

Данная работа продолжает 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 нее программ и инструкции по работе с ними можно найти на сайте leader.ic.msu.su/~fusion. Возможны также консультации с авторами при помощи e-mail.

УДК 533.9:519.688

**КОД ДЛЯ РАСЧЕТА МГД-РАВНОВЕСИЯ ТОКАМЕQ
(МОДУЛЬ БИБЛИОТЕКИ ПРОГРАММ «ВИРТУАЛЬНЫЙ
ТОКАМАК»)**

Д.Ю. Сычугов (МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет ВМиК)

В статье приводится краткое описание стандартного кода ТОКАМЕQ (ТОКАМАk EQuilibrium) для расчета МГД-равновесия плазменного шнура в установках токамак. Данный код является одним из модулей библиотеки «Виртуальный Токамак».

Ключевые слова: библиотека стандартных программ, токамак, МГД-равновесие.

THE CODE TOKAMEQ FOR SIMULATION MHD-EQUILIBRIUM (MODULE OF PROGRAM LIBRARY «VIRTUAL TOKAMAK»). D.Yu. SICSHUGOV. In the present paper the standard MHD equilibrium code TOKAMEQ (TOKAMak EQuilibrium) is described. This code is one of the modules of the library The Virtual Tokamak.

Key words: the Library of standard codes, tokamak, MHD equilibrium.

ВВЕДЕНИЕ

Код TOKAMEQ [1] представляет собой высокоэффективный код, ориентированный на физиков, проектировщиков, экспериментаторов и инженеров, работающих над проблемой УТС на основе установок токамак. Он обладает:

- высокими скоростными характеристиками (время расчета типичного варианта равновесия на ПЭВМ с процессором Intel Pentium IV (2200 МГц) составляет 2—5 с);
- высокоэффективным текстово-графическим редактором данных, позволяющим вести проектирование установки и интерпретацию эксперимента в интерактивном режиме;
- встроенными средствами визуализации;
- удобным интерфейсом пользователя;
- средствами обмена информацией с другими кодами;
- средствами самодокументации (помощь и встроенные описания кода и инструкции по его эксплуатации).

— средствами поддержки диалога на русском и английском языках.

Для программной поддержки кода не требуется никаких специальных программных средств. Операционной средой для работы с описываемой версией кода является MSWindows.

Данный код неоднократно применялся для разработки проектов установок токамак и для интерпретации результатов эксперимента [3—5]. С его помощью возможно как решение прямой задачи равновесия, так и квазиобратной задачи, т.е. расчет МГД-равновесия с заданными геометрическими характеристиками шнура. Последнее обстоятельство делает особенно удобным применение кода при решении задач проектирования.

В данной работе приводится описание версии кода 21.8.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАВНОВЕСИЯ

Постановка задачи включает в себя двумерное уравнение Грэда—Шафранова [2] в неограниченной области, с условиями регулярности на главной оси тора и на бесконечности

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{r} \Delta^* \psi = \gamma \begin{cases} j_\phi(\psi, r) & \text{при } \psi > \psi_p \text{ (внутри плазмы);} \\ \sum_{k=1}^N I_k \delta(r - r_k, z - z_k) & \text{при } \psi < \psi_p \text{ (вне плазмы);} \end{cases} \\ \psi(0, z) = 0; \\ \lim_{r, z \rightarrow \infty} \psi(r, z) = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь $\Delta^* \equiv r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$; $\gamma = 0,8\pi^2$ — размерный множитель, при котором расстояние измеряется в метрах, ток в МА, магнитное поле в Тл, магнитный поток в В·с (веберах); (r, ϕ, z) — система цилиндрических координат с осью z , направленной вдоль главной оси тора; ψ — величина полоидального магнитного потока; компоненты полоидального магнитного поля выражаются через функцию ψ следующим образом:

$$B_r = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad B_z = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi}{\partial r};$$

r_k, z_k, I_k — координаты внешних проводников с током и величины токов (проводники могут считаться как бесконечно тонкими, так и имеющими конечные размеры); ψ_p — значение магнитного потока на границе плазмы. Сама граница плазмы изначально неизвестна и находится в процессе вычислений.

