

## ОТЗЫВ

официального оппонента на кандидатскую диссертацию **Аникеева Фёдора Александровича «Математическое моделирование кинетики тороидальной плазмы полулагранжевыми и лагранжевыми методами»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы»

Диссертационная работа Аникеева Фёдора Александровича посвящена теоретическому исследованию кинетических явлений в тороидальной плазме с использованием численного моделирования, разработке и применению соответствующих математических методов.

Теоретическое описание различных физических процессов является важным источником информации, позволяющим существенно продвигаться в решении сложных актуальных задач. Особую значимость такие исследования имеют для строящегося термоядерного реактора ITER, так как его основные режимы работы недостижимы на существующих установках.

В диссертации в значительно более общих, чем в известных подходах, условиях исследовано поведение частиц тепловых и высоких энергий. При этом принципиальным является самосогласованное моделирование кинетики электронов и ионов плазмы. Полнота кинетического рассмотрения позволила значительным образом повысить точность вычисления безындукционного тока плазмы, обусловленного, в том числе, тороидальностью магнитной конфигурации токамака. В более общей постановке, чем ранее, рассчитано радиальное электрическое поле, которое может оказывать принципиальное влияние на радиальный перенос энергии – один из ключевых процессов в проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС). С радиальным электрическим полем также связано формирование транспортного барьера при переходе в режим улучшенного удержания плазмы.

Наиболее точную и полную информацию о перечисленных процессах позволяет получить самосогласованное математическое моделирование поведения тороидальной плазмы с использованием новейшей параллельной вычислительной техники. Диссертация посвящена разработке соответствующих новых вычислительных методов физики плазмы и их применению к изучению указанных выше процессов. Это и обуславливает **актуальность темы исследований**.

### **Анализ содержания диссертации и научной новизны представленных в ней результатов**

*Во введении* обоснована актуальность представленной работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

*В первой главе* представлены методы описания плазмы и постановки математических задач. Исходной является общая самосогласованная модель эволюции равновесия тороидальной плазмы. В диссертации сделан акцент на кинетические задачи с заданной конфигурацией магнитного поля токамака. Предложена новая формулировка задачи о самосогласованном расчете шестимерных функций распределения, опирающаяся на полулагранжев подход. Задача сводится к совместному решению системы нелинейных кинетических уравнений и уравнений движения частиц. В работе впервые применен трехмерный кулоновский оператор с единственным упрощением – усреднением коэффициентов по гируглу. Рассматриваются точные (не дрейфовые) шестимерные траектории движения заряженных частиц в электромагнитном поле токамака без каких-либо упрощений. В работе не используется усреднение кинетического уравнения по быстрым переменным. Благодаря этому, описывается весь диапазон энергий частиц и не требуется задание сложных условий сшивки на границе между пролетными и запертыми частицами, где метод усреднения не применим. Предло-

жены новые более общие постановки задач о расчете бутстреп-тока с учетом вклада в него всех сортов частиц, а не только электронов, об определении радиального электрического поля, радиальных потоков частиц и энергии. В последнем разделе первой главы рассмотрена задача о самосогласованном управлении полным током плазмы в системе имитационного моделирования токамака HASP CS, создаваемой в НИИСИ РАН, с использованием бутстреп-тока, рассчитанного в более общих условиях предложенными в диссертации методами.

*Вторая глава* посвящена описанию разработанных численных методов решения задач кинетики тороидальной плазмы. Для вычисления реальных (не дрейфовых) траекторий движения частиц в электромагнитном поле применена схема с перешагиванием. Разработаны новые эффективные алгоритмы расчета траекторий для обычной параллельной вычислительной техники и гибридной, включающей графические процессоры. Для решения кинетического уравнения предложены три метода. Впервые для решения шестимерных кинетических задач применен полулагранжев численный метод. В диссертации продемонстрирована высокая точность этого метода, необходимая, в частности, для решения задач о бутстреп-токе и радиальном электрическом поле плазмы. Бессеточный метод сглаженных частиц (SPH) впервые обобщен для криволинейной системы координат и впервые применен к решению многомерных кинетических уравнений. Для метода Монте-Карло предложен новый эффективный параллельный алгоритм. Отмечается, что на существующей вычислительной технике для рассматриваемого класса задач полулагранжев численный метод оказывается предпочтительным по сравнению с другими методами. Для расчета радиального электрического поля предложен новый метод, опирающийся на минимизацию функционала с помощью подходов теории автоматического управления. Также предложены новые алгоритмы расчета обобщенных неоклассических потоков и новый алгоритм управления полным током плазмы.

