зазорах, расчёта осреднённых силовых и тепловых эффектов переменного магнитного поля, оценки стабильности поверхностной плёнки; результаты вычислительных экспериментов, в которых показано поведение расплава с неметаллической пленкой на поверхности в магнитных полях.

На основании анализа результатов вычислительных экспериментов **раскрыты** механизмы действия магнитного поля на расплавленный металл, определены параметры, при которых происходит эффективная очистка поверхности.

С использованием вычислительного эксперимента **изучены** поведение расплавленного металла в магнитном поле, влияние пространственного распределения магнитного поля, его частоты и напряжённости на структуру и интенсивность течений в металле; связи характеристик напряжённо-деформированного состояния оксидной плёнки на поверхности расплава с параметрами магнитного поля.

**Проведена модернизация** подходов к определению параметров технологических режимов, в которых реализуется очистка поверхности расплавленного металла от оксидных плёнок в ходе индукционной плавки и удаления расплавленных солей при магнийтермическом восстановлении титана.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что *разработаны и зарегистрированы* проблемно-ориентированные программные комплексы: «Вычислительное моделирование неравновесных процессов тепломассопереноса в реакторе для получения пористого титана при осуществлении внешних электромагнитных воздействий», «Вычислительное моделирование движения расплава в переменном магнитном поле и его взаимодействие с поверхностной оксидной

плёнкой». Они позволяют с использованием геометрических, теплофизических и электрических параметров, рассчитывать тепломассоперенос в расплавленном металле, и на основе анализа результатов выбирать параметры магнитного поля, которые обеспечат очистку поверхности от неметаллических включений. Такие программные комплексы могут использоваться на металлургических и машиностроительных предприятиях, использующих технологии индукционной плавки и металлотермии.

Программный комплекс «Вычислительное моделирование неравновесных процессов тепломассопереноса в реакторе для получения пористого титана при осуществлении внешних электромагнитных воздействий» **внедрён** в АО «Региональный научно-исследовательский институт титана и магния», г. Березники, о чём получена **справка о использовании**.

Программный комплекс «Вычислительное моделирование движения расплава в переменном магнитном поле и его взаимодействие с поверхностной оксидной плёнкой» позволил рекомендовать эффективные технологические режимы индукционной плавки и рекомендуется к применению на АО «Протон-Пермские моторы», г. Пермь, о чём получена **справка о возможности применения на АО «Протон-ПМ» результатов работы**.

Разработанные математические модели, реализации численных методов и принципы построения программных комплексов **используются в учебном процессе** ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, о чём получен **акт использования**.

Результаты диссертации могут применяться для разработки перспективных устройств и режимов их работы, позволяющих очищать поверхность расплавленного металла от неметаллических включений, повышая этим энергетическую эффективность процесса и выход годного.

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила адекватность комплексной модели. Описания генерации индукционных токов, силы Лоренца, джоулевой теплоты, переноса импульса и тепловой энергии в расплаве, а также упругого деформирования поверхностной плёнки построены на известных законах электромагнетизма (законы Ома, Джоуля-Ленца и Био-Савара-Лапласа, уравнения Максвелла), тепломассопереноса (уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска с учётом силы Лоренца, Фурье-Кирхгофа с учётом конвективного вклада в теплоперенос и джоулева тепловыделения, законы Стефана-Больцмана для излучения и вязкого трения Ньютона для взаимодействия текущего расплава и плёнки) и теории упругости (классическая гипотеза Дюамеля-Неймана и закон Гука) и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации. Представление о квазитвёрдом

представлении оксидных плёнок и электромагнитном влиянии на расплавленный металл для очистки его поверхности базируются на анализе практики и обобщении передового опыта. **Использованы** сравнения авторских результатов и опубликованных в открытой печати экспериментальных данных Лаборатории физической гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь), Лаборатории магнитной гидродинамики Гельмгольц-центра (г. Дрезден, г. Россендорф, Германия), АО «Протон – Пермские моторы» (Пермь), а также других данных, опубликованных в рецензируемой печати по рассматриваемой тематике. **Установлено** качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике. Кроме того, установлена сходимость решений на сгущающихся сетках, а для частных случаев результаты согласуются с аналитическими решениями.

**Личный вклад соискателя** состоит в следующем: автор является инициатором и основным исполнителем работ по моделированию очистки поверхности расплава жаропрочных никелевых сплавов от оксидных плёнок. В соавторстве развил оригинальный подход к описанию влияния переменного магнитного поля в проводник, разработал методику расчёта параметров магнитного поля индукционных токов, осреднённых объёмной силы Лоренца и источников джоулевой теплоты. Автором лично разработан и реализован вычислительный алгоритм решения задачи тепломассопереноса. В серии работ, выполненных без соавторов, ставил и проводил вычислительные эксперименты, анализировал и интерпретировал их результаты. Автором получено уравнение состояния поверхностной тонкой плёнки, реализован алгоритм расчёта её взаимодействия с расплавом в магнитном поле, проведены вычислительные эксперименты. В процессе решения задачи, посвящённой модификации процесса восстановления титана, автором разработан модуль расчёта параметров бегущего магнитного поля, индукционных токов и силы Лоренца, возбуждаемых в расплаве. Автор принимал участие в анализе результатов моделирования и написании статей. Автор выполнил и подготовил к публикации научную обзорную работу по силовому и энергетическому действию магнитных полей на проводящие среды; а также руководил разработкой датчика температуры, на который получен патент.

**Диссертационный совет пришел к выводу** о том, что диссертация Никулина И.Л. представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 09 декабря 2021 г. № 4334-В: в ней **изложено и научно обосновано** решение важной проблемы, связанной с построением физико-математической модели для описания

взаимодействия расплава металла с неметаллом на поверхности в электромагнитном поле, разработкой и алгоритмической реализацией математической модели для исследования закономерностей поведения расплавленного металла в электромагнитных полях с целью очистки их поверхности от неметаллических включений, которая **имеет важное значение** для повышения энергетической эффективности металлургических процессов и улучшения качества продукции.

На заседании «23» мая 2023 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19 принял решение присудить Никулину Иллариону Леонидовичу ученую степень доктора технических наук (протокол заседания № 4).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 13 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 13, против присуждения ученой степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,  
доктор физико-математических наук, профессор

П.В. Трусов



Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,  
кандидат физико-математических наук, доцент

Е.Л. Кротова



«23» мая 2023 г.

М.П.

