

**Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова**

**Научная конференция
«ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ»
16–27 апреля 2018 г.**

Секция высокопроизводительные вычисления

Тезисы докладов

**Межфакультетская кафедра
высокопроизводительных вычислений**

**Москва
2018**

Содержание

| | |
|---|----|
| 1. Программа заседаний | 3 |
| 2. Ф.С. Зайцев. Моделирование данных диагностики Neutral Particle Analyzer, поставляемой на ITER Россией | 4 |
| 3. А.Г. Шишкин. Апробация комплекса HASP CS на примере управления плазмой в термоядерном реакторе ITER | 6 |
| 4. Е.П. Сучков. Интеграция комплекса управления плазмой HASP CS с базой физических данных IMAS установок JET и ITER | 7 |
| 5. С.В. Степанов. Распределённый доступ к ресурсам комплекса моделирования и управления плазмой HASP CS | 9 |
| 6. Ф.А. Аникеев. Новый алгоритм расчёта радиальных электрических полей в тороидальной плазме | 11 |

ПРОГРАММА ЗАСЕДАНИЙ

СЕКЦИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Межфакультетская кафедра высокопроизводительных вычислений

17 апреля, вторник, 16.50

Учебный корпус, 4 этаж, ауд. 404

1. Моделирование данных диагностики Neutral Particle Analyzer, поставляемой на ITER Россией.
Доклад профессора Зайцева Ф.С.
2. Апробация комплекса HASP CS на примере управления плазмой в термоядерном реакторе ITER.
Доклад доцента Шишкина А.Г.
3. Интеграция комплекса управления плазмой HASP CS с базой физических данных IMAS установок JET и ITER.
Доклад ассистента Сучкова Е.П.
4. Распределённый доступ к ресурсам комплекса моделирования и управления плазмой HASP CS.
Доклад мл.науч.сотр. Степанова С.В.
5. Новый алгоритм расчёта радиальных электрических полей в тороидальной плазме.
Доклад инженера Анিকেва Ф.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДИАГНОСТИКИ NEUTRAL PARTICLE ANALYZER, ПОСТАВЛЯЕМОЙ НА ITER РОССИЕЙ

Ф.С. Зайцев^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
межфакультетская кафедра высокопроизводительных вычислений.

²Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва.
fza@mail.ru

Многие страны мира ведут интенсивные исследования по переходу к термоядерной энергетике, использующей безопасный, практически неисчерпаемый источник энергии. Во Франции с участием России строится международный термоядерный реактор ITER (www.iter.org). Проект призван продемонстрировать экономическую перспективу термоядерных электростанций с магнитным удержанием плазмы на базе установок токамак.

Одной из важнейших диагностик плазмы в ITER является анализатор нейтральных частиц (NPA) [1], позволяющий непосредственно наблюдать процессы внутри плазмы. NPA измеряет проинтегрированное по лучу видимости энергетическое распределение атомов LID (Line Integrated Distribution), см. формулу (1.358) в [2, 3].

Расчёт ожидаемых на ITER сигналов от быстрых ионов, регистрируемых с помощью NPA, основан на вычислении их функции распределения. Адекватное моделирование поведения быстрых ионов осложняется необходимостью учёта целого ряда кинетических эффектов: отклонения дрейфовых траекторий от магнитных поверхностей; кулоновских столкновений (диффузия и перенос по скорости, рассеяние по питч-углу, неклассический радиальный транспорт и т.п.); источников и стоков частиц, включая прямые орбитальные потери из плазмы; упругих ядерных столкновений; неустойчивостей и колебаний плазмы; гофрировочной радиальной диффузии в областях плазмы со значительной гофрировкой магнитного поля.

Функция распределения быстрых ионов, учитывающая перечисленные эффекты, описывается усреднённым по дрейфовым траекториям трёхмерным кинетическим уравнением. Её расчёт реализован в коде FPP-3D [2, 3].

Важную роль в формировании энергетических спектров быстрых ионов играют упругие ядерные столкновения NES (Nuclear Elastic Scattering), при которых заряженные частицы достаточно высокой энергии сближаются настолько, что начинаются сильные ядерные взаимодействия со значительным обменом энергией, см., например, п. 1.8.3.1 в [2, 3]. Эффект NES приводит к заметному росту популяции быстрых ионов в области высоких энергий, что даёт хорошую возможность для их наблюдения с помощью NPA, см. п. 4.4, 4.7 в [2, 3]. Данное обстоятельство открывает перспективу использования NPA для определения изотопного состава топливной смеси дейтерия D и трития T в плазме ITER.

