



Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

Г.В. Переверзев, П.Н. Юшманов

ИАЭ--

ИАЭ-4545/15

**TRANSITOR --
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА
И АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ
ПЕРЕНОСА В ТОКАМАКЕ**

Редактор С.А. Руцкая
Технический редактор Н.А. Малькова
Корректор Л.В. Пономарева

Подписано в печать 25.11.87. Т-22379. Формат 60x90/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,0
Тираж 120. Цена 30 коп. Заказ 3878. Индекс 3624

Подготовлено к изданию и отпечатано
в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова
123182, Москва, пл. Академика Курчатова

**Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции
Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова**

Г.В. Переверзев, П.Н. Юшманов

**TRANSITOR –
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА
И АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ
ПЕРЕНОСА В ТОКАМАКЕ**

**Москва
1987**

УДК 533.9.01

Ключевые слова: плазма, процессы переноса, токамак, обработка эксперимента, численное моделирование.

Описан программный комплекс, предназначенный для анализа процессов переноса в токамаке. От используемых в настоящее время программ данная система отличается тем, что пользователь может обойтись без языков программирования. Транспортные явления записываются в форме, максимально приближенной к форме записи уравнений в статьях. Для записи транспортных коэффициентов, различных элементарных и других процессов можно пользоваться библиотечными формулами, описывающими широкий набор физических процессов. Формирование программы численного решения на основе заданных уравнений анализа или расчета процессов переноса производится в системе TRANSITOR автоматически.

1. ВВЕДЕНИЕ

Накопление большого количества экспериментальных данных по транспортным процессам в токамаке и их качественное совершенствование обуславливает новые требования к обработке и интерпретации этих данных. Появляется возможность анализировать довольно тонкие эффекты типа влияния радиальных профилей на перенос, а также особенности режимов, отличие статических и динамических коэффициентов и т.д. Для объяснения этих эффектов привлекаются различные физические механизмы, которые анализируются с помощью транспортных моделей. Увеличение числа экспериментальных эффектов привело к возрастанию количества моделей и их усложнению. Зачастую стало сложно понять, чем объясняется тот или иной эффект в заданной модели. А ведь это является ключевым моментом для определения физического механизма наблюдаемого эффекта. Еще хуже обстоит дело со сравнительным анализом моделей, поскольку в большинстве случаев с помощью разных моделей исследуются разные разряды, а затраты на проверку чужих моделей на своей программе уже не оправдываются результатом.

Таким образом, необходим транспортный код, позволяющий быстро и эффективно анализировать роль различных физических механизмов переноса. Это должно обеспечиваться как простотой включения различных транспортных процессов в модель, так и удобной и исчерпывающей формой представления результатов. Такой код, не только откроет возможность прямого выполнения задачи детального анализа физических механизмов переноса, но существенно упростит сравнение разных моделей и позволит значительно большему числу физиков проводить количественный анализ экспериментальных эффектов. Исходя из этих посылок и была задумана программа "Библиотека транспортных моделей TRANSITOR".

Основными целями, поставленными при разработке кода TRANSITOR, были:

- максимальное облегчение изменения системы транспортных уравнений;
- максимальная наглядность представления уравнений, исключающая сомнения в учете и виде членов уравнения;

— обеспечение возможности легко реализуемого вывода любой величины.

В совокупности эти задачи составляют наиболее общую цель — доведение задачи моделирования транспортных процессов в токамаке до уровня простоты, доступной любому человеку, знакомому с уравнениями переноса.

2. ПРИНЦИП ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ TRANSITOR

Реализация поставленных целей достигается тем, что программа строится автоматически по заказанной системе транспортных уравнений. При заказе этой системы физик имеет возможность пользоваться библиотекой формул или системой стандартных обозначений. Другими словами, вместо громоздких формул, описывающих те или иные процессы, достаточно указать имя этой формулы. Многообразие физических процессов, для которых уже введены стандартные обозначения, иллюстрируется списком в приложении 1. В частности, там есть довольно широкий набор классических, неклассических и аномальных транспортных коэффициентов, сечений элементарных процессов, интегральных и усредненных характеристик плазмы и т.д. Важно, что по мере необходимости набор стандартных обозначений может быть легко расширен.

