

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Михайлова Евгения Александровича
на тему: «Эволюционные модели промежуточного типа
для магнитного поля в проводящей среде»
по специальности 1.3.3 – «теоретическая физика»

Диссертационная работа Евгения Александровича Михайлова посвящена теоретическому исследованию магнитных полей в несжимаемых сплошных средах, обладающих свойством высокой электропроводности, а именно, разработке физико-математических методов построения и исследования моделей, сочетающих возможность как аналитической, так и обладающей высокой точностью результатов численной реализации.

Актуальность темы диссертационного исследования не вызывает сомнений, поскольку обусловлена как важностью моделируемых астрофизических явлений и технологических процессов в электрометаллургических системах, так и ценностью аналитических и не требующих чрезмерных объёмов вычислительных ресурсов численных решений сложных задач теоретической физики, которые не только позволяют выявить основные, доминирующие эффекты исследуемых процессов, но и служат значимым фундаментом для проверки, верификации порой весьма громоздких вычислительных алгоритмов, используемых для решения задач полного магнитогидродинамического динамо, как актуальных прикладных задач высокой степени важности.

Анализ экспериментальных астрономических данных свидетельствует о главенствующей роли в динамике астрофизических объектов крупномасштабных процессов, испытывающих влияние их вращения, исследование которых представляет значительную сложность в связи как с наличием боль-

шого числа воздействующих факторов, таких как сила Кориолиса, сферическая геометрия, сила Лоренца, так и с невозможной потенциальностью изучаемых динамических явлений. В связи с этим, посвященные данной тематике работы, хотя и многочисленны, но проблема далека от ее полного решения.

Кроме того, потребности развития новых технологий приводят к интенсивным исследованиям динамических процессов в электропроводящей жидкой среде. Следует отметить, что в настоящее время с бурным развитием компьютерных и информационных технологий возможно численное интегрирование полных систем эволюционных уравнений магнитной гидродинамики на продолжительные временные сроки с достаточно хорошим пространственным разрешением для реальных объектов. Однако численные методы без предварительного аналитического исследования не позволяют качественно оценить динамический процесс во всём пространственно-временном масштабе и представить с требуемой степенью детализации необходимые особенности явления. При рассмотрении же эволюционных моделей промежуточного типа для магнитного поля, использующих свойства симметричной структуры, позволяющих построить аналитические решения с дальнейшим проведением компьютерного моделирования, требующим умеренных компьютерных ресурсов, удаётся выявить важные эффекты и связи в исследуемой проблеме теоретической физики, сложно обозримые при общей постановке задачи, знание которых является основополагающим ориентиром, способствующим развитию направлений исследования более общих моделей, поэтому можно заключить несомненную важность **разработки математических методов теории магнитного поля** с целью построения моделей промежуточного типа для магнитогидродинамических процессов, сочетающих возможность теоретического анализа и высокую точность физических выводов, позволяющую воспроизводить экспериментальные результаты и данные

астрономических наблюдений, что и осуществляется в диссертационной работе Евгения Александровича Михайлова.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования Евгения Александровича Михайлова обусловлена как ее научной, так и практической значимостью, так как проблемы астрофизики и технические проблемы металлургии цветных металлов и стали, термоядерного синтеза, проблемы управления потоками жидкого металла в реакторах атомных электростанций ставят новые задачи, часть из которых может быть решена методами теоретической физики, позволяющими определить характеристики динамики магнитного поля, что является одной из основных комплексных задач в современных астрофизических исследованиях.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 252 наименований. Объем работы — 302 страницы, включая 47 рисунков и список литературы.

Научная новизна работы обусловлена развитием теории построения математических моделей магнитной гидродинамики при исследовании физических процессов эволюции магнитных полей в электропроводящих жидких средах, а также разработкой новых математических методов теоретической физики, представляющих удачную квинтэссенцию подходов нахождения аналитических, асимптотических и численных решений как линейных, так и нелинейных краевых задач магнитной гидродинамики.

В диссертационной работе получены новые важные результаты, представляющие ценность и вносящие вклад в теоретическую физику. Построены математические модели промежуточного типа процесса эволюции магнитного поля в электропроводящей среде галактических дисков, в астрофизических объектах с усложненной топологической структурой тора для

описания динамо во внешних кольцах галактик, а также модели с нелинейной конфигурацией динамо в тонком диске с реалистичной структурой магнитного поля, соответствующей его инверсиям. Разработаны математические методы магнитогидродинамической теории электровихревых течений как в плоской, так и в сферической геометрии с учётом влияния центрального электрода конечных размеров, а также метод, основанный на батарейном механизме Бирмана, представляющий возможность описания генерации магнитного поля в галактике с учётом его пространственной трёхмерной структуры.