Различного рода неустойчивости и колебания плазмы могут привести к существенному перераспределению компонентов термоядерной реакции по радиусу и потере их на стенке камеры, см., например: [4, 5]. В результате может произойти существенное изменение радиального профиля мощности энергоклада термоядерной реакции в плазму [6] и изменение сигналов на NPA [7].

В работах [6, 7] рассмотрено влияние пилообразных колебаний на функции распределения ионов. Возникающее при этом перемешивание плазмы описывается с помощью формулы (2) из [6]. Эта формула обобщает модель перемешивания Б.Б. Кадомцева на случай ITER: некруглые магнитные поверхности, относительно большое

обратное аспектное отношение, значительное отклонение траекторий заряженных частиц от магнитных поверхностей.

В докладе даны постановки современных актуальных задач о поведении быстрых ионов в плазме ITER, обсуждены параллельные методы их решения, представлены результаты методических расчётов и результаты моделирования практически важных физических эффектов, в том числе сигналов на диагностике NRA. А также сделан обзор новых публикаций по изучению влияния пилообразных колебаний на измерение изотопного состава плазмы ITER с помощью NRA. Будет показано, что NRA в ITER позволяет детектировать пилообразные колебания плазмы и определять в ней процентный состав D-T смеси, как в отсутствие, так и при наличии неустойчивостей.

На основе проведённых исследований можно сделать обоснованный вывод о перспективности использования данных NRA в контроллерах автоматического управления изотопным составом термоядерного топлива и регулирования колебаний плазмы в ITER.

Работа выполнена при поддержке по программе фундаментальных исследований № 1.33П Президиума РАН.

Литература.

1. Afanasyev V.I., Chernyshev F.V., Kislyakov A.I., Kozlovski S.S., Ljublin B.V., Mironov M.I., Melnik A.D., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Petrov S.Ya. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2010. A 621. P. 456–467.
2. Зайцев Ф.С. Математическое моделирование эволюции тороидальной плазмы. 2-е изд. М.: МАКС Пресс, 2011. 640 с.
3. F.S. Zaitsev. Mathematical modeling of toroidal plasma evolution. English edition. - MAKS Press, 2014, 688 p.
4. Gorelenkov N.N., Budny R.V., Duong H.H., Fisher R.K., Medley S.S., Petrov M.P., Red M.H. // Nuclear Fusion. 1997. V. 37. N 8. P. 1053-1066.
5. Gorelenkov N.N., Gondhalekar A., Korotkov A.A., Sharapov S.E., and Testa D. // Phys. Plasmas. 2003. V. 10. N 3. P. 713-725.
6. Зайцев Ф.С., Гореленков Н.Н., Петров М.П., Афанасьев В.И., Миронов М.И. // ДАН. 2017. Т. 477. N 3. С. 291–294.
7. Ф.С. Зайцев, Н.Н. Гореленков, М.П. Петров, В.И. Афанасьев, М. И. Миронов. Влияние пилообразных колебаний в плазме ITER на энергетические спектры быстрых ионов и измерения с помощью анализатора нейтральных частиц. // ДАН. 2018. Т. 479. N 2. С. 141–144.

АПРОБАЦИЯ КОМПЛЕКСА HASP CS НА ПРИМЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ТЕРМОЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ITER

А.Г. Шишкин^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
межфакультетская кафедра высокопроизводительных вычислений.

²Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва.
fza@mail.ru

В настоящее время во всём мире ведутся интенсивные исследования в области управляемого термоядерного синтеза. При этом большое внимание уделяется задачам автоматическо-го управления высокотемпературной плазмой тороидальной конфигурации [1-3]. Для решения указанной проблемы предназначен программный комплекс HASP CS [2, 3]. Данный комплекс позволяет проводить моделирование и автоматическое управление высокотемпературной плазмой в реальном масштабе времени с обратной связью на основе принципиально нового алгоритма высокой точности и надёжности, использующего метод эpsilon-сетей для решения задач восстановления состояния плазмы по результатам измерений. В данной работе приведены результаты апробации комплекса HASP CS на примере управления плазмой в термоядерном реакторе ITER.

Комплекс HASP CS настроен на параметры омического сценария ITER с полным током в плазме 15 MA (ITER Scenario 2) и апробирован на примере модельной задачи. Показана возможность эффективного управления границей и полным током плазмы в ITER. В ходе суперкомпьютерных экспериментов получены рекомендации для инженерного исполнения систем управлений плазмой в ITER. Продемонстрирована возможность использования параллельных методик для решения задач управления границей и внутренними параметрами плазмы в реальном масштабе времени с обратной связью, для детальной обработки диагностических данных между разрядами. Проведена оптимизация компонентов комплекса HASP CS с целью повышения скорости работы, точности, надёжности и уменьшения стоимости решений.

Работа выполнена при поддержке по программе фундаментальных исследований № 1.33П Президиума РАН.

Литература.

1. F.S. Zaitsev. Mathematical modeling of toroidal plasma evolution. English edition. - MAKS Press, 2014, 688 p.
2. Зайцев Ф.С., Шишкин А.Г., Лукьяница А.А. и др. Базовые компоненты аппаратно-программного комплекса моделирования и управления тороидальной плазмой методом эpsilon-сетей на гетерогенных мини-суперкомпьютерах // Труды НИИСИ РАН. - 2016. - Т. 6. - №1 - С. 36-49.
3. Zaitsev F.S., Shishkin A.G., Lukianitsa A.A., et al. The Basic Components of Software-Hardware System for Modeling and Control of the Toroidal Plasma by Epsilon-Nets on Heterogeneous Mini-Supercomputers // Communications in Computational Physics, vol. 24, №1, pp. 1-26, 2018.
4. Zaitsev F.S., Shishkin A.G. Feasibility study of automatic D-T ratio control using NPA measurements of knock-on ions // Proc. 18th Meeting of ITPA Topical Group on Energetic Particles. Seville, pp. 1-12, 2018.

ИНТЕГРАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ HASP CS С БАЗОЙ ФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ IMAS ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕКТОРОВ JET И ITER

Е.П. Сучков^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
межфакультетская кафедра высокопроизводительных вычислений.

²Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва.
suchkov.egor@cs.msu.su

Создание систем управления плазмой включает применение значительного количества математических моделей, оперирование большими потоками экспериментальных и вычислительных данных, проведение множества расчётов на распределённой суперкомпьютерной технике [1]. Повышение производительности труда персонала и эффективности исследований требует разработки удобных платформи-независимых систем обмена вычислительными и экспериментальными данными, графических пользовательских интерфейсов, средств визуализации и анимации данных и процессов [1-5].

С этой целью в рамках проекта термоядерного реактора ITER международное сообщество разрабатывает систему IMAS (Integrated Modelling and Analysis Suite). IMAS планируется использовать на ITER в качестве основной инфраструктуры для хранения и использования экспериментальных данных. В настоящее время на установке JET (Евросоюз) вместо имеющейся там системы внедряется IMAS для апробации на реальных потоках экспериментальных и вычислительных данных [5].

В НИИСИ РАН разработаны и реализованы базовые компоненты программно-аппаратного комплекса моделирования и автоматического управления плазмой HASP CS (Hardware-Software Plasma Control System) [2, 3]. Комплекс HASP CS апробирован на модельных задачах управления границей и полным током плазмы в установках ITER, JET, T-15, ASDEX-upgrade, MAST [2-5].

Алгоритмическая часть HASP CS строится с использованием кода SDSS [1-5]. Код SDSS решает методом эpsilon-сетей с заданной точностью некорректные обратные задачи о восстановлении по измерениям внутреннего состояния плазмы, её формы и положения. Код SDSS позволяет также рассчитать погрешности реконструкции равновесия плазмы. Объем кода – около 30 тысяч строк на языке Fortran 2008.

Данные о равновесии имеют фундаментальное значение для правильного понимания процессов в современных установках, в строящихся и проектируемых термоядерных реакторах, т.к. эти данные используются в большинстве моделей и систем управления плазмой. При этом известно [1, 4], что измерения даже с малой погрешностью могут дать существенно различные реконструкции плотности тока и коэффициента запаса устойчивости из-за сильной некорректности задач диагностики плазмы.

Код SDSS использует на входе данные измерений, получаемые во время эксперимента. Поэтому интеграция его со средой IMAS является важной и актуальной задачей.

В докладе будет обсуждено применение технологии IMAS в компонентах комплекса управления плазмой HASP CS, изложены особенности использования IMAS на установке JET, описана система взаимодействия расчётных кодов, базирующаяся на среде Kepler [6], представлена реализация параллельных алгоритмов кода SDSS в инфраструктуре IMAS-Kepler.