Таким образом, работа по созданию транспортной модели сводится к написанию требуемой системы уравнений с использованием принятых стандартных обозначений. Эта работа уже не может быть автоматизирована. Не автоматизируется также и задание способа представления результатов, выбираемое физиком исходя из его потребностей. Возможности вывода информации в библиотеке моделей TRANSITOR очень широки. Можно осуществить графический или цифровой вывод в виде радиальных или временных зависимостей любых величин, выражающихся через переменные транспортной задачи и стандартные формулы. Все это позволяет использовать TRANSITOR не только для теоретических расчетов, но и для анализа экспериментальных данных. В частности, очень удобно просматривать энергобаланс по сечению шнура с использованием различных формул для потоков тепла и обмена энергией.

Как видно из поставленных целей, традиционные способы записи уравнений, принятые в расчетах численными методами, в данном случае не подходят. В системе TRANSITOR используется язык, максимально приближенный к языку записи уравнений в статьях. Он позволяет быстро и наглядно записывать уравнения переноса. Об удобстве и простоте

языка свидетельствует следующий пример:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial n}{\partial r} \right) + S; \\ \frac{3}{2} \frac{\partial (n T_e)}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \chi_e n \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + P_e; \\ \frac{3}{2} \frac{\partial (n T_i)}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \chi_i n \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + P_i; \\ \frac{\partial j}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial j}{\partial r} \frac{1}{\sigma} \right); \\ \left. \frac{\partial T_e}{\partial r} \right|_{r=0} &= \left. \frac{\partial T_i}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial n}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$T_e \Big|_{r=a} = T_{e0} = \text{const}, \quad T_i \Big|_{r=a} = T_{i0} = \text{const}; \quad 2\pi f r j dr = I = \text{const},$$

где

$D = \chi_e^{MM}/2$ — коэффициент диффузии;

$\chi_e = C_1 \cdot \chi_e^{MM}$ — коэффициент электронной теплопроводности;

$\chi_i = 2,5 \chi_i^{HH}$ — коэффициент ионной теплопроводности;

$\sigma = \sigma_{sp}$ — спитцеровская проводимость;

$S = nN(\sigma_{ion} v)$ — ионизационный источник частиц;

$P_e = P_{jon} - P_{ei} + P_{exp}$ — мощность нагрева электронов;

$P_i = P_{ei}$ — мощность нагрева ионов.

Коэффициент диффузии равен половине коэффициента аномального переноса Мерезкина—Муховатова χ_e^{MM} , коэффициент электронной теплопроводности содержит произвольный множитель C_1 , который будет подбираться в процессе расчета. Наконец, коэффициент ионной теплопроводности в 2,5 раза превышает коэффициент неоклассической ионной теплопроводности по Хинтону—Хазелтину. В электронном уравнении включен дополнительный источник нагрева P_{exp} .

На языке программы TRANSITOR система уравнений (1) записывается следующим образом:

$$DN = HAMM/2$$

$$HE = CF1 * HAMM$$

$$XI = 2,5 * HHHI$$

$$CC = CCSP \quad (2)$$

$$SNN = SNNEUT$$

$$PE = PJOULE - PEICL + PEX$$

$$PI = PEICL$$

Здесь левая часть является названием транспортного коэффициента ($HE = \chi_e$ — электронная теплопроводность; $HI = \chi_i$ — ионная теплопроводность и т.д.). Она определяет место, в котором данное выражение будет использовано в системе транспортных уравнений. Правая часть равенств задает формулу в обозначениях библиотеки TRANSITOR, по которой данный коэффициент будет вычисляться. Для простоты запоминания названий в них использована следующая мнемоника:

$$\chi_e^{MM} = HAMM - \text{Heat Anomalous Merezhkin} - \text{Mukchovatov};$$

$$\chi_i^{HH} = HHHI - \text{Heat Neoclassical Hinton} - \text{Hazeltine Ion};$$

$$\sigma_{sp} = CCSP - \text{Conductivity Classical SPitzer};$$

$$P_{jou} = PJOULE - \text{Power JOULE};$$

$$P_{ei} = PEICL - \text{Power Electron} - \text{Ion CoLLisional};$$

$$P_{exp} = PEX - \text{Power Electron eXperimental}.$$

Операции по преобразованию уравнений, записанных в виде (2), в численную схему выполняются автоматически. Сюда включаются поиск и подбор формул по названию транспортных коэффициентов и запись полностью определенных уравнений в виде численной схемы на алгоритмическом языке. Именно этот этап работ, проводимый обычно программистом, является наиболее трудоемким при создании модели и вносит наибольшее число ошибок и неясностей.