Получены важные факты и выявлено влияние магнитогидродинамических параметров на динамику физических процессов: так для галактических дисков впервые аналитически продемонстрирована неустойчивость неосесимметричных конфигураций магнитного поля; показано, что активное звёздообразование в следствие диффузии приводит к разрушению регулярных структур магнитного поля, представлена числовая оценка характерного значения поверхностной плотности звёздообразования, при которой поле прекращает рост; описана структура магнитного поля, величина которого ниже уровня равномерного распределения, благодаря соответствующему учёту граничных условий; установлен факт существования принципиального различия в структуре механизма динамо в аккреционных дисках и в дисках галактик, вызванного радиальными потоками среды при аккреции; показано, что свойство несжимаемости среды не исключает факта сжатия линий магнитного поля и его стремительного роста на границах конвективных ячеек по экспоненциальному закону, благодаря наличию конвективных потоков.

Высокая степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обусловлена непосредственным соответствием выбора модели работам классиков теоретической физики и магнитной гидродинамики, выбором

модели уравнений, основанной на известных физических законах, корректностью постановок решаемых задач, строгостью применения математического аппарата, согласованием теоретических результатов с численными расчётами, с известными экспериментальными данными и астрофизическими наблюдениями, а также общими сведениями о характеристиках исследуемых астрофизических процессов, непосредственным соответствием положений и выводов в некоторых предельных случаях результатам классиков астрофизики и магнитной гидродинамики.

Значимость выводов диссертационного исследования для науки и практики заключается в развитии теоретических знаний об эволюции магнитных полей в аккреционных и галактических дисках, позволяющих получить представление о его пространственной конфигурации и возможности генерации при решении важных прикладных астрофизических проблем, и поскольку возможность роста магнитного поля, поддерживаемого движением расплавленного металла, подтверждена экспериментально в исследованиях, проводимых в Институте механики сплошных сред РАН в Перми, в Карлсруэ, в Кадараше (Комиссариат атомной энергии Франции), вопрос о генерации магнитного поля имеет не только теоретико-астрофизическую значимость, но и практическую важность в приложениях к течениям жидкометаллических расплавов в охлаждающих системах ядерных реакторов атомных электростанций и в решении технологических проблем металлургии цветных металлов и стали, связанных с процессами электросварки и электрошлаковым переплавом металлов.

Исследования в диссертационной работе описаны достаточно подробно лаконичным научным языком.

Следует отметить высокую и качественную апробацию результатов диссертационного исследования, которые в полной мере представлены на ав-

торитетных научных международных и Всероссийских конференциях, на научных семинарах и опубликованы в одной монографии и в 28 публикациях в изданиях, рецензируемых Web of Science или Scopus. Автореферат и опубликованные статьи полно и адекватно отражают содержание диссертационной работы.

По содержанию диссертационной работы в качестве **замечаний** следует указать следующее:

1. В формулах на странице 80, представляющих зависимость индукции магнитного поля от времени, участвует коэффициент, предполагаемый постоянной величиной, который, как показано ниже, определяется угловой скоростью вращения галактики вокруг своей оси, изменяющейся ввиду нетвёрдотельности её вращения с расстоянием до центра, то есть, с одной стороны этот параметр – константа, с другой стороны – функция, зависящая от расстояния до центра галактики. Возникает некоторая некорректность, и лишь на страницах 123 и 124 приводятся результаты, в которых указанный параметр является константой, и обсуждается впервые возможность и уместность представленного приближения.

2. Требуется пояснения: почему коэффициенты в представлении поля магнитной индукции на странице 107 удовлетворяют указанным дифференциальным уравнениям; почему зависимость не радиальной составляющей поля магнитной индукции на странице 135 определяется простейшими гармониками, а не более сложными функциональными зависимостями?

3. На странице 154 на основании определённой зависимости магнитного поля от азимутальной координаты в виде простой гармоники сделан вывод о невозможности существования в течение долгого временного периода неосесимметричной структуры магнитного поля. Возникает вопрос, может ли

более сложная функциональная зависимость структуры магнитного поля от азимутальной координаты привести к опровергающему заключению?

