

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института
вычислительной математики и
математической геофизики
Сибирского отделения РАН
(ИВМиМГ СО РАН),
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.,

Кабанихин С.И.

«19» сентября 2016 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Перепёлкиной Анастасии Юрьевны
«Трёхмерный кинетический код для моделирования замагниченной
плазмы»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертационная работа Перепёлкиной А.Ю. посвящена созданию программного комплекса численного моделирования кинетики плазмы макрочастиц. Он характеризуется самосогласованной моделью, основанной на системе уравнений Власова-Максвелла, использованием второго порядка аппроксимации, возможностью кратного увеличения шага временной дискретизации движения частиц по отношению к шагу дискретизации уравнений поля. Основной отличительной особенностью является использование локально рекурсивных нелокально асинхронных (LRnLA) алгоритмов как способа ускорения вычислений в сравнении с традиционными алгоритмами, как для последовательных, так и для параллельных расчётов.

Актуальность.

В связи с внедрением в исследовательскую практику вычислительной техники во многих областях физики и, в частности, в физике плазмы, особое внимание уделяется развитию численных алгоритмов и реализующих их кодов. Кинетические коды, основанные на методах частиц, наиболее полно описывают кинетику плазмы, но необходимые объёмы вычислительных операции и обрабатываемых данных вынуждают исследователей использовать суперкомпьютеры всё больших мощностей при решении возникающих задач. В этих условиях актуальны такие направления исследований, как разработка и реализация эффективных алгоритмов, выбор наиболее подходящих для эффективной реализации численных схем.

Применение кинетических плазменных кодов полезно, в частности, для исследования поведения плазмы в плазменных двигателях. Здесь современные решения вынуждены использовать калибровки физических

параметров, упрощения геометрии и математической модели, чтобы провести расчеты в приемлемые сроки.

Другой пример – описание взаимодействия лазера с плазмой, сопровождается рядом не описываемых линейной теорией процессов, которые многократно отличаются масштабами между собой. Расчёты, учитывающие весь комплекс взаимодействующих явлений, не были проведены до сих пор.

Перечисленные примеры указывают на **актуальность** развития методов повышения эффективности кинетических кодов для описания многомасштабных плазменных процессов.

Содержание работы. Структура диссертации включает введение, три главы, заключение и список использованной литературы.

Во **введении** обоснована актуальность темы, указана цель работы и задачи диссертационного исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены доводы о научной новизне, практической ценности и обоснованности результатов. Указан личный вклад автора и сведения о докладах и публикациях по содержанию работы.

В **первой главе** сформулирован математический аппарат. Приведён обзор передовых кодов моделирования плазмы. Исходя из поставленных задач обоснованы требования к выбору численной схемы. Математическая модель должна быть трёхмерной, самосогласованной, полностью кинетической (в отличие от гибридных гидродинамических решений), иметь высокий порядок и при учете многомасштабности не должна содержать калибровок физических параметров. Требование локальности зависимостей, и, как следствие, необходимость выбора явной схемы, возникает при намерении использовать LRnLA алгоритмы в программной реализации. Далее выписана система уравнений Власова-Максвелла. Дискретизация эволюционных уравнений Максвелла проводится по схеме в конечных разностях во временной области (FDTD) со вторым порядком. В методе макрочастиц дискретизации уравнения Власова выбран форм-фактор частиц второго порядка. Продвижение частиц организовано с учётом релятивизма по схеме Бориса. Исследована дисперсия. Среди возможных граничных условий описаны условия периодичности, симметрии, отражения. Сформулирована многомасштабность в рамках описанной численной схемы: для частиц шаг по времени может быть в несколько раз больше временного шага схемы FDTD. Эта возможность обоснована различием критериев выбора этих шагов в целевых постановках. Приведены результаты по подтверждению второго порядка аппроксимации в программной реализации.

Вторая глава посвящена описанию построения LRnLA алгоритмов. Алгоритм представляется как правило обхода графа зависимостей, определяемое рекурсивным разбиением полного графа зависимостей гранями фигур в четырёхмерном пространстве. Поэтому алгоритму в общем случае сопоставляется некая геометрическая форма. Описание сопровождается иллюстрациями для упрощенного одномерного моделирования. Здесь раскрывается качественное отличие LRnLA алгоритмов от традиционно

применяемых в численном моделировании. Традиционные алгоритмы обхода проводят вычисления послойно, поэтому им во введённой терминологии соответствуют плоские в пространстве-времени фигуры; алгоритмы семейства LRnLA строятся на основе анализа зависимостей вычислений и их фигуры имеют некоторую протяжённость по оси времени. Среди множества вариантов протяжённых по временной оси фигур обоснован выбор класса алгоритмов, представляющих из себя призму с наклонными боковыми гранями. Описаны особенности алгоритма на границах. Построен алгоритм для метода частиц, с учетом перемещения частиц по сетке и различия временных масштабов подсистемы частиц и полей. Указаны возможные расширения на различные виды параллельных вычислений. Описаны особенности программной реализации: хранение данных на основе Z-кривой, управление данными частиц при помощи виртуальной памяти операционной системы, использование SSE/AVX векторизации, автоматическая генерация выражений кода, интерфейс ввода и вывода. Приведены результаты тестирования ускорения при векторизации упрощенной версии кода. Упомянуто тестирование на ряде модельных задач с известным решением. Возможность описания трёхмерных самосогласованных нелинейных процессов продемонстрирована в упрощенной постановке задачи о транспорте электронов в газоразрядном канале плазменного двигателя.