Помимо очевидного преимущества — быстроты создания численной модели — TRANSITOR позволяет существенно повысить надежность соответствия численного кода требуемым транспортным уравнениям. Это обеспечивается, во-первых, устранением ошибок на стадии формирования численной схемы, во-вторых, единообразной записью транспортных коэффициентов. Так, например, для CCSP в любой модели будет использоваться строго одинаковое выражение из библиотеки формул:

$$CCSP = 70 \cdot T_e^{3/2} \cdot (1,1 + Z_{ef}) / (2,66 + Z_{ef}) / Z_{ef}, \quad (3)$$

причем для любой формулы TRANSITOR дает возможность узнать ее описание и источник информации. И, наконец, в-третьих, надежность обеспе-

вичается простотой проверки заложенных в модель уравнений.

На этом же языке описываются и переменные для вывода. Так, для анализа радиального профиля потока тепла, обусловленного неоклассической ионной теплопроводностью, достаточно написать

$$Q_{neo} \setminus HNNHI * NE * GRAD(TI). \quad (4)$$

Эта запись означает, что под именем Q_{neo} на экран или на другое внешнее устройство будет выводиться величина, определенная выражением, записанным после знака \setminus , т.е. произведение $HNNHI$ на плотность плазмы и градиент ионной температуры.

Кроме того, часто возникает необходимость анализа зависимости какой-либо величины от времени, например, температуры на оси, энергетического времени, энергосодержания плазмы и т.д. Для этого в описании модели достаточно поставить строку вида

$$W_WTOT(AB) \quad (5)$$

где слева от знака $_$ написаны названия, под которыми требуемые величины будут печататься, а справа — выражение, определяющее нужную величину. При этом заказ вывода вида (5) обеспечивает печать текущего значения величины и позволяет просматривать ее временную эволюцию в виде графика.

Таким образом, все операции по созданию модели сводятся к заданию коэффициентов модели по формулам вида (2), а также интересующих радиальных профилей (4) и переменных (5) для вывода. При этом для записи всех величин могут быть использованы стандартные формулы вида (3). Графически структура программы TRANSITOR представлена на рис. 1.



Рис. 1

3. РАБОТА С СИСТЕМОЙ TRANSITOR

Для записи транспортных уравнений и расчета по модели необходимо выполнить некоторые промежуточные операции. Эти операции являются по существу заказом на выполнение определенных работ и задают режим работы программы. Программа TRANSITOR (или сокращенно ТКМ) выполняет две основные операции:

- 1) создание или изменение модели;
- 2) задание начальных условий и запуск задачи на счет.

Помимо этих операций имеется несколько дополнительных, обусловленных структурой ТКМ и предоставляемым ею сервисом:

- запоминание результатов расчета;
- корректировка расчета или вывода по ходу работы программы;
- считывание и просмотр результатов в разных представлениях;
- описание переменных задачи (переменных, формул, подпрограмм);
- продолжение расчета прерванного варианта.

Логическая схема связи различных операций ТКМ представлена на рис. 2. Рассмотрим сначала работу программы в простейшем варианте, предполагающем выполнение только двух основных операций.

Запуск ТКМ осуществляется набором
@ТКМ

после чего появляется строка

ТКМ >

Любые команды ТКМ воспринимает только после появления этой строки, показывающей, что предыдущая операция закончена.

Переход в режим создания или исправления модели происходит при наборе

MOD модель

где "модель" — название модели (алфавитно-цифровая последовательность, не более шести символов). После набора этой строки появляется текст уравнений, заложенных в модель. Если "модель" вызывается впервые, то ТКМ предлагает базовый набор уравнений и переменных для вывода. Работа с текстом модели ведется через редактор EDT. Правила записи транспортных уравнений приведены в разд. 4, а переменных вывода — в разд. 5. После выхода из EDT уравнения преобразуются в численный код (см. рис. 2). При этом на экране появляются разные диагностики. В случае успешного завершения обработки последняя строка имеет вид

