



Министерство науки  
и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша  
Российской академии наук»  
(ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

125047, Москва, Миусская пл., 4 Тел. 8 (499) 220-72-33 Факс 8 (499) 972-07-37  
http://keldysh.ru e-mail: office@keldysh.ru  
ОКПО 02699381 ОГРН 1037739115787 ИНН/КПП 7710063939/771001001

14.10.2019 № 11103-9422/926

УТВЕРЖДАЮ

На № \_\_\_\_\_

Директор  
Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»,



член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук, профессор

А.И. Аптекарев

2019 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертацию Аникеева Фёдора Александровича  
«Математическое моделирование кинетики тороидальной плазмы  
полулагранжевыми и лагранжевыми методами»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук,  
по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Представленная на отзыв диссертация Ф.А. Аникеева посвящена важной и актуальной задаче – разработке, изучению и применению методов теоретического исследования кинетики тороидальной плазмы.

Диссертация изложена на 159 страницах машинописного текста и состоит из 4-х глав, введения, заключения и списка литературы, включающего 104 источника.

Диссертация иллюстрирована 34 рисунками. Теоретическое изучение тороидальной плазмы даёт важную информацию о происходящих в ней явлениях и процессах. Особое значение такие исследования имеют для получения новых сведений о закономерностях и характеристиках явлений в термоядерных режимах, которые не достижимы на действующих установках. В настоящее время успешная реализация международного проекта термоядерного реактора ITER, в котором участвует Россия, и сроки перехода к термоядерной энергетике фактически зависят от точности прогноза, полученного методом математического моделирования. Наиболее детальную информацию о физических закономерностях и характеристиках явлений и процессов в плазме даёт математическое моделирование её поведения с применением вычислительной техники. При этом особый интерес представляет вопрос об адекватности предлагаемых моделей. Поэтому актуальность темы сомнений не вызывает.

Во введении обсуждается актуальность темы исследования (стр.4-5), степень разработанности проблемы (стр.5-8), цели и задачи исследования (стр. 8-9), научная новизна (стр.9-12), теоретическая и практическая значимость (стр.12-13), методология и методы исследования (стр.13-14), достоверность (стр.14-15), основные положения, выносимые на защиту (стр.15-16), апробация работы (стр.16-17), публикации (стр.17-20), структура и объем работы (стр. 20).

Глава 1. «Кинетические модели тороидальной плазмы. Постановка математических задач» (стр. 21-41) содержит 6 параграфов. В параграфе 1.1 «Общая самосогласованная модель эволюции тороидальной плазмы в инвариантной форме» (стр.21-24) приводится система уравнений Максвелла и уравнение на функцию распределения (1.6), которые составляют систему уравнений Власова-Максвелла. Здесь, конечно, желательно более детальное обсуждение системы уравнений. Пассаж на стр. 22 «Присутствие уравнения (1.5) соответствует описанию эволюции через последовательность равновесных конфигураций. Быстрые процессы, приводящие к установлению равновесия, в модели не рассматриваются. Уравнение (1.5) является некоторым дополнительным ограничением на искомые функции, так как система (1.1) - (1.9) является замкнутой и без него» требует пояснений. Неясно, (1.5) выполняется автоматически со временем или это навязываемое условие. Далее идёт описание интеграла столкновений Ландау. Снова это делается вскользь и неясно насколько физика вообще требует здесь учёт столкновений. Параграф 1.2 «Кинетические модели с усреднёнными по гироуглу коэффициентами в кулоновском операторе»: формулируется полулагранжев подход. Интеграл столкновений Ландау преобразуется интегрированием по этому самому гироуглу. Снова неясно, точное ли это преобразование. Сам интеграл столкновений Ландау является весьма сомнительным объектом, поэтому точность здесь неясна: вполне возможно, что здесь можно ограничиться релаксационным приближением. Ясно видно, что он написан, как в диссертации так и в книге, с обратным знаком: при такой записи не сохраняется положительности функции распределения. Движение