Функция распределения плазменного тока предполагается заданной в виде

$$j_{\varphi}(r, \psi - \psi_p) = r \frac{dp}{d\psi} + I(\psi - \psi_p) I'(\psi - \psi_p) / r \equiv \lambda \left\{ \beta r (\psi - \psi_p)^{\gamma_1} + (1 - \beta) \frac{\hat{R}^2}{r} (\psi - \psi_p)^{\gamma_2} \right\} \equiv \lambda f(r, \psi - \psi_p), \quad (2)$$

где β — «бета токовая»; $\hat{R}^2 = \frac{\iint_{\Omega_p} r dr dz}{\iint_{\Omega_p} \frac{dr dz}{r}}$ — среднее по шнуру значение r^2 ; γ_1, γ_2 — показатели распределения плотности тока; $f(r, \psi - \psi_p)$ — краткая запись выражения в фигурных скобках; $p(\psi)$ — распределение давления по магнитным поверхностям; $I(\psi)$ — полоидальный ток; множитель λ вычисляется в ходе решения, исходя из заданной наперед величины полного тока по сечению шнура I_{pl} :

$$\lambda \iint_{\Omega_p} f(r, \psi - \psi_p) dr dz = I_{pl}. \quad (3)$$

Рассматриваются два варианта постановки задачи (1).

Постановка прямой задачи. Цель задачи — при заданных r_k, z_k, I_k, ψ_p и параметрах, описывающих $j_{\varphi}(r, \psi)$, найти распределение магнитных поверхностей плазменного шнура. Очевидно, что решение существует не для всех заданных параметров.

Постановка квазиобратной задачи. Пусть равновесное состояние плазменного шнура описывается большим радиусом R_{pl} , малым радиусом a_{pl} , z — координатой магнитной оси z_{pl} , эллиптичностью ε . Тогда постановка квазиобратной задачи равновесия будет иметь следующий вид: для заданных значений координат полоидальных токов r_k, z_k и параметров, описывающих $j_{\varphi}(r, \psi)$, найти величины полоидальных токов I_k так, чтобы плазма имела требуемые значения $R_{pl}, a_{pl}, z_{pl}, \varepsilon$. Будем называть такую задачу квазиобратной, так как ищется равновесие лишь с небольшим числом заданных параметров.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Перед началом расчета необходимо задать:

- величину удерживающих токов при помощи графического или/и текстового редакторов;
- границы счетной области, предположительно содержащей в себе плазменный шнур и не содержащей внешних токов (аналогично);
- начальное приближение потока ψ при помощи аналитической формулы либо считать из файла данные уже рассчитанного ранее МГД-равновесия.

Численный метод решения задачи (1) основан на вложенном тройном цикле.

Для вычисления значений плотности плазменного тока и магнитного потока внутри счетной области требуется знать магнитный поток на ее границе. Предполагается, что счетная область представляет собой прямоугольник со сторонами, параллельными осям r и z .

В ходе вычислений магнитный поток ищется в виде суммы потоков, создаваемых плазмой и внешними проводниками.

Для нахождения в начале каждой внешней итерации по j магнитного потока на границе счетной области Ω применяется формула, следующая из (1):

$$\psi^{j+1}(r, z) \Big|_{\partial\Omega} = \gamma \sum_{k=1}^N I_k^j G(r, z, r_k, z_k) + \lambda^j \gamma \iint_{\Omega_p} G(r, z, r_p, z_p) f_{\varphi}(r, \psi^j - \psi_p) dS_p, \quad (4)$$

где функция $G(r, z, r_p, z_p)$ — поток в точке (r, z) от кольцевого тока, расположенного в точке (r_k, z_k) или, иными словами, функция источника для оператора Δ^* .

Формула (4) позволяет преобразовать задачу для неограниченной области (1) к задаче внутри счетной области:

Кроме того, в графическом режиме возможно изменение границ счетной области.