_____ Model модель is created _____

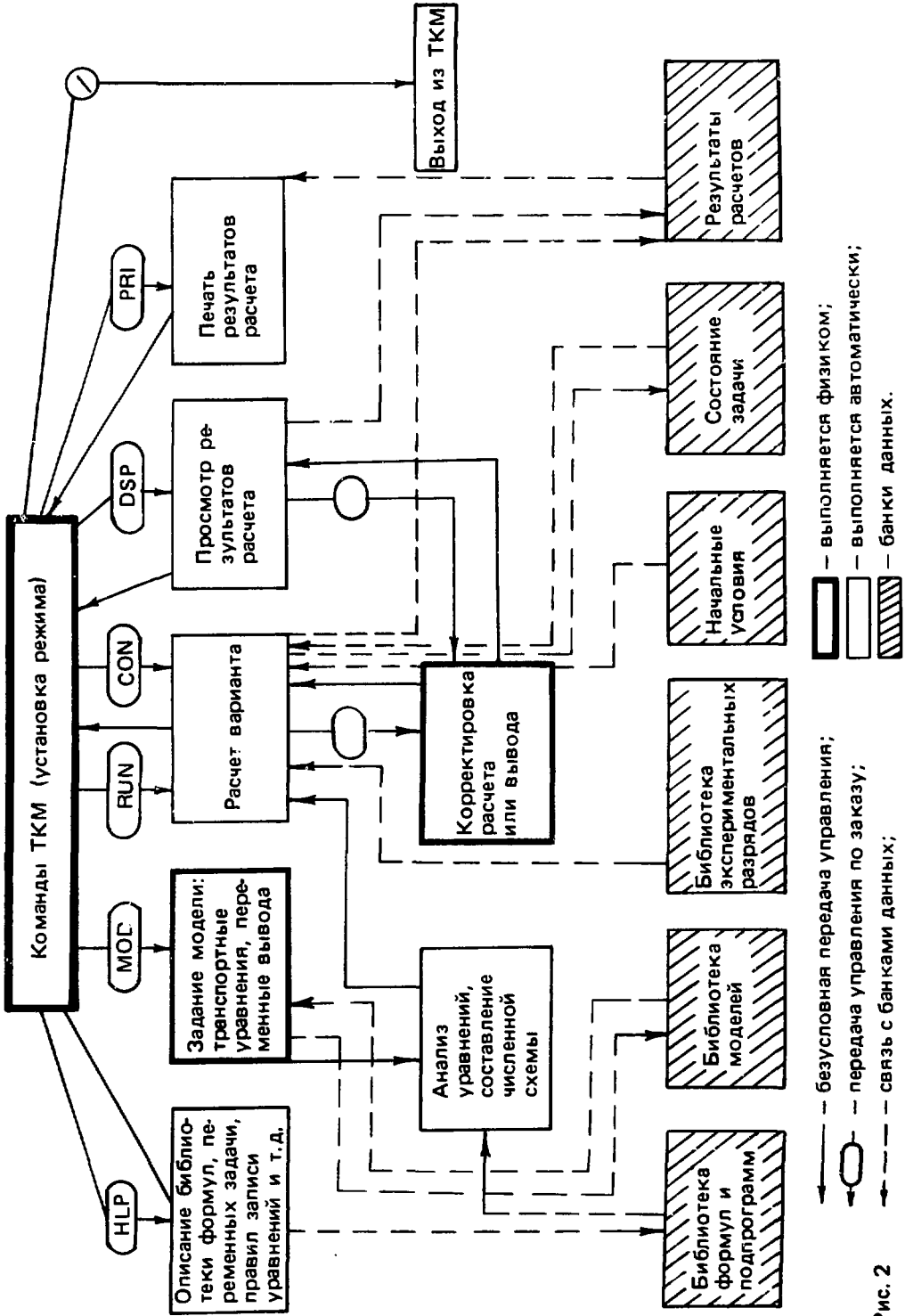


Рис. 2

Если такого сообщения не появилось, то необходимо внести исправления в соответствии с указаниями диагностик.

После создания модели ТКМ пытается перейти к расчету. Такая операция может выполняться также отдельно, если модель была создана ранее. Это осуществляется набором строки

RUN вариант модель

где "вариант" — название набора параметров установки и разряда из библиотеки данных (см. HLP VARIANT). Если "вариант" и "модель" заданы правильно, то программа запускается на счет и на экране появляются радиальные профили заказанных величин, а снизу — текущие значения выводимых переменных, определенных строками вида (5). Возможности изменения режима вывода и внесения других корректив в расчет описаны в разд. 7.

Пробный запуск модели может быть осуществлен с базовым набором транспортных уравнений (без внесения в них изменений), например с вариантом T10, в котором записаны основные параметры установки T-10. Однако для создания и работы с собственной моделью надо знать возможности ТКМ — для этого существует команда HLP. Используя эту команду, можно, в частности, получить информацию, содержащуюся в данном описании. При этом данные будут более полные, соответствующие реально работающей версии. Например, более полные списки переменных и формул могут быть получены с помощью набора строк, указанных в приложении 1.

Для получения списка вариантов, имеющихся в библиотеке экспериментальных данных, надо набрать

HLP VARIANT

Если дополнительно указано и название варианта

HLP VAR: имя

то будет напечатана исходная экспериментальная информация.

Система транспортных уравнений, решаемых ТКМ, и правила их записи будут напечатаны при наборе

HLP EQUATIONS

Команда HLP имеет и ряд других возможностей. Получить весь список можно, набрав строку

HLP

без параметров.

Вернемся теперь к рассмотрению команд, работающих непосредственно с моделью. Режим записи результатов на диск задается либо при формировании модели (см. разд. 8), либо с клавиатуры (см. разд. 7). Для просмотра результатов расчета или начальных условий существует специальная команда, имеющая вид

DSP вариант модель

где "вариант" и "модель" имеют те же значения, что и в команде RUN, которая создала данную запись. Управление выводом осуществляется так же, как в команде RUN, оно описано в разд. 7.

Результаты расчета, записанные на диск, могут быть использованы не только для просмотра, но и для продолжения расчета, который задается командой

CON вариант модель

Эта команда имеет тот же смысл, что и RUN, но в качестве начальных условий использует результаты, записанные при работе команды

RUN вариант модель

с теми же параметрами.

Таким образом, набор команд RUN, CON, MOD, DSP, HLP обеспечивает все основные режимы работы программы ТКМ. Остальные режимы работы, такие, как запись нового варианта начальных условий, исправление или введение новых формул подпрограмм, являются привилегированными и доступны только по специальному разрешению.

4. ЗАДАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ УРАВНЕНИЙ

Программа ТКМ может решать систему уравнений переноса энергии, частиц и магнитного поля с полной матрицей транспортных коэффициентов:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (nT_e) &= - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(q_e + \frac{5}{2} \Gamma T_e) \right] + \underline{PE} + T_e \cdot \underline{PET}; \\ \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (nT_i) &= - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(q_i + \frac{5}{2} \Gamma T_i) \right] + \underline{PI} + T_i \cdot \underline{PIT}; \\ \frac{\partial n}{\partial t} &= - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\Gamma) + \underline{SN} + n \cdot \underline{SNN}; \\ \frac{\partial B_\theta}{\partial t} &= c \frac{\partial E}{\partial r}; \\ j &= \frac{c}{4\pi r} \frac{\partial}{\partial r} (rB_\theta) = j_b + \underline{CD} + E \cdot \underline{CC}, \end{aligned} \tag{6}$$

где $n(t, r)$ – плотность плазмы; $T_e(t, r)$, $T_i(t, r)$ – температуры электронов и ионов; $B_\theta(t, r)$ – полоидальное магнитное поле; $j(t, r)$ – плотность тороидального тока. Первые два уравнения выражают баланс энергии электронов и ионов, третье – баланс частиц, далее следуют уравнения Макс-

велла и закон Ома с учетом бустреп-тока j_b , тока от неиндукционного источника CD (Current Driven) и тока проводимости $j_\Omega = E \cdot CC$ (Current Conductivity). Источники и стоки частиц и энергии SN, SNN, PE, PET, PI и PIT разделены на две части, которые по-разному входят в численную схему решения. Подробнее об этом сказано в приложении 2, для работы без оптимизации схемы можно пользоваться только одним (любым) слагаемым из каждой пары. Потoki частиц Γ и тепла q_e, q_i , а также бустреп-ток выражаются через переменные задачи следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \frac{q_e}{nT_e} \\ \frac{q_i}{nT_i} \\ \frac{\Gamma}{n} \\ \frac{B_\vartheta j_b}{cnT_e} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{HE} & \underline{XE} & \underline{DE} & \underline{CE} \\ \underline{HI} & \underline{XI} & \underline{DI} & \underline{CI} \\ \underline{HN} & \underline{XN} & \underline{DN} & \underline{CN} \\ \underline{HC} & \underline{XC} & \underline{DC} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{T_e} \frac{\partial T_e}{\partial r} \\ \frac{1}{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial r} \\ \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} \\ \frac{cE}{B_\vartheta} \end{pmatrix} \quad (7)$$

В уравнениях (6) – (7) подчеркнуты величины (в обозначениях программы ТКМ), задание которых полностью определяет решаемую систему. Однако совсем не обязательно решать все уравнения (6) и задавать всю матрицу коэффициентов переноса (7). Единственная из 23 подчеркнутых в (6) – (7) величин, которая обязательно должна быть определена, – это проводимость плазмы CC.