*В третьей главе* подробно описан разработанный автором плазмофизический комплекс DiFF (Distribution Function Finder). Комплекс включает в себя реализации полулагранжева метода, метода сглаженных частиц и метода Монте-Карло. Комплекс позволяет рассчитывать вклад в бутстреп-ток всех сортов частиц плазмы, радиальное электрическое поле и обобщенные неоклассические потоки частиц и энергии. В работе детально изучены параллельные свойства комплекса DiFF. Создан графический интерфейс пользователя, построенный по технологии среды имитационного моделирования HASP CS. По своим возможностям и характеристикам DiFF опережает на рассматриваемых задачах как российские, так и мировые аналоги.

*Четвертая глава* посвящена полученным с помощью созданного программного обеспечения физическим результатам. Проведен их тщательный анализ и сравнение с экспериментом и данными известных моделей. В предельных случаях продемонстрировано хорошее соответствие неоклассической теории. Бутстреп-ток рассчитан в условиях установок ASDEX Upgrade, JET, MAST и ITER. При этом разработанный код DiFF-SLPK позволяет рассматривать более общие модели плазмы, чем традиционные, в частности, не предполагает малость отклонений траекторий частиц от магнитных поверхностей и близость функции распределения к максвелловской. Так, в условиях реальных установок аккуратный учет отклонений ионов от магнитных поверхностей приводит к значительному смещению максимальных значений плотности бутстреп-тока к границе плазмы. Установлен новый физический эффект – для ASDEX Upgrade в режиме улучшенного удержания с граничным транспортным (ETB) барьером показано, что вклад ионов в бутстреп-ток на границе плазмы в несколько раз превышает вклад электронов. Изучено влияние на бутстреп-ток зависимости функций распределения от гироугла, показана важность ее учета в центре и на границе плазмы. Для перечисленных выше установок рассчитаны радиальное электрическое поле  $E_r$  и обобщенные неоклассические радиальные потоки энергий. Показано

заметное до 30% увеличение  $E_r$  около границы плазмы в ITER по сравнению с применявшейся ранее приближенной оценкой, что при возмущении плазмы может приводить к нежелательному значительному перемещению частиц по радиусу. Определено, что в ITER, по сравнению с данными упрощенных подходов, область наибольших значений плотности бутстреп-ток смещена к границе плазмы на ~25% и неоклассический радиальный поток энергии больше на ~20%. Сделан вывод о принципиальности учета отклонений траекторий ионов от магнитных поверхностей в транспортных моделях плазмы ITER.

**В заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

**Автореферат** правильно и полно отражает содержание диссертации.

#### **Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертационной работе**

Корректность методов, предложенных и использованных в диссертации, обоснована математически, путем оценки погрешности аппроксимации. Разработанное программное обеспечение, реализующее методы диссертации, проверено стандартными способами, включающими тестирование и сравнение последовательной и параллельной версии кода. В предельных случаях результаты расчетов сопоставлены с аналитическими формулами. Проведено сравнение с расчетами по известным, зарекомендовавшим себя, кодам. Полученные в предельных случаях физические результаты хорошо согласуются с данными неоклассической теории. Отличия от неоклассической теории, возникающие в более общих постановках задач, обоснованы с физической точки зрения и обусловлены полнотой учета физических эффектов в разработанных методах.

