

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 движется 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.

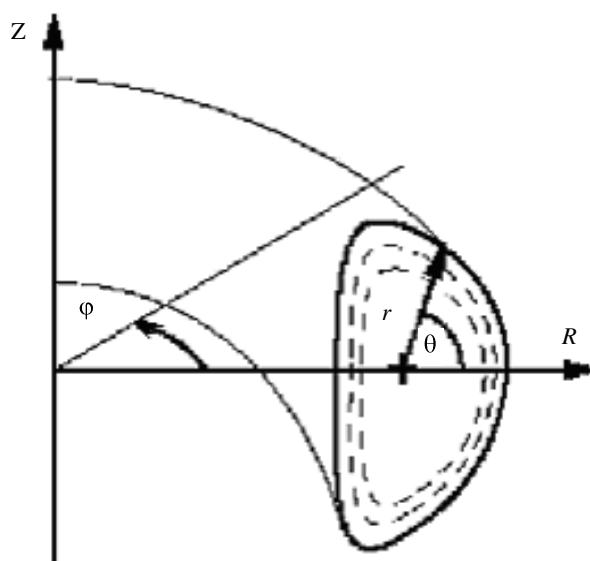


Рис. 1. Осесимметричная конфигурация токамака с цилиндрической (R, φ, Z) и тороидальной (r, θ, φ) системами координат: — — — — поверхности постоянного полоидального магнитного потока Ψ

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.

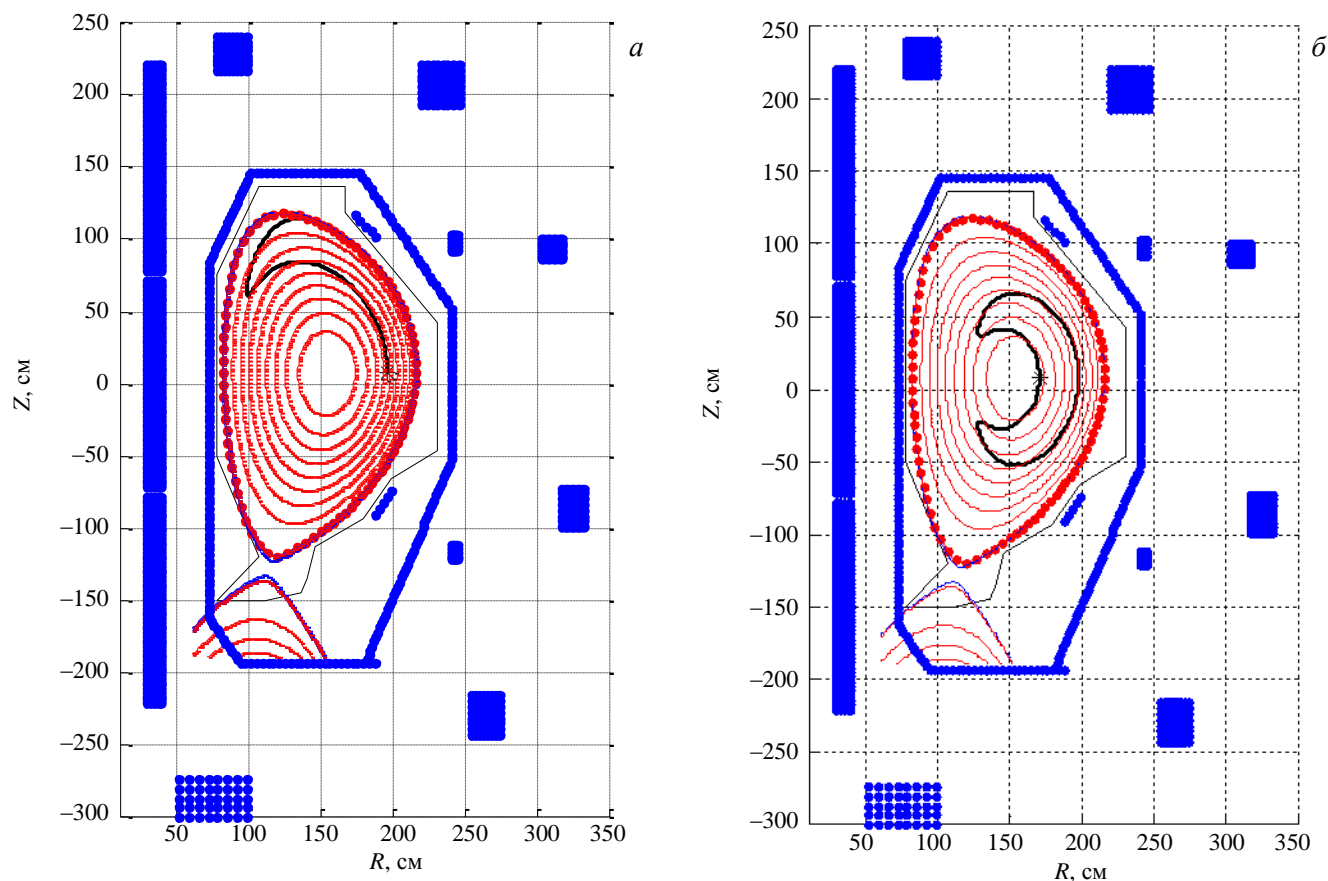


Рис. 2. Примеры траекторий движения быстрой заряженной частицы для случая выхода пролётной частицы за пределы плазмы (*а*) и случая запертой частицы (*б*): * — начальная точка траектории. Траектории построены для случая противоположного направления тороидального компонента магнитного поля по отношению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