Третья глава описывает пример применения кода в задаче об исследовании филаментационной (вейбелевской) неустойчивости в лазер-плазменном взаимодействии. Приведены сведения о линейной теории развития вейбелевской неустойчивости в плазме с неизотропным распределением частиц по скоростям. Поставлен численный эксперимент об исследовании инкремента в линейном режиме в двухпучковой системе. Из результатов сделаны выводы о необходимости трёхмерного описания и об ограничениях на численные параметры при компьютерном исследовании вейбелевской неустойчивости в сложных процессах. В завершение поставлен численный эксперимент о взаимодействии лазерного импульса со слоем плазмы. Из серии экспериментов с варьированием амплитуды импульса сделан вывод, что зависимость доли энергии, переданной на ускорение частиц от неё не монотонна, и потери на генерацию магнитных полей составляют до пяти процентов.

В **заключении** приведены результаты диссертационной работы.

Наиболее существенные **результаты**, полученные соискателем в диссертационном исследовании, состоят в следующем:

1. Разработаны и реализованы LRnLA алгоритмы для метода частиц. Создан трехмерный кинетический код для самосогласованного моделирования плазмы, отличающийся от аналогов высокой производительностью вычислений.
2. Проведено тестирование кода в задаче о филаментационной неустойчивости. Подробное изучение развития филаментационной структуры в модельных постановках позволило сделать выводы о

необходимых характеристиках вычислительного эксперимента для адекватного описания этого процесса в постановках, где филаментация проходит в совокупности с другими нелинейными процессами.

3. На основе этого исследования поставлен эксперимент о взаимодействии лазерного импульса со слоем плазмы так, чтобы проследить в нём роль филаментации токов. Получены результаты о распределении энергии в зависимости от мощности падающего импульса. Зависимость доли энергии, ушедшей на образование магнитных полей вследствие веибелевской неустойчивости оказалась немонотонна и достигала 4.5%.

Научная новизна. Впервые реализован трехмерный код кинетического моделирования плазмы на основе LRnLA алгоритмов. Разработаны новые LRnLA алгоритмы для метода частиц с учетом возможности разномасштабности во времени. Впервые проведены трехмерные вычисления для исследования веибелевской неустойчивости при взаимодействии лазерного излучения с плазмой, включая в область поперечную огибающую падающего импульса. При этом для расчета был использован персональный компьютер.

Практическая значимость работы состоит в следующем. Разработанный программный комплекс используется для численных вычислений физики плазмы, что полезно и для фундаментальных, и для прикладных исследований. Программный комплекс обладает высокой эффективностью, позволяет проводить расчёты с высокой скоростью без существенных приближений. Быстрый темп счёта делает удобным проведение серий расчётов, а при дальнейшем развитии метода становится возможным планирование сверхбольших задач. В качестве примера применения кода проведён ряд расчётов по взаимодействию лазерного излучения со сверхкритическим плазменным слоем. Выделена роль филаментационной неустойчивости и определена доля энергии, уходящая на генерацию магнитных полей, что может быть полезным при планировании экспериментальных установок.

Достоверность результатов обеспечивается тем, что использованы признанные и неоднократно исследованные численные схемы. Для оценки точности решений проводилось тестирование кода, получено соответствие решения аналитическим оценкам для простых постановок.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Ряд отечественных и зарубежных предприятий использует кинетические коды для проведения исследований. Полученный в результате диссертационного исследования код может быть предложен в качестве замены многим существующим решениям. Например, для разработок в научных группах ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академ. Е. И. Забабахина», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП «ВНИИА» им. Н.Л.Духова, ФГПУ ИВМиМГ СО РАН, а также в фундаментальных исследованиях и образовательных программах, проводимых в университетах, таких как МИФИ, МФТИ, НГУ.

Замечания по работе

Из работы непонятно, какой количественный эффект даёт использование асинхронных алгоритмов по сравнению с традиционными.

В автореферате нет ссылки на рис. 4.

В работе имеются некоторое количество опечаток, не мешающих пониманию текста.

Общая оценка работы. Приведённые замечания не меняют общей положительной оценки выполненной диссертационной работы. В диссертационном исследовании рассмотрены актуальные научные задачи. Постановка, методы и выводы ясны и обоснованы. Результаты обладают научной новизной и практической ценностью. Содержание диссертации соответствует заявленной специальности. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

Диссертация Перепёлкиной А.Ю. является законченным научным исследованием и соответствует критериям актуального постановления о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ. Перепёлкина А.Ю. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором, заведующим лабораторией параллельных алгоритмов решения больших задач Вшивковым Виталием Андреевичем.

Отзыв обсуждён и одобрен на научном семинаре ИВМиМГ СО РАН 19 сентября 2016 г.

Заведующий лабораторией
параллельных алгоритмов решения больших задач ИВМиМГ СО РАН,
д.ф.-м.н.,
профессор

19 сентября 2016 г.

/Вшивков В.А./

Институт вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН)

Проспект академика Лаврентьева, 6,

630090, Новосибирск, Россия

Телефон: +7 (383) 330 83 53

Факс: +7 (383) 330 87 83, +7 (383) 330 66 87

E-mail: contacts@sscc.ru

<http://icmmg.nsc.ru/>