

Отзыв

официального оппонента

на диссертацию АНИКЕЕВА Фёдора Александровича

«Математическое моделирование кинетики тороидальной плазмы полулагранжевыми и лагранжевыми методами»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук,
по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

В диссертационной работе представлены новые методы и результаты моделирования кинетики тороидальной плазмы. При более общих предположениях исследованы бутстреп-ток, неклассические радиальное электрическое поле и радиальный поток энергии ионов. Проведено сравнение с результатами известных ранее методов и экспериментальными данными. Сделан обоснованный прогноз величины и роли рассматриваемых физических эффектов в условиях термоядерной плазмы.

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что наиболее детальную информацию о физических закономерностях и характеристиках явлений и процессов в плазме дает математическое моделирование ее поведения с применением вычислительной техники. Использование супер-ЭВМ и параллельных технологий открывает возможность изучения в условиях, близких к реальным, обобщенных неклассических эффектов: радиального электрического поля, бутстреп-тока и радиального потока энергии. Таким образом, разработка новых вычислительных методов физики плазмы и их применение к изучению процессов в плазме является актуальной задачей.

Достоверность результатов не вызывает сомнений, так как использование предложенных автором методов обосновано путем оценок погрешностей аппроксимаций, сравнением с аналитическими формулами и расчетами по другим кодам. Показано хорошее соответствие ранее известным физическим результатам, в частности, данным неклассической теории в области ее применимости. Основные результаты представленной работы опубликованы в восемнадцати публикациях, в том числе, в реферируемых научных журналах, восемь из которых входят в перечень ВАК, а также доложены на десяти международных конференциях.

Научная новизна диссертации заключается в создании эффективной методики изучения кинетики заряженных частиц в тороидальной плазме с использованием по-

полулагранжева подхода. Данная методика позволяет описывать процессы с более высокой степенью детализации, чем традиционные методы усреднения и методы Монте-Карло. В работе с помощью предложенного параллельного программного обеспечения получен уточненный прогноз величины бутстреп-тока, радиального электрического поля и обобщенных неклассических потерь энергии в условиях термоядерного реактора ITER. Этот метод применен также для анализа экспериментов в установках ASDEX Upgrade (AUG), JET и MAST. Установлен новый физический эффект – показано, что величина бутстреп-тока на границе плазмы в несколько раз превышает прогноз, сделанный с помощью упрощенных подходов.

Практическая значимость работы обуславливается тем, что созданный программный комплекс DiFF, реализующий эффективные высокоскоростные параллельные алгоритмы, позволяет более детально моделировать кинетику тороидальной плазмы в условиях, близких к экспериментальным. Предложенный подход применим для изучения с высокой степенью точности широкого класса закономерностей и характеристик явлений и процессов в плазме токамаков, может быть использован для интерпретации и прогнозирования экспериментов.

Во введении к диссертации автором обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, изложены и обоснованы научная новизна и практическая значимость работы, обсуждена сложность рассматриваемых задач.

Первая глава диссертации посвящена методам описания плазмы, которые использовались в диссертационной работе, а также постановкам математических задач. Сформулированы задачи о расчете бутстреп-тока, электрического поля и потоков частиц и энергии. В диссертации рассматриваются, в основном, кинетические задачи при заданной конфигурации магнитного поля токамака, но при этом подчеркивается, что созданное программное обеспечение позволяет решать кинетические уравнения совместно с кодами, рассчитывающими эволюцию равновесия плазмы. Предложенный в диссертации полулагранжев подход имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными подходами, основанными на усреднении кинетического уравнения, т.к. не использует условие малости характерного времени обращения траекторий частиц по полоидальному или гиро углу по сравнению с характерным временем кулоновских столкновений. Он позволяет рассматривать частицы не только вы-

соких энергий и не требует определения границы, на которой происходит изменение топологии траекторий частиц (пролетные-запертые), и постановки на ней сложных граничных условий.