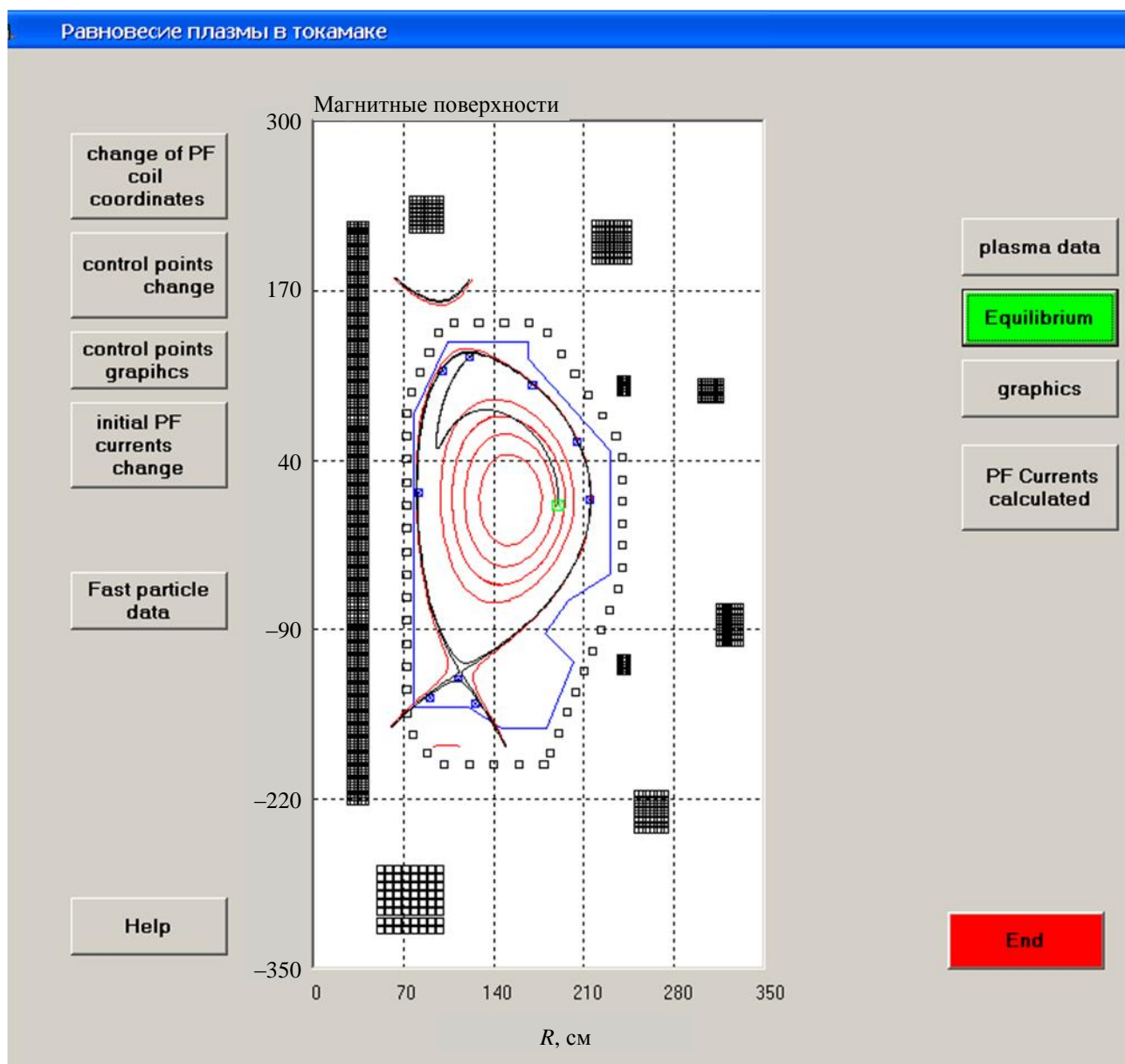


Рис. 3. Пример расчёта с помощью модуля DINA-ORBITS траектории заряженной частицы с энергией 300 кэВ в плазме модифицированного токамака T-15 (зелёным цветом на рисунке показана начальная точка траектории)

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

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

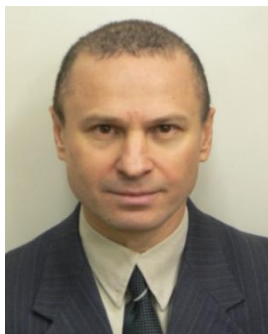
Windows Menu имеет развитую структуру Help. В качестве примера на рис. 3 показан результат расчёта с помощью модуля DINA-ORBITS траектории частицы с энергией 300 кэВ в плазме модифицированного токамака T-15 [4].

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хайрутдинов Р.Р., Лукаш В.Э.** Библиотека программ «Виртуальный токамак» — модуль DINA-SVD. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 3, с. 84—87.
2. **Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П.** Математическое моделирование плазмы. — М.: Наука, 1982.
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, p. 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.



Рустам Рашитович Хайрутдинов, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
khayrutd@mail.ru



Виктор Эммануилович Лукаш, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
lukash@nfi.kiae.ru

Статья поступила в редакцию 12 сентября 2012 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 4, с. 92—96.