

БИБЛИОТЕКА ПРОГРАММ «ВИРТУАЛЬНЫЙ ТОКАМАК» — МОДУЛЬ DINA-ORBITS

Р.Р. Хайрутдинов, В.Э. Лукаш

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Одной из актуальных задач физики токамаков является решение вопроса о принадлежности быстрой заряженной частицы, попавшей в плазму токамака, к группе запертых или пролётных частиц. В статье описывается один из модулей библиотеки «Виртуальный токамак» — стандартная программа, реализованная в модуле DINA-ORBITS для 3D-расчёта дрейфовой траектории быстрой заряженной частицы в плазме токамака.

Ключевые слова: токамак, моделирование равновесия плазмы, дрейфовая траектория, библиотека программ «Виртуальный токамак».

LIBRARY OF PROGRAMS «VIRTUAL TOKAMAK» — DINA-ORBITS MODULE

R.R. Khayrutdinov, V.E. Lukash

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

One of the urgent problems of the physics of tokamaks is the question of supplies fast charged particles in a tokamak plasma to a group of trapped or passing particles. In the present paper the standard code DINA-ORBITS for 3D modeling of the drift trajectory of fast charged particle in tokamak plasma is described.

Key words: tokamak, plasma equilibrium modeling, drift trajectory, library virtual tokamak.

ВВЕДЕНИЕ

Модуль DINA-ORBITS в рамках библиотеки «Виртуальный токамак» предназначен для анализа траектории движения быстрой заряженной частицы в плазме токамака, представленной равновесной магнитной конфигурацией в токамаке с воздушным индуктором в заданных магнитных полях. Постановка такой задачи является актуальной при решении вопроса о принадлежности быстрой заряженной частицы, попавшей в плазму токамака, к группе запертых или пролетных частиц и, соответственно, оценке эффективности обмена энергией такой частицы с частицами фоновой плазмы. В случае принадлежности быстрой частицы к группе пролётных частиц эта эффективность может быть достаточно низкой в связи с большой вероятностью выхода такой частицы за пределы плазмы. Справедливость подобного анализа мотивирована существенно большим временем взаимодействия быстрого иона с другими частицами по сравнению с характерным временем, с которым быстрый ион двигается вдоль своей траектории в плазме токамака. В качестве исследуемых частиц, например, могут рассматриваться инжектируемые в плазму токамака быстрые нейтралы, ионизирующиеся частицами фоновой плазмы. В модуле DINA-ORBITS реализовано решение дрейфового уравнения движения заряженной частицы в стационарном электрическом E и магнитном поле B токамака. Магнитное поле является суммой вакуумных полоидального и тороидального магнитных полей и магнитного поля плазмы, определяемого равновесной плазменной конфигурацией, зависящей как от профиля газокинетического давления в плазме, так и распределения электрического тока внутри неё. В модуле DINA-ORBITS равновесная плазменная конфигурация определяется с помощью включённой в этот модуль программы DINA-SVD [1]. Результатом решения дрейфового уравнения движения частицы являются интегральные кривые, называемые дрейфовыми траекториями [2]. Решаемая с помощью модуля DINA-ORBITS задача имеет самостоятельное значение. Использование же этого модуля в рамках кода ДИНА [3] позволяет получить самосогласованно с расчётом эволюции равновесной плазменной конфигурации в токамаке информацию о поведении быстрых частиц в плазме в произвольный момент времени. Такая информация необходима, например, для анализа геометрических и энергетических параметров пучка быстрых нейтралов, предполагаемых в качестве источника нагрева плазмы.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В модуле DINA-ORBITS реализована физическая модель, в основе которой лежит численное решение в трёхмерной геометрии дрейфового уравнения движения заряженной частицы в электромагнитном поле токамака [2]

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = u \frac{\mathbf{B}}{B} + \frac{[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]}{B^2} + \frac{m(w^2/2 + u^2)}{eB^3} [\mathbf{B} \times \nabla \mathbf{B}] + \frac{mu^2}{eB^2} \left\{ \text{rot} \mathbf{B} - \frac{\mathbf{B}}{B^2} (\mathbf{B} \text{rot} \mathbf{B}) \right\} \quad (1)$$

в цилиндрической системе координат (R, φ, Z) , показанной на рис. 1.

В уравнении (1) использованы следующие обозначения: $B = |\mathbf{B}|$; w и u — составляющие вектора скорости, соответственно, перпендикулярная и параллельная магнитному полю; $m = M * m_p$ — масса быстрой частицы; m_p — масса протона; M — атомный вес частицы; e — заряд электрона. Первый член в правой части уравнения (1) описывает движение вдоль силовой линии магнитного поля, остальные — дрейфовое движение, перпендикулярное магнитному полю. В качестве начального условия для решения уравнения (1) рассматриваются координаты точки на траектории инжекции быстрого нейтрала, в которой происходит его ионизация. В модели для модуля DINA-ORBITS пренебрегается вторым членом в правой части уравнения (1), содержащим электрическое поле. Это соответствует случаю стационарного плазменного тока, при котором его омическая составляющая полностью замещается током увлечения.

