



Минобрнауки России
Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук»
(ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

125047, Москва, Миусская пл., 4 Тел. 8 (499) 220-72-33 Факс 8 (499) 972-07-37
http://keldysh.ru e-mail: office@keldysh.ru
ОКПО 02699381 ОГРН 1037739115787 ИНН/КПП 7710063939/771001001

09.12.2025 № 11103- 9422/1020

На № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного учреждения
«Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной
математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук»
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН
М.В. Якововский



декабрь 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Диссертация «Многомасштабное математическое моделирование магнетиков» выполнена в федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук». В период подготовки диссертации соискатель Иванов Антон Валерьевич работал в указанном учреждении в отделе № 3 в должности старшего научного сотрудника.

В 1999 году соискатель окончил физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по специальности «Физика». Ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 (математическое моделирование, численные методы и комплексы программ) присуждена решением диссертационного совета Д002.024.02 при Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН от 13 ноября 2007 года, диплом ДКН № 054997.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Актуальность рассматриваемой темы связана с тем, что устройства спинтроники и магнитной наноэлектроники рассматриваются как один из вариантов новой элементной базы, способной лечь в основу нового поколения систем для получения, хранения и обработки информации, включая квантовые компьютеры. Особый интерес представляет магниторезистивная память за счет исключительно высокой надежности хранения информации. Создание таких устройств требует проведения колоссального объема расчетов для выбора конструкционных материалов, оптимизации геометрии и режимов работы устройства. Особенностью таких устройств является работа в импульсном режиме, сопровождаемая скачками внешнего поля и (в случае термоассистированной магниторезистивной памяти) температуры, что требует развития иерархии математических моделей, разработки алгоритмов и создания специализированных программных комплексов.

Наиболее общей математической моделью магнетика, способной описывать весь интересующий спектр явлений, является модель атомистической спиновой динамики. Для решения инженерных задач эта модель обладает слишком высокой вычислительной сложностью. Решение инженерных задач требует применения микромагнитных моделей, описывающих магнетик в приближении сплошной среды. Традиционная микромагнитная модель, основанная на уравнении Ландау-Лифшица-Блоха, построена в приближении среднего поля, которое плохо описывает быстропротекающие процессы в ферромагнетике. При таких процессах основную роль играет сильное обменное взаимодействие, приводящее к возникновению сильных корреляций между ближайшими соседями, что не учитывается в приближении среднего поля. Таким образом, в настоящий момент не существует общепринятой математической модели, способной корректно, с приемлемой для проектирования устройств спинтроники вычислительной сложностью, описывать динамику магнетика с учетом влияния быстро изменяющихся температуры и внешних полей.

Целью рассматриваемого диссертационного исследования является развитие иерархии математических моделей, разработка вычислительных методов и комплексов программ для описания магнетиков с различными кристаллическими решетками, находящихся под влиянием быстро меняющихся температуры и внешнего поля.

На защиту выносятся следующие результаты работы.

1. Построена новая математическая модель магнетика на основе системы уравнений корреляционной магнитодинамики (CMD), учитывающая парные корреляции.
2. Модель CMD оперирует с расширенным фазовым пространством, явно учитывает параметр ближнего порядка и тип кристаллической решетки, обеспечивает хорошее согласие с результатами атомистического

моделирования в широком диапазоне параметров в различных постановках, устраняет недостатки моделей приближении среднего поля.

3. Разработана термодинамически обусловленная модификация метода РК4 для решения системы из $105 \div 9$ уравнений атомной спиновой динамики (ASD).
4. Разработаны новые методы расчета коэффициентов CMD (определяющих соотношений) на основе вида многочастичных функций распределения и на основе анализа результатов ASD расчетов. Для трех кристаллических решеток получены компактные аналитические выражения для коэффициентов CMD пригодные для решения прикладных задач.
5. Разработаны новые численные методы расчета статистической суммы и энтропии классического магнетика Гейзенберга.
6. Созданы программные комплексы StatASD и CMDlib для моделирования магнетиков

Все выносимые на защиту результаты являются **новыми и оригинальными**. Развитие иерархии математических моделей магнетика основано на новой аппроксимации многочастичных функций распределения, учитывающей корреляции между ближайшими соседями и построенной автором. Приведенные в работе численные методы и результаты расчетов являются новыми и оригинальными, поскольку получены с учетом этой аппроксимации.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечена применением современных обоснованных представлений магнетизма, статистической физики и методов вычислительной математики. Особое внимание уделено валидации системы уравнений корреляционной магнитодинамики, полученной в результате развития иерархии математических моделей магнетика. Валидация проведена путем всестороннего сравнения результатов численного моделирования с результатами общепринятой атомистической модели классического магнетика Гейзенберга. Корректность расчетов в рамках атомистической модели классического магнетика Гейзенберга проверена путем сравнения с аналитическими решениями на широком наборе тестовых задач.