бесстолкновительное описывается понятными уравнениями (1.15) движения частицы в электромагнитном поле – силой Лоренца. Параграф 1.3 «Формулировка задачи о вычислении бутстреп-тока.» Объясняется понятие бутстреп-тока. Предлагается рассмотреть рис. 4.6 в работе [2] (стр.29). Такие отсылки затрудняют чтение. Параграф 1.4 «Формулировка задачи о расчёте радиального электрического поля». Здесь совершенно непонятно, откуда берётся одномерная задача для уравнения Пуассона (1.20). Предлагается ещё два подхода – минимума энергии и основанный на неоклассической теории. Они сравниваются. Параграф 1.5 «Вычисление радиальных потоков частиц и энергии». Имеем пассаж: «В [2] показано, что (1.21) можно преобразовать к следующему виду», и дальше формулы. Предлагается всё время обращаться к книге [2] научного руководителя. Это затрудняет чтение. Параграф 1.6 «Формулировка задачи об управлении полным током в плазме». Описывается задача управления. Снова огромное количество ссылок на единственную книгу [2]. Нет уверенности, что твёрдо стоим на ногах.

Глава 2 «Численные методы» (стр.42-86) содержит 8 параграфов. Параграф 2.1 «Новые параллельные алгоритмы расчёта бесстолкновительного движения заряженных частиц в тороидальной плазме». Здесь обсуждается схема с перешагиванием из [2]. Параграф 2.2 «Полулагранжев метод решения кинетических уравнений с оператором кулоновских столкновений». Здесь автор уверенно плавает в методах решений и ясно видно владение материалом. Параграф 2.3 «Адаптация метода сглаженных частиц для решения кинетических задач»: «Для описания динамики функции распределения здесь используются идеи интенсивно развиваемого и применяемого в последние годы метода SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics. В диссертационной работе метод обобщён на шестимерный случай и криволинейную систему координат. Проведена адаптация метода для решения многомерных кинетических уравнений. Ввиду новизны применения SPH к решению задач кинетики тороидальной плазмы, ниже представлено его достаточно подробное описание» (стр. 46-47). Дается подробное его описание. Эта глава - одна из центральных в диссертации. Параграф 2.4 «Быстрый алгоритм поиска ближайших соседей». Обсуждается поиск соседних точек. Параграф 2.5 «Новые модификации метода Монте-Карло для расчёта функции распределения». В данном разделе рассматривается так называемая ланжевенская модель динамики заряженных частиц в плазме. «Целью исследований здесь является разработка и изучение свойств параллельных алгоритмов метода Монте-Карло решения уравнений Ланжевена для двух типов архитектур ЭВМ: с центральными процессорами (CPU) и графическими ускорителями (GPGPU). А также выработка рекомендаций к архитектуре перспективных супер-ЭВМ» (стр.67). Размах! Параграф 2.6 «Методы расчёта радиального электрического поля». Описываются разные методы. Параграф 2.7 «Метод расчёта обобщённых радиальных потоков частиц и энергии». Проводится повышение точности расчёта радиальных потоков с помощью модельной функции распределения. Параграф 2.8. «Алгоритм

управления полным током плазмы». Предложены новые модификации алгоритмов управления. Методы тестировались на модельной задаче.

Глава 3. «Программное обеспечение. Реализация параллельных алгоритмов» (стр.87-116) содержит 8 параграфов. Параграф «3.1 Программный комплекс DiFF, моделирующий кинетику плазмы». Описан разработанный автором код. Написано с любовью. «Программный комплекс DiFF (Distribution Function Finder) – это набор разработанных в диссертации кодов для расчёта функций распределения заряженных частиц на основе решения полулагранжевыми и лагранжевыми методами системы нелинейных кинетических уравнений с оператором кулоновских столкновений». Параграф 3.2 «Организация параллельных вычислений». Описываются «три технологии распараллеливания: MPI, OpenMP и OpenCL.» (стр. 89-93). Параграф 3.3. «Код DiFF-SLPK, реализующий полулагранжев подход» (стр. 93-94). «Полулагранжев метод из раздела 2.2 в комбинации с расчётом траекторий из раздела 2.1 и соответствующие параллельные алгоритмы реализованы в коде DiFF- SLPK (Distribution Function Finder – Semi-Lagrangian Particle Kinetics) на языках Fortran 2008, C++11 и OpenCL C. Общий объём программного обеспечения DiFF- SLPK – более 23 тысяч строк. Из трёх кодов, включённых в программный комплекс DiFF, DiFF-SLPK является предпочтительным, поскольку позволяет получить решение задачи с высокой точностью за относительно малое время расчётов». Параграф 3.4. «Код DiFF-SPK, реализующий адаптированный к кинетике плазмы метод сглаженных частиц». «Стационарная функция распределения, найденная с помощью DiFF-SPK, совпала с точностью до 1% с известным аналитическим решением». Непонятно с каким. «Расчёт выхода функции распределения на стационар с 107 SP-частиц на одном GPU занял около 2-х суток. Здесь важно отметить, что CPU тоже участвовал в расчёте. В частности, именно на CPU по найденному на GPU списку соседей вычисляется кулоновский оператор. Но все наиболее затратные по времени операции в этом расчёте проводились на GPU» (стр. 98). Параграф 3.5. «Код DiFF-MS – моделирование кинетики плазмы методом Монте-Карло» (стр.100-103). Параграф 3.6 «Код NNTMM – анализ данных с помощью нейросетей» (стр.103-111). «Графическая среда NNTMM (Neural Network Tool for Mathematical Modelling) предназначена для математического моделирования с помощью нейросетей прямого распространения, визуального анализа данных на основе самоорганизующихся карт Кохонена, отображающих точки многомерного пространства на плоскость с сохранением свойства близости между точками, и решения задач оптимизации» (стр.106). Параграф 3.7 «Программная реализация алгоритма управления полным током плазмы» (стр.111-113). Параграф 3.8 «Интеграция разработок в комплекс имитационного моделирования HASP CS». (стр. 113-116). «В НИИСИ РАН разрабатываются среда имитационного моделирования HASP CS (Hardware-Software Plasma Control System) [37, 38]. Вся среда HASP CS реализована на языке Java, что обеспечивает её платформенную независимость. Разработанный в диссертации программный комплекс DiFF (п. 3.1-