## **Практическая значимость результатов, представленных в диссертационной работе**

В работе предложено несколько высокоточных методов исследования тороидальной плазмы, из которых особую роль играет полулагранжев метод. Все методы диссертации реализованы автором в эффективном параллельном плазмофизическом комплексе DiFF. Этот комплекс позволил на рассматриваемом классе задач заметно приблизить результаты компьютерного моделирования к эксперименту и сделать существенный шаг вперед по сравнению с известными аналитическими результатами и программными кодами. При этом возможности полулагранжева метода не ограничены результатами данной работы и позволяют описывать другие важные физические эффекты, в том числе гофрировку магнитного поля и ВЧ-нагрев плазмы. Таким образом, автором создан новый эффективный инструмент для изучения широкого класса закономерностей и характеристик явлений и процессов в тороидальной плазме, позволяющий точнее анализировать эксперимент на действующих установках и уточнять прогнозы для строящегося реактора ITER и других реакторов.

Диссертация не ограничивается созданием вышеупомянутого программного комплекса. В главе четвертой он применен для расчета бутстреп-тока, радиального электрического поля и обобщенного неоклассического радиального потока энергии в условиях реальных установок. Уточнены ранее известные оценки характеристик перечисленных явлений. Полученный уточненный прогноз для реактора ITER указывает направление совершенствования режимов удержания плазмы.

## **Апробация диссертационной работы**

Основные результаты работы представлены на 10 международных конференциях и опубликованы в 18 научных статьях, среди которых 8 входят в Перечень ВАК (4 из которых входят в Web of Science). Опубликованные статьи достаточно полно отражают представленные в диссертации результаты.

## Замечания по диссертационной работе

По результатам работы имеются следующие замечания:

1. При обсуждении в п. 1.2 предложенного в диссертации полулагранжевого подхода вводится предположение о соотношении между характерным временем движения по траектории и характерным временем кулоновских столкновений. Следовало бы отметить, что данный подход будет применим и в более общем случае, если в электрическом поле, входящем в уравнение движения (1.15), учесть все эффекты кулоновского взаимодействия частиц.
2. В тексте диссертации встречаются формулировки «бутстреп-ток электронов» и «бутстреп-ток ионов». Эти формулировки являются жаргоном, т.к. бутстреп-ток – это единый эффект, обусловленный, в том числе, взаимодействием между электронами и ионами. Также, автор называет бутстрепом весь безындукционный ток плазмы, тем самым неоправданно расширяя устоявшееся в физике токамаков и стеллараторов понятие.
3. В тексте диссертации подробно разобраны методика вычислений и численные алгоритмы разработанных кодов. Тогда как обсуждению физически интересных и важных результатов уделено значительно меньше внимания. В частности утверждения о том, что заметная разница в бутстреп-токе рассчитанным диссертантом и полученном с использованием широко распространенного подхода (Сотер и др.), может быть объяснена учетом ларморовского вращения, радиального электрического поля и др. воспринимается как гипотеза, хотя используемые численные коды безусловно позволяют рассмотреть предельные случаи в поддержку (или опровержение) такого рода утверждений.

Указанные замечания не снижают общую высокую оценку научного уровня диссертационной работы.

## Заключение

Диссертационная работа Аникеева Фёдора Александровича «Математическое моделирование кинетики тороидальной плазмы полулагранжевыми и лагранжевыми методами» выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную квалификационную научную работу, удовлетворяющую требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а автор диссертации заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Коновалов Сергей Владимирович

Кандидат физико-математических наук,

Начальник отдела теории плазмы

Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий

Национального исследовательского центра "Курчатовский институт",

123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,

E-mail: [Konovalov\\_SV@nrcki.ru](mailto:Konovalov_SV@nrcki.ru) . Тел.: +7 499 1967012.

30.10.2019

Подпись С.В. Коновалова заверяю:

Главный ученый секретарь

НИЦ "Курчатовский институт"

д-р физ.-мат. наук



П.А. Форш