

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Франк Анны Глебовны о диссертации

Натальи Александровны Давыдовой (Чмыховой)

«Математические модели формирования равновесных конфигураций плазмы
в магнитных ловушках – Галатеех»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук
по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ.

Диссертация относится к области математического моделирования и численного исследования плазменных процессов в установках, ориентированных на реализацию управляемого термоядерного синтеза (УТС). *Актуальность* этой тематики обусловлена как необходимостью поиска новых источников энергии, так и возрастающей ролью численных моделей и расчетов благодаря интенсивному развитию компьютерной техники. В настоящее время наибольшая часть исследований в области УТС посвящена проблеме удержания плотной горячей плазмы в традиционных магнитных ловушках, таких как токамаки и стеллараторы. Вместе с тем, большое значение имеет поиск альтернативных вариантов термоизоляции плазмы, и к классу альтернативных систем относятся ловушки-Галатее, которые изучались в представляемой к защите диссертации.

Общая концепция ловушек-Галатее была сформулирована в работах А.И. Морозова, в которых магнитное поле предполагалось использовать в качестве внешнего «забора» для удержания плазмы, а не в качестве ее «среды обитания», как в традиционных ловушках. В результате появляется возможность формирования магнито-плазменной конфигурации, для которой интегральный параметр «бэ́та», т.е. отношение газокINETического давления плазмы к давлению внешнего магнитного поля, становится порядка единицы, что недостижимо в обычных системах. Однако такая ситуация возможна только при введении в плазменный объем токонесущих проводников, создающих магнитное поле, с которыми плазма не должна контактировать.

Одним из простейших примеров ловушек-Галатее является тороидальная ловушка «Пояс» с двумя кольцевыми проводниками, которая была предложена в нашей с А.И. Морозовым статье 1994 года. В такой ловушке плазма с «бэ́та» порядка единицы может быть сосредоточена в основном в пределах токового слоя, а также в двух плазменных мантиях, окружающих проводники. Изучение токовых слоев в замагниченной плазме базируется на идеях и работах С.И. Сыроватского, а экспериментальные исследования традиционно проводятся в ИОФ РАН'е. Распрямленная в

цилиндр разновидность «Пояса», наиболее удобная для концептуальных теоретических и ряда экспериментальных исследований, также была предложена в работе 1994 г.

Модели равновесных конфигураций плазмы, магнитного поля и электрического тока в цилиндрическом аналоге «Пояса» с упомянутыми свойствами подробно исследованы в работах К.В. Брушлинского, А.С. Гольдича и др. (2010–2014 гг.) в терминах двумерных краевых задач с известным уравнением Грэда-Шафранова. Однако эти модели излишне идеализированы и в чем-то остаются недоопределенными: они не учитывают диффузию магнитного поля, обязанную конечной проводимости плазмы, и не имеют возможности исследовать процесс формирования конфигураций. Модели динамики плазмы рассмотрены в 1990-х годах в работах на близкую тему К.В. Брушлинского и К.П. Горшенина, где не удалось реализовать изоляцию плазмы от проводников, а также в работе Г.И. Дудниковой, А.И. Морозова и М.П. Федорука, где механизм изоляции обеспечен постоянным возрастанием тока в проводниках, т.е. в принципиально нестационарном процессе. Экспериментальные исследования процессов в плазменном цилиндре «Пояс» с токонесущими проводниками внутри плазменного объема проводились в отделе физики плазмы ИОФ РАН и опубликованы в работах А.И. Морозова и др. в 1995-2000 гг. Плазменные конфигурации в ловушке «Пояс», а также в более сложных тороидальных ловушках экспериментально изучаются в МИРЭА.

Перечисленные работы и примыкающие к ним исследования конфигураций в ловушках-Галатях составляют тот научно-информационный фон, на котором следует рассматривать и оценивать обсуждаемую диссертацию.

Цель диссертационной работы Н.А. Давыдовой (Чмыховой) состояла в разработке математической модели и исследовании процесса формирования магнитоплазменной конфигурации в цилиндрическом аналоге ловушки «Пояс», которая в идеале не должна соприкасаться с проводниками.

В диссертации представлена двумерная нестационарная МГД-модель течения плазмы конечной проводимости в цилиндре с двумя погруженными в него параллельными оси проводниками с электрическим током. Создаваемое проводниками магнитное поле взаимодействует с током плазмы того же направления, вынуждая плазму концентрироваться в центральной части цилиндра. Изоляция проводников от плазмы достигается временным возрастанием тока в проводниках, при котором в окружающей плазме индуцируется ток противоположного направления. В результате на начальной стадии процесса образуется плазменная конфигурация,

расположенная вдоль сепаратрисы магнитного поля. Затем ток в проводниках становится постоянным, и конфигурация существует в квазистационарном режиме, медленно расплываясь под влиянием диффузии магнитного поля.