3.5) и новые модификации алгоритма управления полным током в плазме (п. 2.8) включены в среду HASP CS».

Глава 4. Вычислительный эксперимент. Решение модельных задач. Моделирование кинетики плазмы в условиях установок AUG, JET, MAST и ITER (стр.117-149) содержит 4 параграфа. Параграф 4.1 Расчёт бутстреп-тока (стр.117-132). «В диссертации предложена методика, обобщающая подход [2]. Рассматривается ещё более общая, чем в [2], формулировка задачи без применения упрощённого (дрейфового) описания траекторий заряженных частиц и рассмотрения только быстрых частиц. Также как и в [2], не используется предположение о виде функции распределения и близости траекторий частиц к магнитным поверхностям. Кроме того, здесь численно рассчитывается не только функция распределения электронов, но и функция распределения ионов на основе совместного решения нелинейной системы кинетических уравнений для электронов и ионов, а также численно рассчитывается радиальное электрическое поле, влияющее на бутстреп-ток». Судя по уравнениям из книги Ф.С.Зайцева п. (4.1.5), на которую опирается диссертант, они требуют значительного осмысления, переработки, критики и упрощения. Даже введённая система координат требует усовершенствования. Одна из переменных (стр. 22 книги) – гамма–метка магнитной поверхности (что это? В сноске ссылка на стр. 123.) На стр. 124 находим утверждение, которое потом применяется сразу дважды. Если вектор  $\mathbf{V}$  лежит в плоскости, касательной к поверхности  $\psi = \text{const}$  и  $r = \text{const}$ , то эти поверхности совпадают. Контрпример строится сразу: вектор  $(0, 0, V_z(x, y, z))$  и две функции  $\psi(x)$  и  $r(y)$ . Эта координата гамма должна зависеть от времени? Всё повисает. Впрочем, это не должно влиять сильно на результаты расчётов, поскольку относится к книге руководителя, а не к диссертации. 4.2 «Расчёт радиального электрического поля» (стр.130-140). «В работе продемонстрировано, что при относительно небольших значениях радиального электрического поля оно может быть достаточно точно определено в рамках 5D задачи без учёта оператора по гируглу в операторе кулоновских столкновений. Это подтверждает правильность результатов упрощённых моделей в рамках условий их применимости. Однако в общем случае требуется использование трёхмерного столкновительного члена» (стр.132-134). Это характерное высказывание с надеждой на интеграл столкновений. Это надежда на интеграл столкновений не только не может быть оправдана, но вся диссертация именно это и доказывает. Судя по всему, упор в вычислениях на интеграл столкновений Ландау, а не на власовское описание вообще, есть ложный посыл не только этой работы, но и книги научного руководителя Ф.С.Зайцева. Интеграл столкновений вообще может и должен быть выкинут при расчёте токамаков и плазмы: достаточно там самосогласованных полей. Ну уж если очень хочется, можно туда что-нибудь добавить самое простое, вроде релаксационного приближения. Но ловить тонкие эффекты с помощью интеграла столкновений – это безрассудство. Уж если за 150 лет уравнения Больцмана ни одного такого эффекта не нашли, то извините. Снова -

