

Заключение

диссертационного совета Д 520.009.02 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по диссертации Аникеева Ф.А. **«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»

Диссертационный совет на основании выполненных соискателем исследований отмечает, что:

Разработаны новые подходы и методы для описания плазмы в тороидальных магнитных ловушках:

- эффективная методика изучения кинетики заряженных частиц с использованием полулагранжева подхода, обеспечивающая повышенную степень детализации по сравнению с существующими методиками; в частности, методика не использует традиционно применяемые предположения о близости функций распределения к максвелловским, малость отклонений ионов от магнитных поверхностей, двухкомпонентность плазмы, линейризацию кинетических уравнений;
- полулагранжев численный метод решения кинетических уравнений, позволяющий путём эффективного использования высокопроизводительной вычислительной техники добиться высокой точности расчёта функции распределения, достаточной для адекватного описания таких эффектов как бутстреп-ток, радиальное электрическое поле, обобщённые неоклассические потоки частиц и энергии;
- обобщение метода сглаженных частиц для решения задач кинетики плазмы и использования криволинейной системы координат: метод не требует искусственного разделения по физическим процессам, естественным образом описывает свободные границы и разрывы искомых функций;
- параллельная шестимерная версия метода Монте-Карло для описания динамики заряженных частиц в так называемом лагранжевом подходе;
- модификации методик расчёта неоклассического радиального электрического поля и их численные реализации;
- метод поиска оптимальных профилей плотности и температуры плазмы, максимизирующих бутстреп-ток.

Разработанные методы реализованы в плазмофизическом программном комплексе Distribution Function Finder (DiFF), включающем в себя коды DiFF-SLPK (полулагранжев метод), DiFF-SPK (метод сглаженных частиц), DiFF-MC (метод Монте-Карло). Комплекс предназначен для исследования закономерностей и характеристик физических явлений и процессов в плазме токамака, применим для интерпретации и прогнозирования экспериментов. Комплекс эффективно использует возможности современных гибридных супер-ЭВМ.

С помощью численных расчетов исследованы кинетические эффекты в условиях установок ASDEX Upgrade (Германия), JET (Великобритания), MAST (Великобритания) и ITER (Франция, в процессе строительства):

- бутстреп-ток с учётом как запертых, так и пролётных частиц; рассчитаны его электронная и ионная компоненты;
- неоклассическое радиальное электрическое поле, в том числе в присутствии граничного транспортного барьера (ETB) в условиях ASDEX Upgrade;
- обобщённый неоклассический радиальный поток энергии ионов.

Сравнение проведенного вычислительного эксперимента с известными результатами, а также с экспериментальными данными для установок ASDEX Upgrade и JET позволили заключить, что:

- в предельных случаях найденные значения бутстреп-тока, неоклассического радиального электрического поля и обобщённого неоклассического радиального потока энергии ионов соответствуют известным аналитическим и численным результатам, однако в условиях реальных установок последовательный учёт отклонений траекторий ионов от магнитных поверхностей приводит к заметному смещению максимума бутстреп-тока к границе плазмы по сравнению с предсказаниями аналитических и полуаналитических формул; данный эффект должен учитываться в реакторе при оптимизации характеристик разряда и анализе МГД устойчивости плазмы;
- аккуратный учёт траекторий ионов показал, что величина бутстреп-тока на границе плазмы может в несколько раз превышать прогноз, сделанный с помощью упрощённых подходов: такая ситуация имеет место в режиме улучшенного удержания с граничным транспортным барьером в ASDEX Upgrade;
- при малом радиальном электрическом поле величина бутстреп-тока слабо зависит от учёта в столкновительном члене оператора по гироуглу, что согласуется с известными оценками в области их применимости, однако с увеличением радиального

- электрического поля становится важным учёт зависимости по гируглу в распределении ионов, особенно около магнитной оси и на границе плазмы;
- код NNTMM (анализ данных с помощью нейросетей) может успешно применяться для поиска профилей плотности и температуры, при которых возрастает доля бутстреп-тока;
 - в близких к реальным условиям радиальное электрическое поле может заметно превышать предсказанное упрощёнными моделями и оказывать сильное влияние на бутстреп-ток, формирование транспортного барьера, радиальный перенос энергии;
 - плазмoфизический программный комплекс DiFF позволяет воспроизводить результаты экспериментов;
 - в диссертации для термоядерной установки масштаба ITER уточнены известные прогнозы величины бутстреп-тока, радиального электрического поля и обобщённых неоклассических потерь энергии; в частности, по сравнению с предсказаниями упрощённых подходов максимум плотности бутстреп-тока смещается к границе плазмы на 20-30%, а радиальное электрическое поле на периферии – выше на $\approx 30\%$.