В третьей главе изложенная концепция процесса формирования обоснована и подробно исследована в одномерной МГД-модели окрестности одного прямого проводника с током. В расчетах продемонстрировано, что, если ток в проводнике постоянный, в плазме со временем образуются равновесные конфигурации различной формы при разных значениях параметров, но всегда с положительным током и тесно прижатые к проводнику. Если же ток в проводнике сначала возрастает от нуля до заданного постоянного значения, в его окрестности индуцируется ток противоположного направления (отрицательный ток) и, как следствие, изолированная от проводника кольцевая конфигурация, которая затем медленно разрушается при слабой диффузии магнитного поля. При этом в работе подчеркивается, что в строго равновесных конфигурациях рассматриваемого типа ток в плазме всегда одного направления, и поэтому неограниченная по времени изоляция проводника с помощью возбуждения отрицательного тока является лишь идеализированным нулевым приближением.

В четвертой главе те же процессы исследованы в расчетах двумерной МГД-модели в цилиндрах круглого и квадратного сечений. Рассмотрены два варианта задания плазменного тока в терминах граничных условий задачи: на внешней границе задается либо осевое электрическое поле, т.е. плотность тока, либо тангенциальное магнитное поле, соответствующее полному осевому току в системе. В серии расчетов получены различные варианты конфигураций магнитного поля, тока и плазмы, представленные распределениями магнитных силовых линий, плотности тока, плотности и давления плазмы в разные моменты времени и при различных значениях безразмерных параметров. По результатам расчетов сформулированы основные зависимости свойств конфигураций от параметров: количественные характеристики давления и тока, оценки времени существования квазиравновесной стадии. Общий характер этих закономерностей получен на примере конкретной простейшей ловушки, но справедлив для более широкого класса ловушек-Галатей.

Основными результатами диссертации следует считать:

1. Создание одномерной и двумерной математических моделей формирования плазменных конфигураций в цилиндрических аналогах

магнитных ловушек-Галатей, включая выбор и реализацию численных методов и комплекс программ для расчетов.

2. Численное исследование процесса формирования квазиравновесных конфигураций в плазменном цилиндре – аналоге ловушке «Пояс», анализ их свойств и зависимости от основных параметров задачи.

Результаты опубликованы в 3 журнальных статьях и аннотациях 13 докладов, сделанных автором на научных конференциях. Они являются *новыми*: упомянутые выше работы других авторов лишь обозначили подходы к проблеме, а полный анализ процесса формирования конфигураций в литературе отсутствует.

В пользу *достоверности результатов* расчетов говорит их повторяемость при уточнении расчетной сетки, совпадение с точными решениями одномерных задач о равновесии, качественное соответствие результатам немногих имеющихся экспериментов, а также публикации в рецензируемых научных журналах и выступления на авторитетных международных и всероссийских конференциях.

Результаты диссертации представляют интерес в теории плазменных процессов в магнитных ловушках и демонстрируют возможности их исследования методами математического моделирования. В этом их *теоретическая и методическая значимость*.

Практическая значимость результатов состоит в том, что они могут быть полезны как при проектировании и создании новых магнитных ловушек, так и при анализе и интерпретации экспериментальных результатов.

Текст диссертации хорошо изложен и иллюстрирован. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

В качестве *замечаний* можно отметить следующее.

1. Уже при постановке задачи необходимо было четко указать, что токи в проводниках и в плазме включаются одновременно, поскольку это обстоятельство не очевидно. Одновременное включение токов в значительной степени определяет характер динамических процессов в рассматриваемой задаче. Можно, в частности, отметить, что в экспериментах с прямой системой типа «Пояс» токи в проводниках и в плазме возбуждались независимо и были разнесены во времени.
2. Следующее замечание носит характер пожелания. В начале текста (стр. 7) говорится о родстве ловушки «Пояс» с нейтральным токовым слоем в плазме. В конце (стр. 112) обозначены некоторые как общие свойства, так и различия МГД-моделей этих двух установок. Более подробного и глубокого сравнительного анализа их моделей пока нет, а он был бы полезен. В

частности, представляет интерес особая точка магнитного поля на оси x (рис. 4.8), возникающая, по-видимому, при переходе к разрушению конфигурации «Пояса» и указывающая на тенденцию к разрушению токового слоя.

Диссертация в целом представляет исследование процесса формирования квазиравновесных плазменных конфигураций в прямом аналоге магнитной ловушки «Пояс» методами математического моделирования с помощью большой серии расчетов современными вычислительными средствами. Ее результаты вносят вклад в теорию математических моделей физики магнитного удержания горячей плазмы.

На основании изложенного считаю, что обсуждаемая *диссертация полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.13.18*, а ее автор – Наталья Александровна Давыдова (Чмыхова) заслуживает присуждения ученой степени кандидата физ.-мат. наук.

Официальный оппонент Франк Анна Глебовна,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института общей физики
им. А.М. Прохорова Российской Академии наук,
Москва 119991 ул. Вавилова 38.

+7 (499) 503 8240; annfrank@fpl.gpi.ru

 А.Г. Франк

28 декабря 2015 г.

Подпись А.Г. Франк удостоверяю:

Ученый секретарь
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института общей физики
им. А.М. Прохорова Российской Академии наук,
доктор физико-математических наук,
Москва 119991 ул. Вавилова 38
+7 (499) 503 8327; nauka@gpi.ru



 С.Н. Андреев