4. Существование альфа-эффекта является экспериментально подтверждённым фактом, но в то же время эксперимент и расчёт, проведённые в институте физики Академии Наук Латвии, показали, что в отличие от имеющихся представлений альфа-эффект имеет ярко выраженную зависимость от магнитного числа Рейнольдса, причём при стремлении его к бесконечности ЭДС альфа-эффекта стремится к нулю. Это положение привело к важному выводу, что существенное влияние магнитного числа Рейнольдса на величину альфа-эффекта не позволяет надеяться на его использование для генерации больших токов и сильных магнитных полей. Однако полученные результаты позволили сделать предположение о масштабах «ячейки альфа-эффекта» и ограничить её величину сверху. Возникает вопрос, какие реальные значения магнитного числа Рейнольдса рассматриваются в работе?

5. В работе не обсуждается возможность существования в астрофизических объектах процессов генерации без обратной связи с независимым возбуждением – процессов «полудинамо» (идеи развиты, например, в работе Э.М. Дробышевского Расходное (аккреционное) полудинамо. Два простых примера //Астрономический журнал. – 1982. – Т. 59. – Вып. 3. – С. 600 – 602.), когда слабое исходное поле, создаваемое сторонней ЭДС или вспомогательным динамо-процессом, многократно усиливается и трансформируется магнитогидродинамическими процессами, но без обратной связи – выключение источника исходного поля ведёт к затуханию всех полей, поэтому возникает вопрос, насколько правомерно мнение о возникновении и поддержании магнитного поля галактических и аккреционных дисков только осуществлением механизма динамо?

6. На странице 156 не указаны граничные условия, которым должно удовлетворять решение системы дифференциальных уравнений с частными производными, описывающее эволюцию крупномасштабной компоненты магнитного поля.

7. Оценка, приведённая на странице 161, о предположении малости коэффициента, отвечающего за альфа-эффект, по сравнению с величиной коэффициента, характеризующего дифференциальное вращение, используется для упрощения аналитических выкладок или же согласуется с эмпирическими данными?

8. Требуется пояснения правомерность подстановки функции, «найденной ранее» (как утверждается в работе), вместо искомой функции в дифференциальном уравнении, представленном на странице 169, которое интегрируется в квадратурах и имеет решение, отличное от того, что используется.

9. Требуется более подробного пояснения вывод на странице 276: «В случае использования эйлеровых уравнений рост магнитного поля оказывается бесконечным, для «вязкого» случая величина магнитного поля ограничена величиной, пропорциональной обратному значению коэффициента вязкости».

10. Имеется небольшое количество опечаток, например, на страницах 4, 5, 6, 15, 16, 17, 158, на странице 201 – неточность: «...азимутальная составляющая векторного потенциала, ротор которой представляет собой полоидальную составляющую магнитного поля», опечатки на страницах автореферата – 4, 5, 6, 18, на странице 27 – непонятный термин «размывание функции».

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют и не снижают положительную оценку научной и практической значимости результатов акту-

ального диссертационного исследования Евгения Александровича Михайлова, представляющего собой научный труд, содержащий решение поставленной научной проблемы в области разработки математических методов теории магнитного поля и имеющий существенное значение для развития теоретических и прикладных аспектов теоретической физики, связанных с построением и динамическим анализом эволюционных моделей промежуточного типа для магнитного поля в электропроводящей сплошной среде, являющийся законченной научно-квалификационной работой с новыми научными достижениями, выполненной на высоком научном уровне, свидетельствующем о высокой математической и физической культуре и несомненном вкладе диссертанта в теоретическую физику и астрофизику. Задача определения индуцированного магнитного поля решается в диссертации в рамках классической кинематической теории, в которой движения считаются заданными, и находятся порождаемые электромагнитные поля, и, не смотря на высказывания Б.А. Тверского (“Основы теоретической космофизики”) о том, что “кинематическая постановка задачи о генерации полей реальных объектов некорректна и не даёт однозначного решения”, Евгений Александрович, обладая высоким профессионализмом физика-теоретика, умело смог устранить эту проблему и получить важные результаты в представленном диссертационном исследовании, согласованные с известными экспериментальными данными и астрофизическими наблюдениями. Разработанные математические методы, построенные эволюционные модели и их качественный анализ, представленные Евгением Александровичем, могут быть использованы в различных областях теоретической физики, прикладной математики, механики жидкости, газа и плазмы, геофизики, астрофизики и энергетики.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3 — «теоретическая физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых

степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Михайлов Евгений Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 — «теоретическая физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
доцент Научно-образовательного центра математики
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»
Холодова Светлана Евгеньевна

Контактные данные:

тел.: +7 (965) 021 00 41, e-mail: kholodovase@yandex.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.02.05– Механика жидкости, газа и плазмы

Адрес места работы:

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект д. 49 лит F,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»,
Научно-образовательный центр математики
Тел.: +7 (812) 312-6131; e-mail: sekholodova@itmo.ru

Подпись сотрудника удостоверяю: