

Следующие работы продолжают серию публикаций под общим названием *БИБЛИОТЕКА ПРОГРАММ «ВИРТУАЛЬНЫЙ ТОКАМАК»* (грант РФФИ № 08-07-00182). Авторы статей являются разработчиками входящих в библиотеку программ. Описание структуры библиотеки, входящих в неё программ и инструкции по работе с ними можно найти на сайте [leader.ic.msu.su/~fusion](http://leader.ic.msu.su/~fusion). Возможны также консультации с авторами при помощи e-mail.

УДК 533.9:519.688

## МОДУЛЬ «DINA-EqDsk»

### (МОДУЛЬ БИБЛИОТЕКИ ПРОГРАММ «ВИРТУАЛЬНЫЙ ТОКАМАК»)

*В.Э. Лукаш (РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия), Р.Р. Хайрутдинов (ТРИНИТИ, МО, Россия)*

В статье описывается один из модулей библиотеки «Виртуальный токамак» — стандартная программа «DINA-EqDsk» для расчёта магнитных полей и силовых нагрузок в полоидальных катушках токамака при условии использования для определения равновесия плазмы международного стандарта «EqDsk.file».

**Ключевые слова:** токамак, равновесие плазмы, магнитные поля.

«DINA-EqDsk» MODULE (MODULE OF PROGRAM LIBRARY «VIRTUAL TOKAMAK»). V.E. LUKASH, R.R. KHAYRUTDINOV. In the present paper the standard «Dina-EqDsk» code for calculation of magnetic fields and forces in poloidal field tokamak coils is described. This code is using an international standard «EqDsk.file» for the plasma equilibrium determination and is one of the modules of the library «The Virtual Tokamak».

**Key words:** tokamak, the plasma equilibrium, magnetic fields.

## ВВЕДЕНИЕ

Модуль «DINA-EqDsk» в рамках библиотеки «Виртуальный токамак» предназначен для индивидуального расчёта значений магнитного поля на поверхности каждой из катушек полоидальной магнитной системы (ПМС) и приложенных к каждой катушке электромагнитных сил применительно к равновесию плазмы токамака, полученному с использованием международного стандарта «EqDsk.file». Необходимость в таком стандарте была продиктована в первую очередь началом деятельности международного физического сообщества в направлении создания термоядерного токамака-реактора ИТЭР. Данный стандарт был разработан группой EFIT [1] для возможности воспроизведения рассчитанного с помощью какого-либо плазмозфизического кода равновесия плазмы токамака на прямоугольной расчётной сетке. Стандарт «EqDsk.file» поддерживается большинством используемых в мире плазмозфизических кодов, работающих в предиктивной моде, таких, например, как CORSICA [2], TSC [3] — в США, DINA [4], PET [5], ASTRA [6] — в России, CRONOS [7] — в Европе. Кроме того, в этом стандарте записывается цифровая информация о равновесии плазмы в токамаке, восстановленном по экспериментальным данным магнитной диагностики с помощью восстановительных кодов EFIT [1], восстановительной моды кода. Стандартный файл «EqDsk.file» включает в себя данные о границе плазмы, распределении магнитных поверхностей и профиле тока внутри неё.

Модуль «DINA-EqDsk» реализован в составе плазмозфизического кода DINA и нужен для взаимодействия с другими численными кодами. Включение в состав функциональных возможностей модуля определения магнитных полей и электромагнитных усилий на катушках ПМС позволяет использовать этот модуль в качестве самостоятельного расчётного блока. Использование же этого модуля в рамках кода ДИНА позволяет получить начальные условия для задачи проектирования конструкции ПМС токамака. Применительно к условиям работы токамака-реактора ИТЭР, для анализа сценариев разрядов в котором используется код ДИНА [8], получение таких условий особенно важно в связи с наличием строгих ограничений на механические параметры конструкции полоидальной магнитной системы ИТЭР [9]. Кроме того, модуль «DINA-EqDsk» имеет возможность воспроизводить конфигурацию плазмы и, соответственно, величины магнитных полей и электромагнитных нагрузок на катушках полоидального магнитного поля в случае представления плазмы произвольным набором элементов с током. Использование модуля «DINA-EqDsk» производится наряду с модулем «DINA-SVD» [10] в составе плазмозфизического кода ДИНА.

В работе даны описание формата «EqDsk.file», примеры использования модуля «DINA-EqDsk» на основе международного стандарта «EqDsk.file» и произвольного набора элементов с током, а также описание структуры модуля «DINA-EqDsk».

### ОПИСАНИЕ СТАНДАРТА «EqDsk.file»

Стандартный файл «EqDsk.file» включает в себя следующую информацию:

- $R, Z$  — координаты прямоугольной расчётной области;
- величина вакуумного тороидального магнитного поля в заданной точке  $R_0$ ;
- $R, Z$  — координаты магнитной оси;
- $R, Z$  — координаты границы плазмы;
- величина тороидального компонента плазменного тока;
- значения полоидального магнитного потока в центре плазмы и на её границе;
- распределение полоидального электрического тока в плазме;
- распределение газокINETического давления в плазме;
- распределение магнитного запаса устойчивости в плазме;
- распределение полоидального магнитного потока в узлах прямоугольной расчётной сетки.

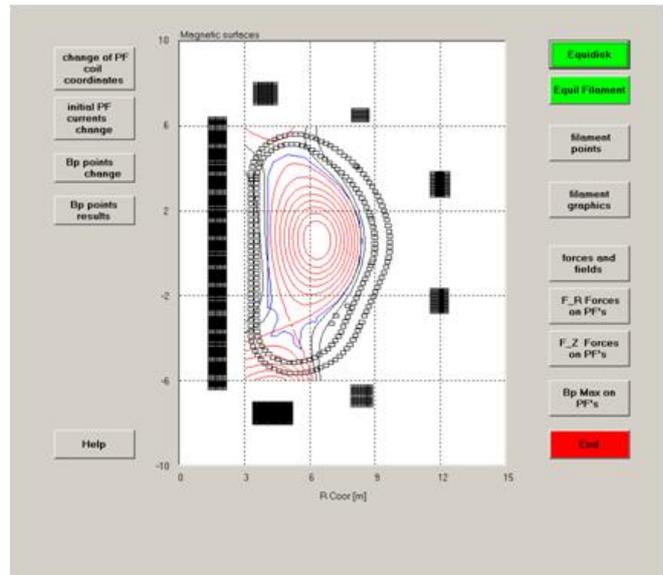
Анализ этой информации показывает, что её вполне достаточно для использования в качестве начальных условий при решении двух основных задач. Во-первых, задачи транспорта энергии и полоидального магнитного потока в плазме токамака — она реализуется с помощью кодов, работающих в моде с фиксированной границей, например, ASTRA, CRONOS, DINA. Во-вторых, задачи эволюции плазмы токамака со свободной границей при условии, что известен набор токов в катушках ПМС — она реализуется с помощью таких кодов, как DINA, TSC, CORSICA. В коде DINA эта информация в модуле «DINA-EqDsk» используется для оценки магнитных полей и электромагнитных усилий на катушках полоидального магнитного поля.

### СТРУКТУРА МОДУЛЯ DINA-EqDsk

Модуль «DINA-EqDsk» представлен в виде исполнительного (exe) файла для ОС Microsoft Windows, активизация которого запускает Windows Menu (см. рисунок). В своей основе оно похоже на Windows Menu для модуля «DINA-SVD» [10], которое позволяет осуществлять визуализацию данных по двум категориям:

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

Как было сказано, в отличие от модуля «DINA-SVD» использование модуля «DINA-EqDsk» предполагает две возможности построения равновесной плазменной конфигурации. В рамках первой возможности (использование файла «EqDsk.file») задание координат катушек полоидальной магнитной системы (change of PF coil coordinates) и значений токов в катушках (initial PF currents change) в модуле «DINA-EqDsk» необходимо для определения магнитных полей и электромагнитных нагрузок в этих катушках (forces and fields). Визуализация равновесия при этом достигается командой «Equidisk». Параметры же ПМС необходимы для реализации второй возможности получения равновесия плазмы — представление плазмы произвольным набором элементов с



Пример реализации с помощью модуля «DINA-EqDsk» равновесия плазмы, заданного файлом «EqDsk.file»

Пример реализации с помощью модуля «DINA-EqDsk» равновесия плазмы, заданного файлом «EqDsk.file»

током (filament points) с просмотром их расположения (filament graphics). Визуализация такого равновесия осуществляется командой «Equil Filament».

Таким образом, в качестве выходных данных модуль обеспечивает следующую информацию:

- равновесная плазменная конфигурация (Equidisk или Equil Filament);
- компоненты электромагнитной силы, действующей на катушки полоидальной магнитной системы (F\_R Forces on PF's и F\_Z Forces on PF's);
- максимальные величины полоидального магнитного поля, действующего на катушки PF ( $B_p$  Max on PF's);
- компоненты магнитного поля в произвольно выбранной точке (bp\_point);
- end — выход из модуля.



Виктор Эммануилович Лукаш, ведущий н.с., д.ф.-м.н.  
lukash@nfi.kiae.ru

В связи с тем, что библиотека компьютерных программ «Виртуальный токамак» предполагает интеграцию с основными плазмозфизическими кодами, принятыми международным физическим сообществом для моделирования эволюции равновесной конфигурации плазмы токамака, использование стандарта «EqDsk.file» в составе этой библиотеки представляется обязательным.

Более подробные инструкции по работе с программой «DINA-EqDsk», а также ее .exe-file можно найти на интернет-сайте [leader.ic.msu.su/~fusion](http://leader.ic.msu.su/~fusion). Возможны также консультации с разработчиками программы при помощи e-mail.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-07-00182.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lao L.L., Jensen T.N. et al.** Magnetohydrodynamic equilibria of attached plasmas after loss of vertical stability in elongated tokamaks. — Nucl. Fusion, 1991, vol. 31, p. 1909.
2. **Croatinger J.A. et al.** CORSICA: a Comprehensive Simulation of Toroidal Magnetic Fusion Devices. Report UCRL-ID-126284, Lawrence Livermore National Laboratory, CA, 1997.
3. **Jardin S.C., Pomphrey N., DeLucia J.** Dynamic modeling of transport and positional control of tokamaks. — J. Comput. Physics, 1986, vol. 66, p. 481.
4. **Khayrutdinov R.R., V.E. Lukash.** 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.
5. **Galkin S.A., Ivanov A.A., Medvedev S.Yu., Poshekhonov Yu.Yu.** — Nucl. Fusion, 1997, vol. 37, p. 1455.
6. **Pereversev G.V., Yushmanov P.N., Dnestrovskii A.Yu., Polevoi A.R., Tarasjan K.N., Zakharov L.E.** ASTRA an Automatic System for Transport Analysis in a tokamak. IPP 5/42, August 1991, Garching, Germany.
7. **Basiuk V. et al.** — Nucl. Fusion, 2003, vol. 43, p. 822.
8. **Lukash V.E., Gribov Y., Kavin A., Khayrutdinov R., Cavinato M.** Simulations of ITER scenarios. — Plasma Devices and Operations, 2005, vol. 13, № 2, p. 143—156.
9. **Gribov Y.** Engineering Limits and Other Data Related to Analysis of ITER Plasma Equilibria, Poloidal Field Scenarios and Plasma Control. ITER\_D\_247JZD, 2006.
10. **Хайрутдинов Р.Р., Лукаш В.Э.** Библиотека программ «Виртуальный токамак» — модуль «DINA-SVD» — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 3, с. 84—87.

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2009 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 64—66.