При описании уравнений необходимо определить, какие уравнения, в какой последовательности и с какими коэффициентами будут решаться. Помимо этого требуется задать также граничные и начальные условия. Однако во многих случаях эти величины задаются ТКМ при запуске задачи самим выбранным вариантом расчета и не требуют специального определения. Поэтому сначала рассмотрим только описание уравнений и транспортных коэффициентов на языке ТКМ.

Все параметры на языке ТКМ задаются с помощью отдельных управляющих строк. Для уплотнения записи коротких управляющих строк их можно объединять в одну, используя знак ; .

Управляющая строка уравнения имеет вид

$$\text{var : eqt : sub : tim} \quad (8)$$

var задает переменную, для которой будет решаться транспортное уравнение, eqt – способ ее пересчета, sub – имя подпрограммы (с параметрами), которая в случае необходимости вызывается перед вычислением данной переменной, tim задает интервал времени, через который данная подпрограмма вызывается, var может принимать только следующие значения:

NE – плотность электронов; TI – температура ионов;

TE – температура электронов; CU – плотность тока.

Можно использовать способ пересчета eqt:

FU[LL] – расчет по уравнению (6);

EQ[UATION] – расчет по уравнению (6) без учета потока частиц (для T_e и T_i);

AS[SIGNED] – вычисление по заданной формуле.

Имя подпрограммы sub может быть любым. Время tim, как и любое другое в задаче, задается в секундах.

Любая из переменных в командной строке может быть опущена. При отсутствии var никакое уравнение не решается, а только вызывается подпрограмма sub. При отсутствии sub подпрограмма не вызывается. Если tim не задано, то интервал между вызовами 0,01 с. При отсутствии eqt переменная var не изменяется.

Для сокращения записи в ТКМ предполагается, что отсутствующие уравнения или коэффициенты вообще не описываются. В частности, если не задано уравнение для NE, то плотность плазмы предполагается фиксированной и определенной в начальных условиях при запуске задачи. Отсутствие в описании модели каких-либо транспортных коэффициентов означает, что в соответствующем уравнении таких членов нет. Например, при отсутствии XE и CE в уравнении для электронной температуры будут только члены, пропорциональные ∇T_e и ∇n . Таким образом, задавать необходимо лишь уравнения и коэффициенты, реально необходимые для рассматриваемой модели.

Уравнения решаются в той последовательности, в которой они встречаются в описании модели. Правильно заданные уравнения выписываются анализатором модели с указанием порядкового номера вызываемой подпрограммы. Строка с неправильно определенными переменными игнорируется, о чем сообщает соответствующая диагностика.

В качестве примера рассмотрим управляющую строку

NE : EQ : NEUT(ENC, ENW) : 0.05 (9)

Эта запись означает, что в модели плотность плазмы рассчитывается по дифференциальному уравнению (6). При этом перед вычислением плотности с интервалом 0,05 с производится вызов подпрограммы NEUT, вы-

числяющей плотность нейтралов. При анализе модели ТКМ выдаст следующие строки:

```
--- Equation NE is solved  
--- Subroutine NEUT (ENC, ENW) is called with time step 0.05
```

Отметим, что задание (9) может быть также записано в виде двух отдельных строк:

```
:: NEUT (ENC, ENW) : 0.05
```

```
NE : EQ
```

Задание транспортных коэффициентов состоит из указания названия коэффициента *cft* и формулы *fml*, по которой он вычисляется. Управляющая строка коэффициентов имеет вид

$$cft = fml \quad (10)$$

Переменная *cft* может быть любым из коэффициентов транспортной матрицы или источником [подчеркнутые величины в уравнениях (6) — (7)]. Правила записи формул *fml* довольно просты (см. разд. 6).