Работа выполнена при поддержке по программе фундаментальных исследований № 1.33П Президиума РАН.

Литература.

1. Ф.С. Зайцев. Математическое моделирование эволюции тороидальной плазмы. 2-е издание. – Москва: МАКС Пресс, 2011, 640 с. Zaitsev F.S. Mathematical modeling of toroidal plasma evolution. English edition. – Moscow: MAKS Press, 2014, 688 p.
2. Ф.С. Зайцев, А.Г. Шишкин, А.А. Лукьяница, Е.П. Сучков, С.В. Степанов, Ф.А. Аникеев. Базовые компоненты аппаратно-программного комплекса моделирования и управления тороидальной плазмой методом эpsilon-сетей на гетерогенных мини-суперкомпьютерах. // Труды НИИСИ РАН, 2016, т. 6, N 1, с. 36-49.
3. F.S. Zaitsev, A.G. Shishkin, A.A. Lukianitsa, E.P. Suchkov, S.V. Stepanov and F.A. Anikeev. The Basic Components of Software-Hardware System for Modeling and Control of the Toroidal Plasma by Epsilon-Nets on Heterogeneous Mini-Supercomputers. // Commun. Comput. Phys. 2018, v. 24, N 1, p. 1–26.
4. R. Coelho, S. Matejčík, P. McCarthy, E.P. Suchkov, F.S. Zaitsev, EU-IM Team, ASDEX Upgrade Team. Evaluation of epsilon-net calculated equilibrium reconstruction error bars in the European integrated modeling platform. // Fusion Sci. Technol. 2016, v. 69, N 3, p. 611-619.
5. R. Coelho, W. Zwingmann, B. Faugeras, E. Giovanozzi, P. McCarthy, E.P. Suchkov, F.S. Zaitsev, J. Hollocombe, N. Hawkes, G. Szepesi and JET contributors and EUROfusion-IM Team. // Plasma equilibrium reconstruction of JET discharges using the IMAS modelling infrastructure. 27th IAEA Fusion Energy Conference, 2018.
6. <https://kepler-project.org/>

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО СЕТИ ЭВМ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТОРОИДАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ «ВИРТУАЛЬНЫЙ РАЗРЯД»

С.В. Степанов^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, межфакультетская кафедра высокопроизводительных вычислений.

²Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва.
sergey.v.stepanov@cs.msu.ru

Организация удалённого распределённого доступа к информационным системам и вычислительным ресурсам является одной из важных и актуальных задач разработки современных программных комплексов. Благодаря развитию компьютерных технологий, становится возможным обеспечение удалённого доступа без установки каких-либо пакетов и программ на рабочем месте пользователя.

Комплекс моделирования и управления плазмой HASP CS [1-3] представляет собой решение с достаточно сложной структурой, требующей специального системного и программного окружения. Введение в комплекс web-интерфейса или какого-либо другого механизма удалённого взаимодействия ещё более усложнило бы HASP CS, особенно её конфигурирование при установке и начале эксплуатации, потребовало бы дополнительных навыков от конечного пользователя.

Для организации распределённого доступа к ресурсам комплекса HASP CS применён ряд современных технологий, позволяющих, с одной стороны, обеспечить оперативную работу пользователя, с другой стороны, выполнить корректную настройку системного окружения и самого комплекса при начале работы с ним.

Доступ ко всем функциям HASP CS осуществляется через стандартный web-браузер, поддерживающий HTML 5. Для решения данной задачи применена технология NoVNC [4], не требующая установки каких-либо пакетов на рабочем месте пользователя. После открытия страницы по заданному адресу и идентификации сразу начинается общение с HASP CS в режиме удалённого рабочего стола.

Для обеспечения корректной конфигурации окружения и высокого уровня безопасности применена технология Docker [5], которая позволяет создавать изолированные друг от друга рабочие места с необходимым программным обеспечением. При открытии страницы пользователем происходит создание Docker-окружения в фоновом режиме и его конфигурация. Таким образом, гарантируется предоставление своего состояния комплекса HASP CS для каждого пользователя независимо от действий других пользователей.

В докладе будет рассмотрена информационная структура комплекса моделирования и управления плазмой HASP CS, описаны современные подходы к организации удалённого доступа к информационным системам и вычислительным комплексам, обсуждены основные сложности и оптимальные решения соответствующих задач.

Работа выполнена при поддержке по программе фундаментальных исследований № 1.33П Президиума РАН.

