

ОТЗЫВ

**официального оппонента
на диссертацию Чмыховой (Давыдовой) Натальи Александровны**

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РАВНОВЕСНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ - ГАЛАТЕЯХ,

**представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ.**

Диссертация Натальи Александровны Чмыховой (Давыдовой) посвящена актуальной проблеме исследования удержания горячей плазмы в магнитных ловушках с целью изучения возможности осуществления термоядерных реакций. Для изучения процессов, происходящих в плазме, используется метод численного МГД моделирования, позволяющий исследовать возможность удержания плазмы без привлечения ресурсов, необходимых для создания сложной экспериментальной установки. Численное исследование проводилось для ловушек, получивших название “галатей”, в которых плазма удерживается на поверхности, разделяющей различные конфигурации магнитных полей. В плазме возбуждается ток, который сжимается к центру вместе с плазмой собственным магнитным полем, что должно было бы привести к появлению пинча, если бы других токов и создаваемых ими магнитных полей не было. Для создания ловушки типа “галатей” в установке помимо поля тока, идущего по плазме и сжимающего плазму к центру, имеется, также, поле, выдавливающее плазму из центра. Это поле создается токами, текущими в проводниках, которые погружены в плазму. Под действием этих систем магнитных полей плазма концентрируется и удерживается на разделяющей их поверхности.

Проводники в тороидальной установке имеют форму колец, радиус которых значительно превышает размер области в перпендикулярном проводнику направлении, где происходят основные плазменные явления. Радиус проводника можно считать бесконечным, т. е. проводник прямым. Для исследования самых основных процессов, приводящих к концентрации плазмы между магнитными поверхностями, можно пренебречь зависимостью от координаты z вдоль проводников. Задача сводится к двумерной в плоскости (x, y) , перпендикулярной проводникам.

Основная часть работы посвящена моделированию ситуации для двух параллельных проводников, погруженных в плазму. Они создают конфигурацию магнитного поля с особой линией (в плоскости, перпендикулярной проводникам – особой точкой) типа Х. Концентрация плазмы происходит на Х-линии и на поверхности сепаратрис этой Х-линии. На начальном этапе для проверки работы численного метода решения МГД уравнений в упрощенных условиях моделирование проводилось также для одного проводника. В этом случае плазма концентрируется на

поверхности цилиндрической формы (в плоскости на окружности). Зависимостью от азимутального угла ϕ можно пренебречь, из-за чего задача сводится к одномерной.

Численное МГД моделирование необходимо для определения режима нарастания токов в плазме и погруженных в плазму проводниках, при котором проводники, погруженные в плазму, были защищены магнитным полем от контакта с плазмой, чтобы они не сгорели, и между магнитными поверхностями сконцентрировалась горячая плазма. При помощи моделирования исследовались свойства и поведение во времени удерживаемой плазмы. Все эти задачи были успешно решены диссертантом.

При рассмотренном режиме возрастания токов вблизи погруженных в плазму проводников возникал ток, направленный противоположно току в проводнике, из-за чего под воздействием силы $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c$, направленной от проводника, концентрация плазмы вблизи проводника значительно снижалась.

Новизна работы состоит в том, что исследование поведения плазмы в ловушках такого типа методом МГД моделирования проводится впервые, что позволило понять, каким образом можно сконцентрировать плазму, изучить её временное поведение и ряд неизвестных ранее свойств. Ранее, до работ соискателя, теоретическое исследование плазмы в ловушках типа “галатеи” проводилось только в предположении равновесия плазмы, когда магнитная сила $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c$ уравнивалась силой давления ∇p . Исследования в приближении равновесной конфигурации в принципе не могли определить условия и режим нарастания токов, при которых плазма смогла бы сконцентрироваться на магнитной поверхности и выяснить устойчивость этого образования. Кроме того, в приближении равенства сил можно описать только идеальное равновесие. В рамках такого приближения невозможно исследовать эволюцию реально получающегося квазистационарного образования в результате медленного движения и диффузии магнитного поля. Эти проблемы были решены в рамках численного моделирования, проведенного Н. А. Чмыховой.

Исследованы детали появления плотных образований плазмы, удерживаемых магнитным полем, и их дальнейшая эволюция. Сначала плазма концентрируется вблизи проводников, на части сепаратрисы недалеко от X-точки и на части сепаратрисы вблизи границы расчетной области. Далее в процессе эволюции происходит перемещение этих плотных образований в область над X-точкой, сопровождающееся ростом концентрации в этой области. Образуются так же области повышенного давления как вследствие роста в них плотности плазмы, так и вследствие роста температуры из-за диссипации магнитного поля. Изучено появление и эволюция плазменных образований при различных режимах нарастания токов в различных условиях, в частности с учетом члена отвода тепла, который мог быть вызван излучением, и без учета отвода тепла вследствие излучения плазмы.