Практическая значимость результатов. Разработан комплекс средств математического моделирования (математические модели, вычислительные методы, алгоритмы и программы) для решения крупной научно-прикладной задачи — описания магнетиков с учетом влияния быстро меняющихся температуры и внешних полей. Результаты работы дают основу для разработки новых средств моделирования, предназначенных для создания новых устройств спинтроники и магнитной наноэлектроники, способных выступать в качестве элементной базы для вычислительной техники нового поколения.

Материалы диссертации полно представлены в 39 **работах, опубликованных соискателем** в рецензируемых изданиях, из них 31 из Перечня ВАК по специальности 1.2.2. Все опубликованные результаты по теме диссертационной работы получены **автором лично**. В работах, опубликованных в соавторстве, вклад автора является определяющим.

К основным публикациям относятся:

1. Иванов А.В., Зипунова Е.В., Хилков С.А. Уравнения корреляционной магнитодинамики для ферромагнетиков // Письма в ЖЭТФ. — 2022. — Т. 115, № 3. — С. 176–183.
2. Иванов А.В. Кинетическое моделирование динамики магнетиков // Математическое моделирование. — 2007. — Т. 19, № 10. — С. 89–104.
3. Хилков С.А., Иванов А.В. Резонансные свойства суперпарамагнетиков при малых амплитудах внешнего периодического поля // Математическое моделирование. — 2015. — Т. 27, № 8. — С. 96–110.
4. Зипунова Е.В., Иванов А.В. Выбор оптимальной численной схемы для моделирования системы уравнений Ландау–Лифшица с учетом температурных флуктуаций // Математическое моделирование. — 2014. — Т. 26, № 2. — С. 33–49.
5. Хилков С.А., Иванов А.В., Зипунова Е.В. Моделирование сильно неравновесных процессов в магнетиках на основе уравнений физической кинетики // Математическое моделирование. — 2016. — Т. 5, № 28. — С. 24–31.
6. Замятин С.В., Иванов А.В. Вычисление статистической суммы классического магнетика Гейзенберга в линейном приближении // Математическое моделирование. — 2025. — Т. 37, № 3. — С. 100–112.
7. Моделирование фазовых диаграмм переключения для термоассистированных наноприборов MRAM / И.М. Искандарова, А.В. Иванов, А.А. Книжник и др. // Российские нанотехнологии. — 2015. — Т. 10, № 11-12. — С. 112–117.
8. Иванов А.В., Хилков С.А. Библиотека aiwlib — инструмент для создания приложений численного моделирования, визуализации и анализа результатов // Научная визуализация. — 2018. — Т. 10, № 1. — С. 110–127.
9. Иванов А.В., Хилков С.А. Бета-аппроксимация двухчастичной функции распределения при описании цепочек фазовых осцилляторов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2017. — № 87. — С. 19. — <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-87>.
10. Иванов А.В. Учет корреляций между ближайшими соседями при микромагнитном моделировании // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. — № 118. — С. 30. — <https://doi.org/10.20948/prepr-2019-118>.
11. Иванов А.В. Уравнения корреляционной магнитодинамики для антиферро- и ферромагнетиков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2021. — № 106. — С. 13. — <https://doi.org/10.20948/prepr-2021-106>.

12. Иванов А.В. Расчет энтропии классического ферромагнетика Гейзенберга на основе аппроксимации двухчастичных функций распределения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2024. — № 81. — С. 23. — <https://doi.org/10.20948/prepr-2024-81>.

Текст диссертации проверен на использование заимствованного материала без ссылки на авторов и источники заимствования. После исключения всех корректных совпадений иных заимствований не обнаружено.

Диссертационная работа Иванова Антона Валерьевича **соответствует следующим разделам паспорта специальности 1.2.2.** – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: **п.1** «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»; **п.3** «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно - ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов»; **п.8** «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», а также соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (ред. от 25.01.2024 № 62) и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение принято на заседании семинара «Вычислительные методы и математическое моделирование» им. Ю.П. Попова 19 мая 2025 года.

На заседании семинара присутствовало 15 чел. Среди них 6 докторов физико – математических наук.

Результаты голосования: «за» - 15 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел.

Протокол № 328 от 19 мая 2025 года.

Руководитель семинара,
гл.н.с., и.о. зав. отд. № 11
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
профессор, д.ф.-м.н.



М.П. Галанин

Секретарь семинара,
н.с. отд. № 11
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
к.ф.-м.н.



А.О. Гусев