Литература.

1. Ф.С. Зайцев, А.Г. Шишкин, А.А. Лукьяница, Е.П. Сучков, С.В. Степанов, Ф.А. Аникеев. Базовые компоненты аппаратно-программного комплекса моделирования и управления тороидальной плазмой методом эpsilon-сетей на гетерогенных мини-суперкомпьютерах. // Труды НИИСИ РАН, 2016, т. 6, N 1, с. 36-49.

2. F.S. Zaitsev, A.G. Shishkin, A.A. Lukianitsa, E.P. Suchkov, S.V. Stepanov and F.A. Anikeev. The Basic Components of Software-Hardware System for Modeling and Control of the Toroidal Plasma by Epsilon-Nets on Heterogeneous Mini-Supercomputers. // Commun. Comput. Phys. 2018, v. 24, N 1, p. 1–26.
3. Д.П. Костомаров, С.В. Степанов, А.Г. Шишкин. Интегрированная среда моделирования «Виртуальный разряд». Поддержка численных экспериментов для изучения плазмы газовых разрядов. Доклады Академии Наук, 2014, т. 459, № 3, с. 266-269.
4. Пакет удаленного доступа в среде web-браузера NoVNC: <http://novnc.com>
5. Программное обеспечение для виртуализации на уровне операционной системы Docker: <https://docker.com>

НОВЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЁТА РАДИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ТОРОИДАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

Ф.А. Аникеев^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
межфакультетская кафедра высокопроизводительных вычислений.

²Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва.
snowfed@gmail.com

В настоящее время проводятся масштабные исследования по поиску новых источников энергии. Одним из таких источников является управляемый термоядерный синтез (УТС). Важнейшая задача УТС – разработка программных комплексов, позволяющих адекватно моделировать поведение плазмы в тороидальных магнитных ловушках [1].

Во многих случаях эффективность удержания плазмы в тороидальных системах определяется радиальным электрическим полем. Например, в режиме улучшенного удержания (H-mode) около границы плазмы возникает так называемый транспортный барьер, повышающий эффективность работы установки. Появление транспортного барьера связано именно с радиальным электрическим полем [2].

Традиционный подход к расчёту радиальных электрических полей опирается на неоклассическую теорию и имеет ограниченную область применимости из-за введения большого числа допущений при получении аналитического результата [1].

В данной работе предложен новый подход к расчёту радиальных электрических полей, основанный на минимизации того или иного функционала. Функционал выбирается в зависимости от рассматриваемой задачи. Один из вариантов – минимизация радиального потока ионов как в неоклассической теории, см. например: [1]. Для минимизации функционала применяются методы автоматического управления.

Рассматривается достаточно общая модель тороидальной плазмы, описываемая шестимерным кинетическим уравнением с трёхмерным оператором кулоновских столкновений, в котором коэффициенты усреднены лишь по гироуглу. Модель реализована программно в коде DiFF-PK (Distribution Function Finder – Particle Kinetics) на языках Fortran 2008 и C++11. Применены технологии параллельного программирования OpenMP, MPI и OpenCL.

Расчёт радиальных электрических полей проводился на суперкомпьютерах НИИСИ РАН [3]. Для тестовых расчётов с относительно небольшим числом элементов дискретизации в случае пятимерной аксиально-симметричной задачи может использоваться и персональная компьютерная техника с видеокартой. Время такого расчёта на ней составляет лишь десятки минут, что говорит о высоком качестве программной реализации параллельного алгоритма.

В докладе будет сформулирована математическая задача, обсуждены параллельные методы её решения, детально изложен новый алгоритм расчёта радиального электрического поля, представлены результаты вычислений, проведено сравнение с данными неоклассической теории.

Работа выполнена при поддержке по программе фундаментальных исследований № 1.33П Президиума РАН.

Литература.

1. Ф.С. Зайцев. Математическое моделирование эволюции тороидальной плазмы. 2-е издание. – Москва: МАКС Пресс, 2011, 640 с. Zaitsev F.S. Mathematical modeling of toroidal plasma evolution. English edition. – Moscow: MAKS Press, 2014, 688 p.
2. Viezzer E. Radial electric field studies in the plasma edge of ASDEX Upgrade. – Ludwig-Maximilians-Universität München, München, 2012, 113 p.
3. Компьютеры МСЦ НИИСИ РАН: <http://www.jssc.ru/scomputers.shtml>