Результатом решения уравнения являются зависимости от времени координат $R(t)$, $\varphi(t)$, $Z(t)$ в результате одного полного оборота частицы по полоидальному обходу токамака. Алгоритм, принятый в модуле DINA-ORBITS, обеспечивает визуализацию траектории движения быстрой частицы в виде её проекции на плоскость полоидального сечения плазмы токамака в связи с осевой симметрией равновесной конфигурации плазмы токамака.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Алгоритм расчёта траектории движения заряженной частицы в плазме токамака включает в себя три основных этапа. На стадии первого этапа алгоритм реализует построение равновесной конфигурации плазмы токамака с использованием физической модели, принятой в модуле DINA-SVD, описание которой приведено в работе [1]. В соответствии с этой моделью решается уравнение равновесия плазмы в осесимметричном представлении с заданным выражением для профиля тороидального компонента плотности электрического тока в плазме $j_\varphi(\Psi)$ при условии прохождения границы плазмы через фиксированные в пространстве точки.

На стадии второго этапа алгоритм реализует решение уравнения движения заряженной частицы в плазме с заданной магнитной конфигурацией, построенной на стадии первого этапа. При этом в качестве начального условия задаются координаты первой точки траектории.

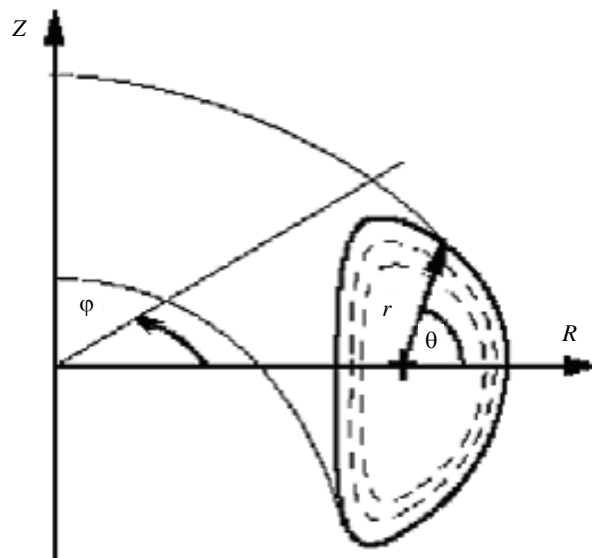


Рис. 1. Осесимметричная конфигурация токамака с цилиндрической (R, φ, Z) и тороидальной (r, θ, φ) системами координат: — — — — поверхности постоянного полоидального магнитного потока Ψ

На третьем этапе реализуется построение проекции, полученной на втором этапе траектории движения быстрой заряженной частицы в плазме, на плоскость полоидального сечения токамака.

На рис. 2 показаны примеры траекторий движения быстрой заряженной частицы для случая выхода пролётной частицы за пределы плазмы (рис. 2, а) и случая запертой частицы (рис. 2, б), которая в пределах одного полного оборота частицы по полоидальному обходу токамака не вылетает за пределы плазмы.