Обе части равенства в управляющей строке коэффициентов должны быть определены. Расположение этих строк при описании уравнений роли не играет. Строки с неправильно определенными переменными *cft* игнорируются, о чем сообщает диагностика. Правильно определенные командные строки транспортных коэффициентов также печатаются на экране. При этом для контроля всем величинам, интерпретированным ТКМ как радиальные профили, добавляется *r*.

Примером управляющих строк коэффициентов служат выражения (2). После анализа этих строк ТКМ выдаст следующую диагностику:

$$\text{Density coeff. DN}(r) = \text{HAMM}(r)/2 \quad (11)$$

$$\text{Electron coeff. NE}(r) = \text{CF1} * \text{HAMM}(r)$$

и т.д.

Отдельного рассмотрения требуют уравнения типа *ASSIGNED*, в которых переменная вычисляется по некоторой формуле, а не по уравнениям (6) — (7). Наиболее частым случаем, требующим такого задания, является распределение плотности тока по вычисляемой в соответствии с изменяющейся температурой электронов проводимости плазмы ($E = \text{const}$). При этом, естественно, не надо задавать транспортные коэффициенты, а надо определить саму переменную. Это делается управляющей строкой

$$\text{var} = \text{fml} \quad (12)$$

Здесь var может принимать те же значения, что и в управляющей строке уравнений (8), а fml является произвольной формулой, допустимой в языке ТМК (см. разд. 6). Например, стационарное распределение плотности тока по спитцеровской проводимости задается двумя управляющими строками:

$$\text{CU} : \text{AS}; \text{CU} = \text{CCSP}$$

Граничные и начальные условия в модели задаются формулами (12) и (13), однако их можно опустить. В этом случае начальные условия определяются вариантом расчета. В частности, можно проводить расчеты одного и того же варианта с разными моделями, и наоборот. Граничные условия, строго говоря, должны быть определены. Но если они не зависят от времени, то их можно не описывать в модели. Тогда граничные значения переменных сохраняются такими, какие были заданы начальными условиями.

Бывают, однако, случаи, когда граничные условия зависят от времени и с необходимостью должны быть определены в модели. Примером такой ситуации является расчет разряда с подъемом тока по заданной программе. Тогда ток, являющийся граничным условием для уравнения Максвелла, задается управляющей строкой вида

$$\text{bnd} = \text{fml} \tag{13}$$

имеющей тот же формат, что и управляющие строки (10) и (12). Здесь переменная bnd может принимать значения

- TIB — граничная температура электронов;
- TIV — граничная температура ионов;
- NEB — граничная плотность плазмы;
- NNWM — граничная плотность теплых нейтралов;
- NNCL — граничная плотность холодных нейтралов;
- IPL — ток плазмы;
- UEXT — напряжение во внешней цепи.

Как и командные строки транспортных коэффициентов, управляющие строки (12) и (13) могут располагаться в любом месте описания модели. Они подключаются в нужном месте в соответствии с порядком следования уравнений.

5. ЗАДАНИЕ ВЫВОДА

Программа ТКМ одновременно выводит до 16 радиальных профилей и 8 временных зависимостей. Все выводимые величины могут изображаться в виде графиков, а также печататься в цифровом виде на экране или на бумаге. В ТКМ не предполагается никакого заранее определенного жесткого вывода, поэтому все интересующие пользователя величины должны быть описаны в модели. Такой подход был использован потому, что в ТКМ имеется возможность выводить не только вычисляемые программой переменные, количество которых не слишком велико, но и любые выражения, использующие эти величины [см., например, (4)]. В зависимости от цели, поставленной автором модели, выводимая информация может меняться настолько широко, что предусмотреть заранее удобный для всех список вывода невозможно.

Задание вывода состоит из формулы fml , по которой вычисляется выводимая переменная, названия выводимой переменной $name$, которое используется только для надписи при выводе, а также масштаба вывода на график $scale$.

Формат управляющей строки вывода радиального профиля имеет вид

$$name \setminus fml \setminus scale \quad (14)$$

Переменная $scale$ может отсутствовать. Тогда масштаб выбирается автоматически. Как и при задании уравнений, командные строки вывода могут быть объединены в одну с помощью разделителя ; .