Теоретическая значимость исследований определяется следующим:

- предложены новые методы изучения поведения заряженных частиц в плазме тороидальных магнитных ловушек. В частности, разработанный полулагранжев подход описания плазмы применим для изучения широкого класса закономерностей и характеристик кинетических явлений и процессов в токамаках и может быть использован для интерпретации и прогнозирования экспериментов;
- на основе предложенных подходов создан плазмoфизический программный комплекс DiFF. Комплекс позволяет детально изучать кинетику плазмы тороидальных магнитных ловушек в условиях, близких к экспериментальным, за счёт эффективного использования возможностей современной вычислительной техники при помощи разработанных новых параллельных алгоритмов;
- полулагранжев подход позволяет относительно легко включать в описание плазмы различные подлежащие изучению физические эффекты, например, гофрировку магнитного поля или ВЧ-нагрев, которые в других подходах требуют существенной модификации кинетического уравнения. Для этого достаточно задать соответствующие магнитное и/или электрическое поле в уравнениях движения заряженных частиц, а форма кинетического уравнения с кулоновским оператором в данном подходе остаётся неизменной.

Практическая значимость результатов выражена в следующем:

- вычислительные методы, разработанные в диссертации, применены для расчёта бутстреп-тока, обобщённых неоклассических радиальных электрических полей и радиальных потоков частиц и энергии;
- созданный плазмофизический программный комплекс DiFF представляет собой эффективный инструмент для исследования физических явлений и процессов в плазме токамака. Комплекс позволяет детально моделировать кинетику плазмы тороидальных магнитных ловушек в условиях, близких к экспериментальным;
- разработанное программное обеспечение интегрировано в создаваемый в НИИСИ РАН комплекс имитационного моделирования токамака HASP CS (Hardware-Software Plasma Control System) и может быть использовано в нём для более точного решения широкого класса задач, в том числе задач управления током и кинетическими параметрами плазмы.

Достоверность результатов подтверждена следующими фактами:

- использование предложенных методов обосновано путём оценки погрешностей аппроксимаций, сравнения с аналитическими формулами и расчётами по другим кодам;
- программная реализация разработанных алгоритмов основана на зарекомендовавшей себя на практике технологии программирования вычислительных задач;
- продемонстрировано хорошее соответствие полученных расчётных данных ранее известным физическим результатам в области их применимости: результатам неоклассической теории, в том числе обобщённой, и расчётам по кинетическому коду FPP-3D.

Личный вклад

Автором лично или при его непосредственном участии осуществлялись: формулировка полулагранжева подхода к описанию кинетики плазмы, постановка физических и математических задач, разработка методов их решения, создание программ, интерпретация результатов вычислений и сравнение с экспериментальными данными, изучение закономерностей и характеристик физических явлений и процессов, проведены все расчёты. Автор представил результаты научной работы на научных семинарах, школах и конференциях и внёс значительный вклад в подготовку материалов к опубликованию.

Полученные автором результаты исследований обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях, школах и семинарах. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в Scopus и WOS, в том числе рекомендованных ВАК РФ.

ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ пришел к выводу, что диссертационная работа **Аникеева Фёдора Александровича** «Математическое моделирование кинетики тороидальной плазмы полулагранжевыми и лагранжевыми методами», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842.

ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ принял решение присудить **Аникееву Фёдору Александровичу** ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности «Физика плазмы» (01.04.08).

При проведении тайного голосования ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ в количестве 21 человека, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы», участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовал:

за присуждение ученой степени – 21, **против** присуждения ученой степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Протокол счетной комиссии утвержден открытым голосованием присутствующих членов ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА – единогласно.