= ФИЗИКА =

УДК 519.63:533.9.07

МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ В ЛОВУШКЕ-МИШЕНИ

© 2015 г. Е.А. Берендеев, член-корреспондент РАН Г. И. Димов, А. В. Иванов, Г. Г. Лазарева, М. П. Федорук

Поступило 23.09.2014 г.

DOI: 10.7868/S0869565215050096

ПЛАЗМЕННАЯ ЛОВУШКА-МИШЕНЬ

Одной из неотъемлемых частей проблемы управляемого термоядерного синтеза является создание источников мощных пучков нейтральных атомов; инжекция таких пучков используется как основной метод накопления и нагрева удерживаемой в магнитном поле высокотемпературной плазмы. Для получения атомарных пучков с энергией ≥0.5 МэВ необходимо пучки ускоренных отрицательных ионов пропускать через ней-

трализующую мишень. Увеличение отношения

ми пробками. Благодаря сохранению в аксиально-симметричной системе обобщённого момента импульса продольное удержание частиц в такой ловушке окажется очень жестким. Радиальные потери плазмы возможно ограничить мультипольными магнитными стенками, сформированными последовательностью кольцевых магнитов с переменной намагниченностью. Эффективность подобной магнитной системы была полтвержлена пои испытании прототипа довушки [3].

вырабатываемой реактором энергии к потребляе-Mbhis is a watermark for the trial version register, to get the full one! ции особенно важно для реакций с малым энер. лческим выходом. В ИЯФ СО АН была

рнерготическим выходом. В $U \overline{A} \Phi$ CO PAH была Benefits for registered users:

1.No watermark on the output documents.

2.Can operate scanned PDF files via OCR.

.3.No page quantity limitations for converted RDF-files. симмстричной магнитной ловушке. Необходимо хорошес удержание плазмы от истечения в отверстия для прохождения нейтрализуемого пучка,

иначе потребуется чрезвычайно производительная система откачки; потери плазмы на стенки менее существенны.

В ИЯФ СО РАН предложена магнитная ловушка со слабым продольным полем и инверсны-

Институт вычислительной математики

и математической геофизики

Институт вычислительных технологий

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

ются магнитные экраны. Торцевые магнитные

сборки совместно с кольцевыми экранами фор-

Remove Watermark Now

Динамика низкотемпературной многокомпонентной плазмы в ловушке описывается системой уравнений, состоящей из уравнения Больцмана для функций распределения ионов и электронов [4]

$$\frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \vec{r}} + \mathbf{F}_{\alpha} \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \vec{p}} = St\{f_{\alpha}\}, \quad \mathbf{F}_{\alpha} = q_{\alpha} \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c}[\mathbf{v}, \mathbf{B}]\right), (1)$$

и системой уравнений Максвелла с самосогласованными электромагнитными полями. Здесь индексом α обозначается сорт частиц (ионы и электроны), $St\{f_{\alpha}\}$ – функция, описывающая процессы ионизации и диссипации.

Для решения этой системы уравнений используется метод частиц в ячейках [5]. Чтобы точно описать физические эффекты, происходящие во всей ловушке, необходимо использовать до 10⁹— 10¹³ модельных частиц и 10⁶—10⁹ узлов сетки, что требует применения высокопроизводительных

Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск



Рис. 1. Схема магнитной системы ловушки-мишени и силовые линии магнитного поля.



Рис. 2. Плотность катодных электронов, $n_{ek} = 1.625 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

This is a watermark for the trial version, register to get the full one!

вычистетий. Применяя метод расщепления, решение уравнения Больцмана можно свети к ре-Benefits for registered users: сорректировке тра

1.No watermark on the output documents.

2.Can operate scanned PDF files via OCR

3. No page quantity limitations for converted PDF filesou числе: рассчитывается динамика катодных веду электро ов. На втором этапе производится расчет процесса ионизации, после чего ведётся расчёт динамики всей многокомпонентной плазмы.