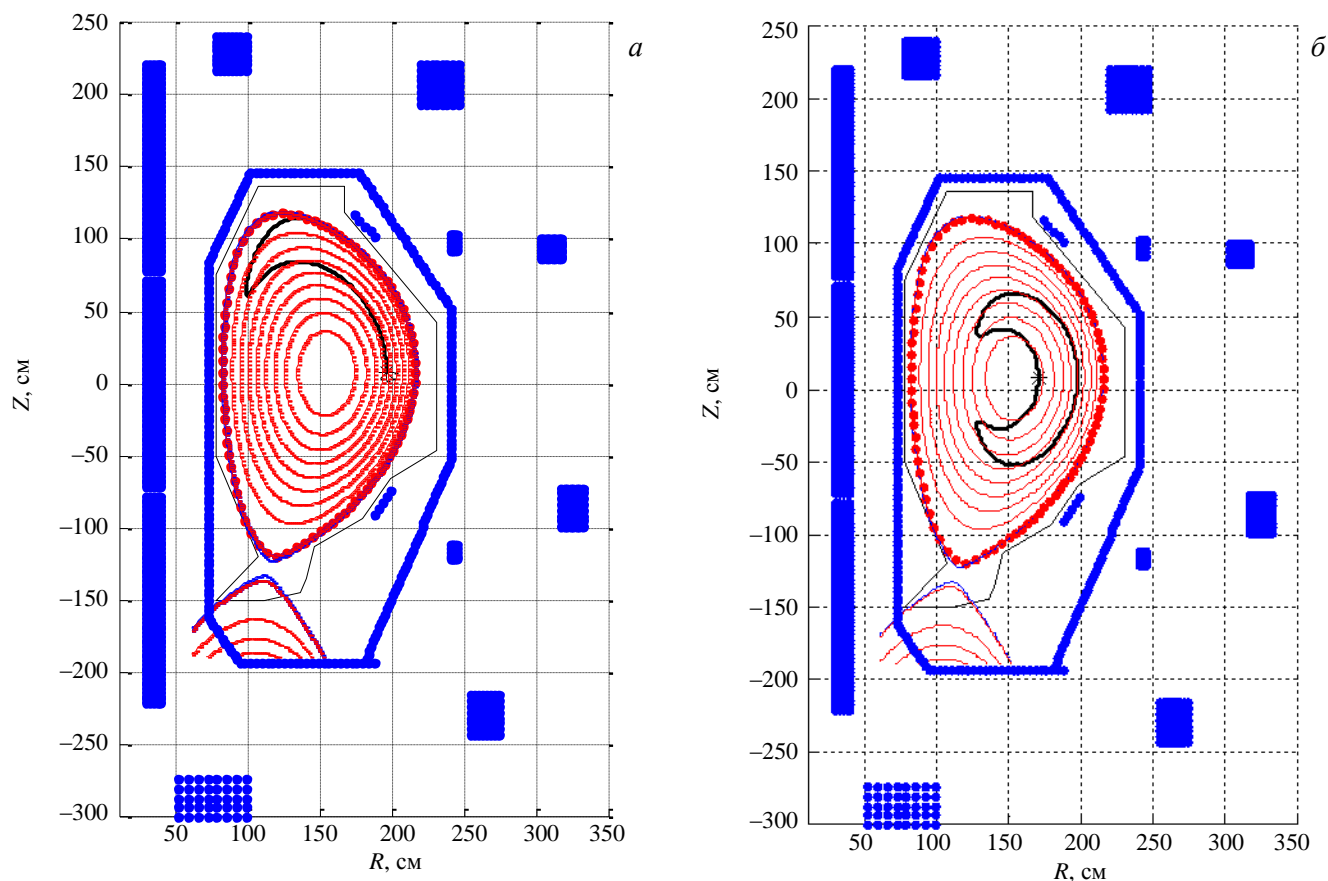


Рис. 2. Примеры траекторий движения быстрой заряженной частицы для случая выхода пролётной частицы за пределы плазмы (а) и случая запертой частицы (б): * — начальная точка траектории. Траектории построены для случая противоположного направления тороидального компонента магнитного поля по отношению к направлению плазменного тока

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ МОДУЛЯ DINA-ORBITS

Модуль DINA-ORBITS представлен в виде исполнительного (exe) файла для ОС Microsoft Windows. Активизация этого файла запускает Windows Menu (рис. 3), структура которого включает в себя визуализацию данных по двум категориям:

- исходные данные в виде таблиц;
- выходные данные графического материала.

В рамках первой категории пользователь имеет возможность задавать координаты катушек полоидальной магнитной системы токамака (change of PF coil coordinates), изменять координаты контрольных точек границы плазмы (control points change) с возможностью графического контроля их положения (control points graphics), задавать профиль плотности плазменного тока (plasma data), исходные величины токов в катушках полоидального магнитного поля (initial PF currents change), параметры быстрого нейтрала (Fast particle data): R , Z — координаты начальной точки траектории, угол вектора скорости по отношению к магнитному полю, энергия быстрой частицы, её атомная масса и знак, определяющий направление тороидального магнитного поля по отношению к направлению тороидального компонента плазменного тока. Знак «+» означает, что направления тороидальных компонентов плазменного тока и магнитного поля совпадают, знак «-» обозначает обратное направление.