Для просмотра полей в сечении плазменного шнура возможно построение графиков зависимости плазменного тока $j_\phi(r, z)$ и магнитного потока $\psi(r, z)$ от координаты r при фиксированном значении z (либо наоборот).

Модуль TOKAMEQ обладает встроенной подсистемой вызова документации и подсказок. Более подробное описание модуля и инструкции по работе с ним размещены на сайте [http:// leader.ic.msu.su/~fusion](http://leader.ic.msu.su/~fusion). Возможны консультации с разработчиками программы по электронной почте.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-07-00182

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский В.А., Гасилов Н.А., Днестровский Ю.Н., Кузнецов А.Б., Сычугов Д.Ю., Цаун С.В. TOKAMEQ — код для расчета равновесия плазмы в Токамаке. — М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2001.
2. Шафранов В.Д. Равновесие плазмы в магнитном поле. — В кн.: Вопросы теории плазмы. Т. 2. — М.: Госатомиздат, 1963. 92 с.
3. Какурин А.М., Леонов В.М., Ноткин Г.Е., Хвостенко П.П., Цаун С.В., Бондарчук Э.Н., Васильев В.И., Минеев А.Б., Максимова И.И., Амелин В.В., Гасилов Н.А., Сычугов Д.Ю. Основные сценарии разряда токамака T-15M. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 4, с. 53.
4. Wilson H.R., Voss G.M., Akers R.J., Appel L., Christiansen J.P., Dnestrovskij A., Keating O., Hender T.C., Hole M.J., Huysmans G., Kirk A., Knight P.J., Loughlin M., McClemens K.G., O'Brien M.R., Sychugov D.Yu., Valovic M. The physics basis of a spherical tokamak components test facility. — In: 31st EPS Conf. on Plasma Physics. London, 28 June — 2 July, ECA, 2004, vol. 28G, P-4.196.
5. Dnestrovskij A., Voss G., Sychugov D., Lukash V., Khayrutdinov R. Non-inductive current ramp up scenario and steady state regime optimization for component test facility. — In: 34th EPS Conf. on Plasma Phys. Warsaw, 2007, P.-1.101.

Статья поступила в редакцию 3 июня 2008 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 85—89.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИАЭ им. И.В. КУРЧАТОВА В 1965—1968 гг.

Обзор¹

М.К. Романовский

КОНФЕРЕНЦИЯ В НОВОСИБИРСКЕ (1—7 АВГУСТА 1968 г.)

Это была третья Международная конференция по физике плазмы и управляемому ядерному синтезу (первая в 1962 г. в г. Зальцбурге (Австрия), вторая в 1965 г. в Калэме (Англия)). В трудах конференции названы фамилии 385 участников из 20 стран, 12 участников от Евратома и один представитель Интернационального союза чистой и прикладной физики (в обзоре [1] указано «700 делегатов и гостей...»). Опубликованы 125 докладов (из них 3 обзорных) и короткое выступление Г.И. Будкера — в то время директора ИЯФ СО АН СССР, на территории которого проходила конференция. Двадцать докладов по два объединены в репортерские. Доклады были от 10 стран. СССР и США представили более чем по 30 докладов, Англия и ФРГ — более чем по 10, Франция — 10, остальные страны — от шести до одного. СССР не дал ни одного доклада по мультипольным торам и θ -пинчам, но много (8) по ВЧ-нагреву, удержанию и стабилизации. США не дал докладов по мультипольным торам, но дал много по стеллараторам (6) и в секции, объединившей теорию торов, лазерный нагрев и Астрон (6). Правда, само формирование по секциям не кажется совсем удачным, но все же отражает направленность интересов физиков. Токамаками занимались только в отделе Л.А. Арцимовича в ИАЭ, а полученные на них результаты были настолько лучше, чем на любой другой системе, что они были восприняты с большим недоверием.

¹ Продолжение. Начало обзора в ВАНТе. Сер. Термоядерный синтез, 2002—2007 гг., 2008 г., вып. 1, 3.