Вероятность столкновения для *i*-й частицы, имеющей скорость v_i , за время Δt может быть рассчитана согласно работе [8]:

$$P_i = 1 - \exp(-\Delta s_i \sigma_T(\varepsilon_i) n_i(\mathbf{r}_i)), \qquad (2)$$

где $\Delta s_i = v_i \Delta t$, $\sigma_T(\varepsilon_i)$ – сечение столкновения, ε_i – кинетическая энергия *i*-й частицы, n_i – локальная плотность частиц соответствующего сорта. Таким образом, для катодных электронов с одинаковой энергией вероятность ионизации будет просто́ пропорциональна плотности частиц. За начальное распределение концентрации ионов можно взять концентрацию катодных электронов в некоторый момент времени, а распределение скоростей частиц может быть взято максвелловским с нулевым средним и дисперсией, соответствующей заданной температуре частиц.

ных части, в работе используется нараллельный алгорити с применением M PI на основе сме панной эйлерово-лагранжевой лекомпозиции [9].

Remove Watermark Now

ведущих российских суперкомпьютеров: – "Ломоносов" (МГУ), NKS-30T (ССКЦ СО РАН), кластера НГУ.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Динамики модельных частиц рассчитывали при следующих модельных параметрах: размер области 136 см × 9.96 см, сетка 6800 × 996 узлов, общее число модельных частиц 5 · 10⁹. Использовали следующие физические параметры: ток катодных электронов I = 150 А, температура плазмы T = 5 эВ, плотность электронов (ионов) $n_{_{e}} =$ $= 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Два последних параметра были получены в экспериментах с прототипом ловушки.

Важным требованием к выбранному способу ионизации плазмы является распространение катодных электронов вдоль всей длины ловушки, что необходимо для создания плазмы с требуемой протяженностью и степенью однородности. Рассчитанная плотность катодных электронов изоб-

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 460 № 5 2015



Рис. 3. Плотность ионов H^+ , $n_i = 572 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

ражена на рис. 2. Видно, что электроны распространяются вплоть до инверсных пробок. На основе полученной плотности катодных электронов был выполнен расчёт динамики ионов. Из рис. 3 видно, что ионы с достаточной степенью однородности заполняют практически всю мишень. Основной поток плазмы приходится на стенки, небольшая доля выходит в торцевые отверстия.

Результаты расчеты временной зависимости тока плазмы в торцевые отверстия приведены на рис. 4. Как видно, ток ионов со временем стабилизируется на уровне 0.5 А. Поток плазмы на стенки ловушки, согласно расчетам, достигает 9.5 А.

Для расчета плазменной ловушки-мишени с инверсными пробками в широкоалертурных торпользование современных суперкомпьютеров позволило рассчитать динамику плазмы, определить потоки плазмы на стенки ловушки и в отверстия. Расчеты показали, что образующаяся плазма имеет достаточную степень однородности и заполняет практически всю длину ловушки. Было найдено, что поток плазмы в торцевые отверстия достаточно мал, и необходимую откачку могут обеспечить турбомолекулярные насосы. Все это дает надежду на успешный запуск создаваемой установки.

Таким образом, с помощью построенной математической модели ещё до проведения лабораторных экспериментов удалось сделать некоторые важные оценки характеристик пламенной

This is a watermark for the trial version, register to get the full one!

да частиц в ячейках и методов Монте-Карло. Ис-

Benefits for registered users:

- 1.No watermark on the output documents.
- 2.Can operate scanned PDF files via OCR.
- 3.No page quantity limitations for converted PDF files.



Рис. 4. Ток ионов H^+ через магнитную пробку ловушки.

Авторы выражают благодарность В.А. Вшивзу и Г.И. Дудниковой за полезные обсуждения

Remove Watermark Now

C. 2300.

- *Димов Г.И., Емелев И.С. //* ЖТФ. 2014. Т. 84. С. 27.
- Власов А.А. Теория многих частиц. М.; Л., ГИТТЛ, 1950.
- 5. *Birdsall C.K.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1991. V. 19. № 2. P. 65–85.
- 6. Григорьев Ю.Н., Вшивков В.А., Федорук М.П. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках. Новосибирск; Изд-во СО РАН, 2004.
- 7. Вшивков В.А., Вшивков К.В., Дудникова Г.И. // Вычисл. технологии. 2001. Т. 6. № 2. С. 47–63.
- Vahedi V., Surendra M. // Comput. Phys. Commun. 1995. V. 87. P. 179–198.
- Берендеев Е.А., Иванов А.В., Лазарева Г.Г., Снытников А.В. // Вычисл. методы и программирование. 2013. Т. 14. С. 149–154.