Во второй главе изложены разработанные численные методы решения задач кинетики тороидальной плазмы. В первую очередь описывается метод расчета шестимерных реальных (не дрейфовых) траекторий частиц. Показано, что, несмотря на высокую вычислительную сложность задачи, автору удалось разработать эффективный алгоритм, использующий параллельные вычислительные мощности, включая графические карты. Далее представлены три метода моделирования кулоновских столкновений: полулагранжев метод, метод сглаженных частиц и Монте-Карло. Показано, что первые два метода заметно выигрывают по точности у метода Монте-Карло. При этом полулагранжев метод менее требователен к вычислительным ресурсам, чем метод сглаженных частиц, и потому на современной вычислительной технике оказывается более предпочтительным. Помимо вышеперечисленных методов в главе предложены эффективные методы расчета радиального электрического поля и потоков частиц и энергии, а также численный алгоритм управления полным током в плазме.

Третья глава посвящена описанию разработанного программного обеспечения. Автором создан программный комплекс DiFF (Distribution Function Finder), состоящий из кодов, реализующих методы, предложенные во второй главе. Коды написаны на трех современных языках программирования: Fortran 2008, C++11, OpenCL C. Помимо этого, комплекс включает возможность визуализации результатов расчетов, реализованную на языке Python. В главе три предложены приемы распараллеливания с помощью технологий MPI, OpenMP и OpenCL, обсуждено достигнутое в результате ускорение расчетов. Возможности разработанного программного комплекса превосходят на рассматриваемом классе задач как российские, так и мировые аналоги. Кроме того, проведена интеграция комплекса DiFF со средой имитационного моделирования токамака HASP CS (Hardware-Software Plasma Control System), разрабатываемой в НИИСИ РАН. Это позволяет максимально приблизить моделирование к реальной экспериментальной ситуации.

В четвертой главе диссертации представлены физические результаты, полученные с помощью разработанных численных методов и программного обеспечения,

проведен их анализ. Выполнено сравнение с экспериментальными данными и данными известных подходов. В случае близких постановок задач продемонстрировано хорошее соответствие с аналитикой и данными других известных ранее упрощенных подходов. Однако в рассмотренных в диссертации более общих, близких к реальным условиям, могут иметь место существенные различия. Сделан вывод о принципиальности учета отклонений траекторий ионов от магнитных поверхностей при расчете бутстреп-тока, радиального электрического поля и обобщенных неоклассических радиальных потоков. В условиях ASDEX Upgrade обнаружен новый физический эффект – существенный вклад ионов в бутстреп-ток на границе плазмы в режиме улучшенного удержания с ETB (Edge Transport Barrier). Показано заметное увеличение электромагнитного поля около границы плазмы в ITER по сравнению с известной ранее приближенной оценкой, что при возмущении плазмы может значительно увеличить нежелательное перемещение частиц в радиальном направлении.

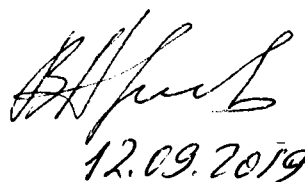
В целом можно отметить, что диссертация является завершенным трудом, показывающим высокую эрудицию и широкий спектр знаний и навыков соискателя в решении на высоком научном уровне сложнейших задач физики плазмы.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. Из диссертации следует, что наиболее значимой частью программного комплекса DiFF является код DiFF-SLPK, который реализует полулагранжев метод, распараллеленный, в том числе, по технологии MPI. При этом не описаны детали расчетов на массивно-параллельных суперкомпьютерах, таких как, например, «Ломоносов».
2. В диссертации говорится об интеграции программного комплекса DiFF в среду имитационного моделирования HASP CS и приведен пример поиска с использованием среды HASP CS параметров плазмы в установки MAST, максимизирующих бутстреп-ток. Из текста не ясно, почему выбрана именно эта установка.
3. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными измерениями приведено для установки ASDEX Upgrade. Было бы интересно провести такое сравнение для других установок.

Однако указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Актуальность темы диссертации, использование нескольких взаимно дополняющих друг друга методик решения поставленных задач, большой объем выполненной диссертантом работы, новизна и практическая ценность результатов позволяют сделать вывод о том, что диссертация и автореферат соответствуют 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 ее автор обладает высокой квалификацией и достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории интегральных расчетных кодов


12.09.2019

Андреев Валерий
Филиппович

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук,
115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, д. 52,
E-mail: avf@ibrae.ac.ru. Тел.: +7 495 9552396.

Подпись Андреева В.Ф. заверяю:

Ученый секретарь ИБРАЭ РАН
Кандидат технических наук



Калантаров Валентин
Евграфович