

УДК 533.9: 519.688

НОВАЯ ВЕРСИЯ КОДА «ТОКАМЕQ» ДЛЯ РАСЧЁТА КОНФИГУРАЦИЙ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ ТОКА И С РАСШИРЕННЫМ ДИВЕРТОРОМ (МОДУЛЬ БИБЛИОТЕКИ ПРОГРАММ «ВИРТУАЛЬНЫЙ ТОКАМАК»)

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

В статье приводится описание новой версии стандартного кода «ТОКАМЕQ» (ТОКАМаk EQUilibrium) для расчёта МГД-равновесия плазменного шнура в установках токамак. Данный код является одним из модулей библиотеки программ «Виртуальный токамак». Новая версия кода позволяет проводить вычисления с любым профилем тока в плазме, а также вносить проводники с внешними токами в счётную область. В результате проведённых усовершенствований стал возможен расчёт конструкций с расширенным дивертором.

Ключевые слова: Библиотека программ «Виртуальный токамак», МГД равновесие, новая версия кода ТОКАМЕQ, произвольный профиль плотности тока, конфигурации с расширенным дивертором.

A NEW VERSION OF THE TOKAMEQ CODE FOR SIMULATION MHD EQUILIBRIUM CONFIGURATIONS WITH ANY PROFILE OF CURRENT DENSITY AND EXPANDED DIVERTOR (MODULE OF PROGRAM LIBRARY «VIRTUAL TOKAMAK»). D.Yu. SICSHUGOV. In the present paper the new version of standard MHD equilibrium code TOKAMEQ (TOKAMak EQUilibrium) is described. This code is one of the modules of the library The Virtual Tokamak. The new version of the code TOKAMEQ provides to obtain an equilibrium with any profile of current density. Also it is possible to put external coils into the work domain. After these improvements it becomes possible to simulate MHD equilibrium with expanded divertor.

Key words: The library of standard codes The virtual tokamak, MHD equilibrium, a new version of the code TOKAMEQ, configurations with any profile of current density and with expanded divertor.

ВВЕДЕНИЕ

Код для расчета МГД-равновесия ТОКАМЕQ [1, 2] является одним из основных модулей библиотеки «Виртуальный токамак». Код неоднократно применялся для проектирования токамаков и интерпретации результатов экспериментов [4—7].

В данной работе приводится описание новой версии кода, номер 21.15, необходимость создания которой стала ясна в ходе работ над проектом токамака СТФ [5—7] по следующим причинам. Во-первых, при неиндукционной поддержке тока в плазме (так называемый current drive) профиль тока становится немонотонным, с провалом в центре шнура, и функцию его распределения становится трудно аппроксимировать аналитически. Во-вторых, инженерные расчёты показали, что в подобных конструкциях крайне сложно поместить устройство для вывода частиц из плазмы (дивертор) неподалёку от вакуумной камеры, поскольку возможно прожигание горячими частицами его пластин, а также из-за недостатка места. По-видимому, данное устройство придётся помещать на значительном удалении от плазмы (так называемый «расширенный дивертор»). С вычислительной точки зрения это означает необходимость расчёта равновесных магнитных полей на большом расстоянии от плазмы, т.е. расширения счётной области и, как следствие, попадание внутрь неё внешних токов (точечных источников). Последнее обстоятельство приходится учитывать при вычислениях на сетке.

ОПИСАНИЕ МОДИФИКАЦИЙ КОДА

Постановка задач, решаемых с помощью как старой, так и новой версии кодов, приведена в [1, 2]. Она включает в себя двумерное уравнение Грэда—Шафранова [3] в неограниченной области, с условиями регулярности на главной оси тора и бесконечности. В новую версию кода внесены две основные модификации.

Расчёт равновесия с произвольным профилем тока. Первая модификация касается задания плотности тока. В старой версии кода [1, 2] плотность тока, протекающего по плазме, задавалась трехпараметрической формулой

$$j_{\varphi}(r, \psi - \psi_p) = \lambda(r\beta(\psi - \psi_p)^{\gamma_1} + \hat{R}^2 \cdot (1 - \beta)^{\gamma_2} r). \quad (1)$$

Здесь ψ — полоидальный поток магнитного поля, ψ_p — значение ψ на границе плазмы (граница может быть сепаратрисой), параметры $\gamma_1, \gamma_2, \beta$ описывают степень «крутизны» профиля тока и значение полоидального β ,

\hat{R}^2 — среднее по сечению плазменного шнура Ω значение r^2 : $\hat{R}^2 = \frac{\iint_{\Omega} r dr dz}{\iint_{\Omega} r^{-1} dr dz}$, множитель λ в ходе

решения подбирается так, чтобы полный ток по сечению шнура был равен заданной величине I_{pl} .

Как оказалось, формула (1) не может адекватно описать равновесия, у которых ток в плазме поддерживается неиндукционным способом. Для таких конфигураций характерным является провал плотности тока на магнитной оси, т. е. немонотонная по переменной ψ зависимость $j_{\phi}(r, \psi)$. Увеличение числа параметров и замена формулы (1) может улучшить дело в каком-то частном случае, но не решит проблемы в целом.

В новой версии кода плотность тока вычисляется как функция метки магнитного потока a (величина a называется также нормализованным потоком)

$$j_{\phi}(r, a) = \lambda(rA(a) + B(a)/r); \quad a = (\psi - \psi_p) / (\psi_{max} - \psi_p), \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (2)$$

Здесь ψ_{max} — значение потока ψ на магнитной оси; $A(a) = dp/da$, $B(a) = I(a)I'(a)$. Функции $A(a)$ и $B(a)$ задаются в табличной форме во внешнем файле данных, для вычисления их значений при произвольном a применяется линейная интерполяция.

Табличная форма задания $A(a)$ и $B(a)$ позволяет новой версии кода ТОКАМЕQ вычислять равновесие с любой плотностью тока, взятой, например, из расчетов по транспортным кодам. Для практических вычислений достаточно число узлов интерполяции $N \geq 200$.

На рис. 1 приведен сравнение профилей тока j_{ϕ} вдоль экваториального сечения плазменного шнура, рассчитанных для проекта токамака STF [7]. Профиль тока рассчитывался с помощью транспортного кода, принадлежащего институту УКАЕА (Великобритания), и затем воспроизводился с помощью описанной процедуры кодом ТОКАМЕQ. Хорошее соответствие результатов позволяет говорить об удачности идеи табличного задания плотности тока и о том, что новая версия кода ТОКАМЕQ может успешно работать во взаимодействии с другими модулями.

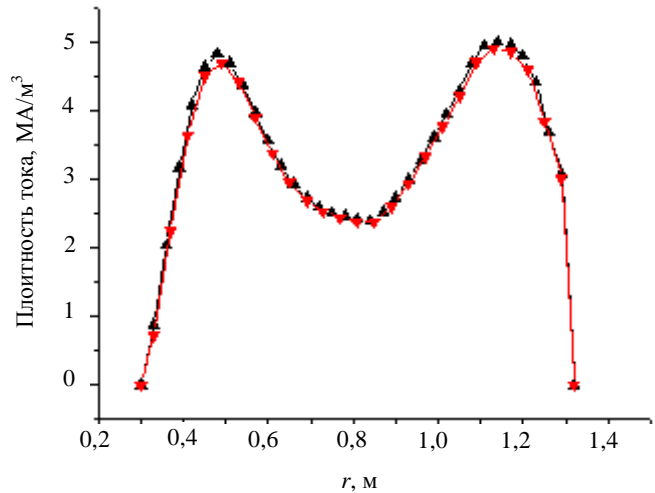


Рис. 1. Сравнение плотности тока, вычисленной с помощью кода ТОКАМЕQ (▲) и кода УКАЕА (▼) института (Великобритания)

Для инициализации табличной формы задания профиля тока в блок входных данных введён параметр NMPROF (the NuMber of the current PROFile). При значении данного параметра, равном 1, профиль тока вычисляется при помощи таблиц, при NMPROF = 0 распределение тока в плазме считается старым способом, т.е. по формуле (1).

Расширение счётной области. Равновесие плазменного шнура в токамаке поддерживается внешними магнитными полями, создаваемыми кольцевыми токами. С математической точки зрения это означает наличие в правой части уравнения Грэда—Шафранова внешних источников. Если кольцевые токи являются точечными, то внешние источники в правой части уравнения Грэда—Шафранова становятся δ -функциями, и при совпадении координат узла сетки с источником происходит переполнение арифметического устройства. В старой версии кода ТОКАМЕQ это переполнение избегалось тем, что счётная область не должна была содержать внутри себя внешних токов. Однако при этом становился невозможным расчёт полей вблизи кольцевых токов, и, в частности, невозможным расчёт систем типа «расширенный дивертор» (т. е. диверторного устройства, расположенного на значительном удалении от плазменного шнура). В новой версии кода ТОКАМЕQ данные ограничения устранены.

С вычислительной точки зрения аппроксимация δ -функции не является слишком сложной задачей. Проводится её «размазывание», т.е. замена одного «большого» точечного источника на множество «мелких», с сохранением суммы протекающего по всем проводникам тока, при этом требуется, чтобы координаты «мелких» точечных источников не совпадали с узлами сетки. Такой подход является общепринятым и приводит к хорошим результатам, тем более, что реальные источники (проводники с токами) точечными не являются.

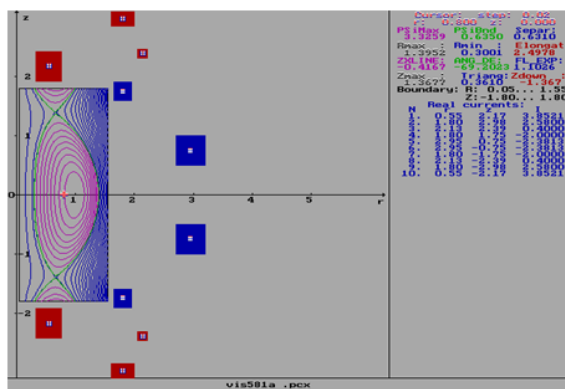


Рис. 2. Равновесие в токамаке STF, рассчитанное по старой версии кода

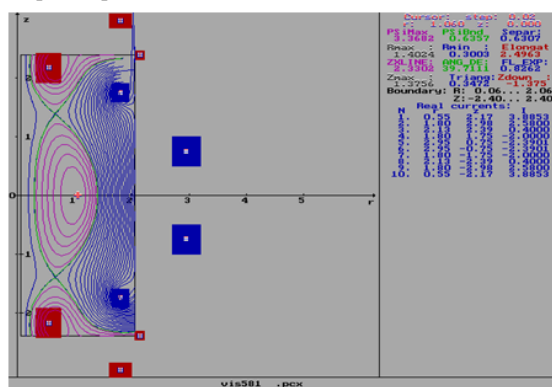


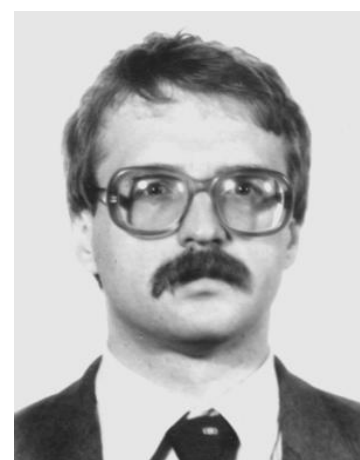
Рис. 3. То же равновесие, что на рис. 2, рассчитанное по новой версии кода

Несовпадение координат узла сетки с координатами «мелкого» точечного источника обеспечивается в режиме ручного контроля.

Работа поддержана грантами РФФИ № 08-07-00182-а, 08-01-00721-а.

На рис. 2 приведен один из вариантов равновесия в проекте токамака STF, рассчитанном по старой версии кода TOKAMEQ. Как видно, счётную область приходится отделить от внешних токов и структуру магнитных полей на значительном удалении от плазмы по данной версии кода просчитать невозможно. То же равновесие, но подсчитанное по новой версии кода, показано на рис. 3. Расхождения между характеристиками равновесий, как видно из таблиц справа от картинок, малы и составляют менее одного процента, что вполне объяснимо сеточными эффектами.

«Размазывание» точечных источников реализуется путем задания ненулевых значений DR_k , DZ_k (размеры сечения k -го внешнего проводника, при этом само сечение считается прямоугольником), и задания значений величин NR_k , NZ_k (число разбиений на «мелкие» точечные источники по r и по z), больших единицы. Расширение счетной области с попаданием внутрь источника в данной версии кода может быть сделано лишь в цифровом режиме редактирования, в графическом режиме редактирования запреты сохранены.



Дмитрий Юрьевич Сычугов, доцент, к.ф.-м.н.
sychugov@cs.msu.su

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. Сычугов Д.Ю. Код для расчёта МГД-равновесия TOKAMEQ (модуль Библиотеки программ «Виртуальный токамак»). ВАНТ. Сер. Термоядерный Синтез, 2008, вып. 4, с. 85—89.
3. Шафранов В.Д. Равновесие плазмы в магнитном поле. — В кн.: Вопросы теории плазмы. Т. 2. — М.: Госатомиздат, 1963, с. 92—131.
4. 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—75.
5. 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.
6. 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.
7. Voss G.M., Davis S., Dnestrovskij A., Kirk A., Knight P.J., Loughlin M., O'Brien M., Sychugov D.Yu., Tabasso A., Wilson H.R. Conceptual design of a component test facility based on the spherical tokamak. — In: ISFNT-8 Conf., Heidelberg, Germany, October 2007, PS3-1005.

Статья поступила в редакцию 23 июня 2009 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 60—62.