Начальной конфигурацией для возникновения исследуемой ловушки, так же как и для появления токового слоя, является магнитное поле с особой линией типа X, поэтому можно сравнить процессы для двух этих образований. Для ловушки магнитная сила, которой в данном случае является сила магнитного давления, со всех сторон направлена к особой линии. Сверху и снизу к особой линии направлена сила магнитного давления поля тока, текущего по плазме, а с боков - сила давления поля токов погруженных в плазму проводников. В токовом слое магнитные силы заставляют плазму втекать в окрестность X-линии с одной стороны (например, сверху и снизу) и вытекать с другой (например, с боков). Течение вытягивает магнитное поле в конфигурацию тонкого токового слоя, толщина которого определяется магнитной диффузией. Интересным неожиданным результатом расчёта, проведенного диссертантом, является раздвоение X линии в процессе эволюции после концентрации плазмы вблизи поверхности сепаратрис. Появляется конфигурация с O-точкой, расположенной между двумя X-точками. Такая конфигурация получалась другими авторами численным моделированием неустойчивости токового слоя типа Харриса, в

котором магнитные поля идеально антипараллельны и нет течения плазмы. Однако условия токового слоя типа Харриса искусственно задавались при проведении численного моделирования, но никому неизвестно, как такой слой может быть создан в природе. До сих пор никому не удавалось получить такую конфигурацию с О-точкой, расположенной между двумя Х-точками, из токового слоя, который получен численным моделированием в окрестности особой линии Х-типа под воздействием возмущений. Такой слой обладает течением и нормальной компонентой магнитного поля, он может образоваться в природных условиях. Отдельные выводы о появлении подобных конфигураций в эксперименте могли быть связаны с подходом к Х-точке всей плазмы, имеющейся в установке, и с неточным воспроизведением формы силовых линий по измерениям магнитного поля зондами в отдельных точках. Скорее всего, конфигурация с О-точкой, расположенной между двумя Х-точками, не появится в природе, поскольку там нет проводников, погруженных в плазму. Но сама возможность появления такой конфигурации является интересной, она получена диссертантом впервые в условиях, когда исходной конфигурацией является поле с Х-точкой, а не какое-либо искусственное образование.

Для численного решения МГД уравнений применялась разностная схема типа FCT. Метод разработан с целью совместить устойчивость разностной схемы при выполнении условия Куранта с достаточно высокой точностью аппроксимации. Переход на следующий шаг по времени осуществляется в три этапа. На первом этапе величины находятся с использованием симметричных разностей. Такая система обладает высоким (вторым) порядком точности, но она неустойчива. На следующем этапе для получения устойчивого решения добавляются искусственные диффузионные члены, которые, однако, понижают точность схемы. Поэтому на третьем этапе, чтобы повысить точность, добавляются антидиффузионные члены. Если бы антидиффузионные члены в точности компенсировали диффузионные члены, то мы пришли бы к симметричной схеме первого этапа, которая обладает высокой точностью, но неустойчива. Поэтому антидиффузионные члены добавляются с коэффициентами, вычисленными по специальному алгоритму. Вычисленные коэффициенты в зависимости от поведения величин могут быть разными в различных точках пространства, так чтобы искусственная диффузия как можно меньше ухудшала точность, но при этом, чтобы схема оставалась устойчивой. Ещё один этап, который выходит за рамки собственно схемы FCT, предназначенной для решения гиперболических уравнений, состоял в учете вязких членов для магнитного поля. Учет магнитной вязкости мог только повысить устойчивость схемы, поскольку она вводилась неявным образом, так что для расчёта магнитной вязкости понадобилось последовательное применение метода прогонки вдоль каждой из координат. Возможно, для повышения точности и устойчивости схемы, на втором этапе метода FCT следовало бы использовать члены магнитной вязкости, полностью или частично заменив ими диффузионные члены. Вводимые искусственные диффузионные члены не являются членами уравнения и, поэтому, они, создают дополнительную ошибку, которую потом приходится убирать антидиффузионными членами, что в некоторых местах пространства удаётся сделать только отчасти. В то же время, члены магнитной вязкости входят в исходные уравнения, и их не нужно будет убирать.

Расчеты показали, что поставленная задача решается за непродолжительное время при помощи используемой FCT схемы, и поэтому для решения конкретно этой задачи нет сколько-нибудь серьёзной необходимости применять какие-либо другие методы. Однако задача может быть усложнена рассмотрением процессов на поверхности сепаратрисы, которые могут зависеть от координаты z , а, кроме того, имеется необходимость выяснить применимость этого метода для решения других, более сложных задач, чтобы понять какой метод подходит лучше всего. Чтобы способствовать решению таких более сложных проблем, в дальнейшем можно было бы

попытаться применить другие методы для решения двумерной задачи концентрации плазмы в ловушке, чтобы выяснить, смогут ли они существенно ускорить решение. Такой подход желательно развивать в дальнейших исследованиях.