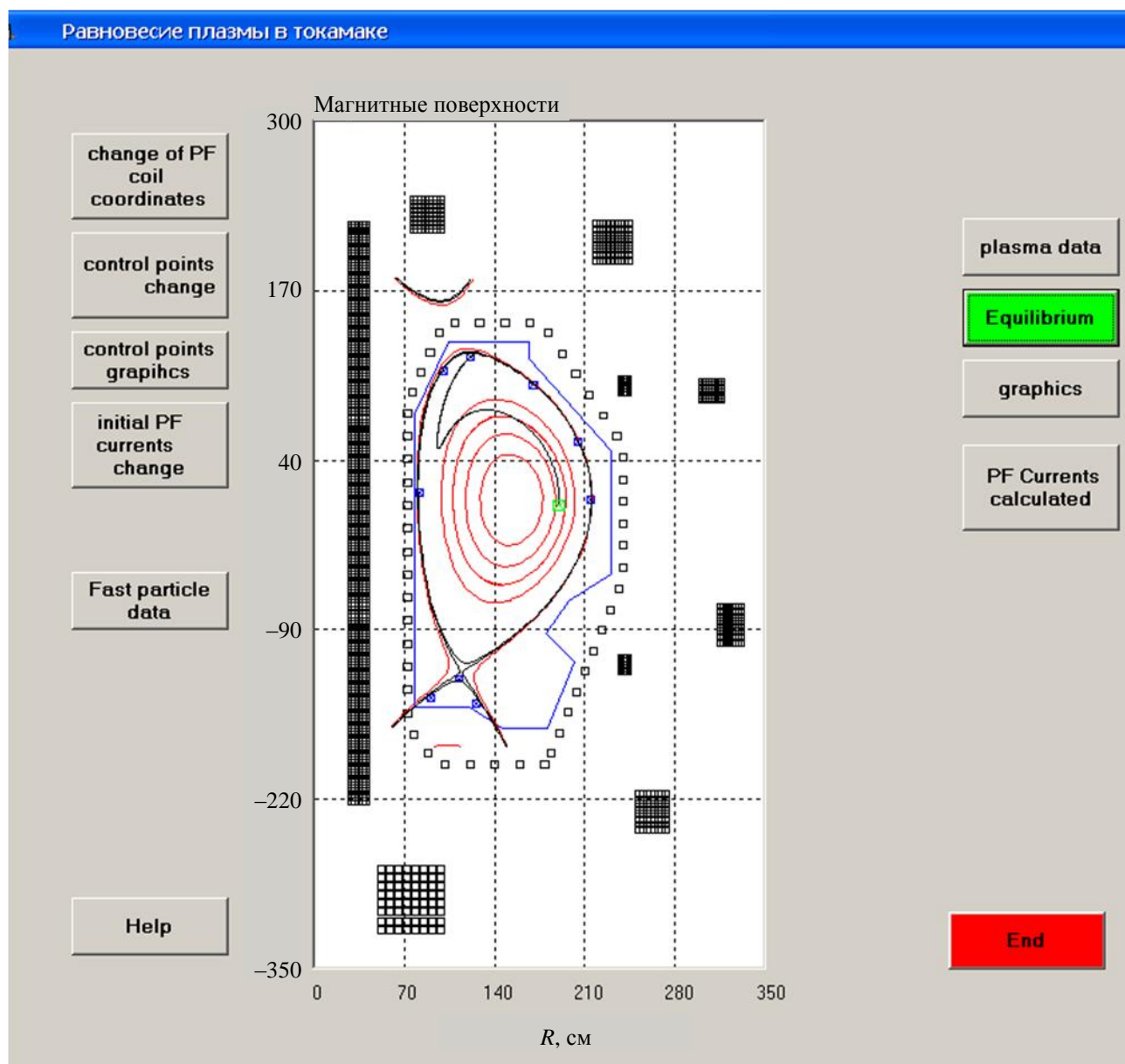


Рис. 3. Пример расчёта с помощью модуля DINA-ORBITS траектории заряженной частицы с энергией 300 кэВ в плазме модифицированного токамака T-15 (зелёным цветом на рисунке показана начальная точка траектории)

В качестве выходных данных модуль обеспечивает следующую полученную в результате расчёта информацию:

- равновесная плазменная конфигурация (Equilibrium);
- проекция на плоскость полоидального сечения токамака траектории движения быстрой заряженной частицы;
- end — выход из модуля.

Windows Menu имеет развитую структуру Help. В качестве примера на рис. 3 показан результат расчёта с помощью модуля DINA-ORBITS траектории частицы с энергией 300 кэВ в плазме модифицированного токамака T-15 [4].

Более подробные инструкции по работе с программой, а также её .exe-file можно найти на интернет-сайте leader.ic.msu.su/~fusion. Возможны также консультации с разработчиками программы с помощью e-mail.

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-07-00567-а.

REFERENCES

1. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Program for simulation of tokamak plasma MHD-Equilibrium DINA-SVD (Module of program library «Virtual tokamak») — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue 3, pp. 84—87 (in Russian).
2. **Dnestrovskiy Yu.N., Kostomarov D.P.** Mathematical simulation of plasma. — M.: Nauka (Science), 1982 (in Russian).
3. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse variable technique. — J. Comput. Physics, 1993, vol. 109, pp. 193—201.
4. **Azizov E.A. et al.** Status of project of engineering-physical tokamak. — In: 23rd IAEA Fusion Energy Conf. Daejeon, Republic of Korea, 11—16 October 2010, FTP/P6-01.

AUTHORS

Khayrutdinov R.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Khayrutdinov_RR@nrcki.ru

Lukash V.E. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Lukash_VT@nrcki.ru

Received 12 September 2012
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 4, pp. 92—96.