это не моё мнение. Это нам с А.В.Бобылевым (лауреат государственной премии СССР 1989 года за уравнение Больцмана) сказал в Обервольвахе на конференции в 1999 году Карло Черчиньяни, автор очень известных книг по кинетической теории. Фраза была такая: «Я еду в Японию рассматривать один эксперимент. Может быть, это подтвердит уравнение Больцмана впервые». Как так? Речь идёт именно о тонких свойствах интеграла столкновений. Общие свойства уравнения Больцмана хороши и фундаментальны: H-теорема и рост энтропии – доказательство этого Больцманом в 1872 году и было тем, что обессмертило уравнение, которое перед этим в 1868 году вывел, выстрадал и применил Максвелл. Поэтому оно и называется уравнением Больцмана, хотя весь вывод его – Максвелла. Стремление к максвелловскому распределению, получение из него уравнений газодинамики – здесь всё в порядке, но это может быть получено и из более простых уравнений типа релаксационных моделей, или даже приближения Ландау для максвелловских молекул. Но когда речь идёт о тонких свойствах – зависимость коэффициентов диффузии или теплопроводности от потенциалов взаимодействия или другие тонкие свойства – всё, тут полный коллапс. Конечно уравнение Ландау наследует эту катастрофу в увеличенных размерах. Максвелл был первым, который это обнаружил и в яркой форме продемонстрировал это всему миру, хотя может быть и не подозревал этого: он ограничился в решении задачи о выводе уравнений Навье-Стокса максвелловскими молекулами. Это такой вырожденный случай: чуть в одну сторону сдвинешься – спектр отделён от нуля (жёсткие потенциалы), в другую – спектр линеаризованного оператора столкновений не отделён от нуля (мягкие потенциалы в терминологии Грэда). Всё это и показывает в яркой форме тщетность ухватить интегралом столкновений какие-то тонкие вопросы природы. Но тут авторы диссертации Ф.А.Аникеев и его научный руководитель Ф.С.Зайцев не виноваты. Таково состояние науки. Можно сказать и по-другому: диссертация написана в рамках некоторой модели. 4.3. «Расчёт обобщённых неоклассических радиальных потоков энергии ионов» (стр. 140-144). 4.4. «Использование DiFF-SLPK в комплексе имитационного моделирования HASP CS» (стр.144-150).

Подведём итоги. Автор диссертации создал новую модификацию численной модели плазмы. Критика этой модели, высказанная по ходу отзыва, не снижает научной ценности исследования. В этой критике высказаны предложения по усовершенствованию модели. Центральными главами диссертации являются главы 2 и 3, где автор продемонстрировал силу своих вычислительных возможностей для заданной модели. Можно пожелать также сравнить полученные результаты с точными решениями уравнения Власова из работ А.Л.Скубачевского и В.В.Веденяпина. Автореферат правильно отражает диссертацию, все результаты своевременно опубликованы.

Указанные недостатки диссертационной работы не снижают её общую высокую положительную оценку, а также не влияют на научную и практическую значимость полученных результатов.

Исследования, изложенные в диссертации «Математическое моделирование кинетики тороидальной плазмы полулагранжевыми и лагранжевыми методами» Аникеева Фёдора Александровича, свидетельствуют о высокой научной квалификации автора, а сама диссертация представляет собой законченную, самостоятельную и оригинальную научно-исследовательскую работу, которая соответствует паспорту специальности 01.04.08 – физика плазмы (физико-математические науки) и отвечает 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.

Диссертация «Математическое моделирование кинетики тороидальной плазмы полулагранжевыми и лагранжевыми методами» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель Аникеев Фёдор Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен после доклада соискателя и обсуждения диссертации на заседании семинара по математической физике им. М.В. Масленникова при отделе №6 Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН 3 сентября 2019 года, протокол №1 семинара №374.

Отзыв составил:

ведущий научный сотрудник  
Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»  
доктор физико-математических наук,  
профессор



В.В. Веденяпин

Адрес:

125047, Москва, Миусская площадь, д. 4,

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

тел.: +7 499 978-13-14

факс: +7 499 972-07-37

e-mail: office@keldysh.ru