Часто для процессов, расчеты которых требуют много времени, не требуется большая точность, и имеется необходимость наиболее быстрого проведения таких расчетов. Правильно составленная схема первого порядка может существенно увеличить скорость, особенно если это неявная схема, и при этом, её точность будет не на много хуже точности схемы FCT. Последнее обстоятельство связано с тем, что высокая точность метода FCT может достигаться только в местах плавного изменения величин, где член искусственной диффузии будет практически скомпенсирован антидиффузионным членом, так что останется в основном симметричный конечно-разностный аналог, имеющий точность второго порядка. В местах же, где имеются сильные скачки величин, антидиффузионный член не должен компенсировать член искусственной диффузии, который стабилизирует решение, поэтому там схема будет фактически иметь первый порядок точности. В связи с этим, для стабилизации решения можно попытаться использовать противопоточную аппроксимацию диагональных членов и вязкие члены МГД уравнений, коэффициенты при которых, в случае необходимости можно завязать, что соответствует введению искусственной вязкости. При этом лучше чтобы эта схема была неявной, что позволит повысить скорость расчета за счет увеличения временного шага. Другой проблемой является выполнение условия соленидальности $\text{div}\mathbf{B}=0$. Как показали расчеты диссертанта, для решаемой задачи это условие выполняется, хотя в используемой схеме не предусмотрено его точного выполнения, т. к. схема не является консервативной относительно магнитного потока. Для более сложной задачи, решаемой по выбранной схеме, точность выполнения условия $\text{div}\mathbf{B}=0$ может оказаться низкой. В этих условиях нужно применять схему, консервативную относительно магнитного потока, в которой вместо вектора магнитного поля, определяемого в тех же точках сетки, где и остальные величины (плотность плазмы, скорость, температура), используются магнитные потоки через границы ячеек, усреднённые на единицу площади. Для решения поставленной задачи исследования поведения плазмы в ловушке можно попытаться применить схему, используемую для моделирования процессов в солнечной короне над активной областью. Эта схема является неявной, противопоточной и консервативной относительно магнитного потока. Эти замечания следует рассматривать в плане дальнейшего развития тематики.

Во вводной части диссертации в обзоре работ по темам, близким к теме проведенного исследования, делается не относящееся к теме диссертации неточное утверждение, что идея ускорения плазмы собственным азимутальным полем принадлежит А. И. Морозову. В действительности, впервые такой ускоритель плазмы был не только разработан, но и создан в лаборатории Л. А. Арцимовича (Л. А. Арцимович, С.Ю. Лукьянов, И. М., Подгорный, С. А. Чуватин. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы. ЖЭТФ **33**, 3-8, 1958), а вариант ускорителя с собственным азимутальным магнитным полем был применён на практике для инъекции плазмы в ловушку (Подгорный И. М., Сумароков В. Н. Захват плазмы в ловушку с магнитным полем, возрастающим к периферии. J. Nucl. Energy, Part C. – Plasma Phys. **1**, 236, 1960). Работа по ускорителю плазмы велась в лаборатории Л. А. Арцимовича и в лаборатории А.М. Будкера в обстановке строгой секретности с 1956 г до появления теоретической статьи Морозова. Разрешение на рассекречивание было получено только в 1967 г. Действующий ускоритель плазмы демонстрировался И. М. Подгорным на 2-й Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии в 1958. Однако, проведенное в диссертации исследование никак не связано с ускорителями плазмы и эта неточность не имеет отношения к материалу, излагаемому в диссертации.

Диссертация представляет собой завершенное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Значительно продвинуты представления о поведении плазмы в магнитных ловушках типа "галатеи". Сделанные замечания не выявили сколько-нибудь существенных недостатков, они скорее отражают пожелания оппонента относительно используемых численных методов при дальнейшем исследовании данного круга задач и решения других проблем моделирования поведения плазмы в магнитном поле. Результаты диссертации могут быть применены в ФИАНе, ИНАСАНе и других научных центрах, в которых ведется изучение лабораторной и космической плазмы.

Хорошо было бы знать мнение диссертанта о перспективах ловушки типа "галатея", и насколько она конкурентоспособна по сравнению с другими методами достижения термоядерной реакции.

Диссертация основана на работах, опубликованных в ведущих периодических изданиях и трудах конференций. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертация, безусловно, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.13.18, а ее автор, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

А. Подгорный

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Александр Игоревич Подгорный

Телефон: +7(495) 408-62-19

Адрес электронной почты: podgorny@sci.lebedev.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

Адрес: 119991, Москва, Ленинский проспект, д.53

18 декабря 2015 года.

Подпись А. И. Подгорного заверяю.

Заместитель директора ФИАН

Доктор физико-математических наук

Сергей Юрьевич Савинов