Расположение графика или столбца печати зависит от порядкового номера, под которым данная переменная находится в описании модели. Перестановка строк вывода приводит к перестановке соответствующих графиков. Так, например, строка

$$Trel \setminus TE / TE(0); Wtl \setminus WTOT; NUe * \setminus NUEST \setminus 2 \quad (15)$$

будет означать вывод по первому каналу (первый график, первый столбец и т.д.) относительной температуры $TE/TE(0)$ под именем $Trel$ с автоматическим масштабом. По второму каналу будет выводиться профиль энергосодержания плазмы с именем Wtl , а по третьему каналу — ν_e^* с именем NUe^* и фиксированным масштабом 2.

Управляющая строка вывода зависимости переменной от времени имеет вид

$$name _ fml _ scale \quad (16)$$

Правила здесь такие же, как и при выводе радиальных профилей. Следует лишь учесть, что по каналам временных зависимостей выводятся только простые числовые переменные, например, энергетическое время τ_E (ТАУЕВ), температура на оси $T_e(0)$ (ТЕС) и т.д. Поэтому в формулах, задающих временной вывод, не должно быть радиальных профилей. Подробнее об этом говорится в следующем разделе.

6. ФОРМУЛЫ

В программе ТКМ формулы используются для задания коэффициентов уравнений, граничных условий и переменных вывода (12) – (16). Никаких ограничений на способ записи формулы, кроме того, что она должна быть записана в одну строку, нет. Не следует, однако, забывать, что в формулы могут входить только используемые в ТКМ переменные (обозначения) и числа. К переменным ТКМ относятся параметры установки, переменные задачи, вычисляемые в уравнениях (6) – (7), граничные значения параметров, переменные обмена и библиотечные формулы. Список переменных приведен в приложении 1. Список библиотечных формул постоянно пополняется, а набор остальных переменных фиксирован. Вообще говоря, в формулах можно использовать и любые другие обозначения, но соответствующие переменные должны быть заранее определены (им должны быть присвоены числовые значения). Примеры записи формул даны в выражениях (2), (4), (5), (15).

Обратим внимание на некоторое отличие записи формул в ТКМ от их записи на каком-либо из языков программирования. Это различие возникло из-за стремления приблизить язык формул ТКМ к форме их записи в статьях. Поясним это на примере. Так, запись

$$NE = 2 * NAMM * TE/TI \quad (17)$$

обозначает, что электронная теплопроводность NE в каждой радиальной позиции будет вычисляться согласно выражению в правой части, в котором все зависящие от радиуса величины взяты в том же месте по радиусу, т.е. все радиальные зависимости при записи формул в ТКМ подразумеваются. Это вполне естественно при записи аналогичных выражений в статье и было бы недопустимо при программировании.

Если же возникает необходимость использовать в формуле значение переменной в какой-либо радиальной точке, то надо указывать эту позицию. Например, можно записать

$$NE = 2 * NAMM * TE(0.) / TI(0.)$$

$$HE = 2 * HAMM * TE(AB/2)/TI(AB)/2 \quad (18)$$

$$HE = 2 * HAMM * TE(0.2)/TI(.2)$$

Тогда радиальная зависимость предполагается только у теплопроводности HAMM, а отношение электронной и ионной температур берется в первом случае на оси, во втором — на середине радиуса, а в третьем — при $r = 0,2$ м.

Для наиболее часто используемых значений переменных на оси шнура и на его границе в языке формул ТКМ предусмотрены сокращения: вместо TE (0.) или MU(0.) можно писать TEC или MUC, а вместо TN(AB) или MU(AB) соответственно TNB и MUB. То есть при записи радиальной позиции всегда можно заменить (0.) на C (Centre), а (AB) на B (Boundary).

Еще одно замечание необходимо сделать относительно использования формул для вывода величин, зависящих только от времени (16). В этом случае по смыслу выводимой величины формула должна давать числовое значение, поэтому в нее не должны входить величины, интерпретируемые как зависящие от радиуса. При этом способе вывода в формуле нельзя использовать TE, HAMM, WTOT и т.д., но можно TEC, MUB, WTOT(AB/2) и т.д. Переменные, у которых подразумевается радиальное распределение, отмечены в приложении 1 признаком (r).

7. РАБОТА С ЭКРАНОМ

В ТКМ предусмотрена возможность запускать задачу в режиме, при котором вся заказанная информация выводится на экран. При этом имеется возможность управления как выводом, так и самим расчетом. В частности, по ходу вычислений можно с помощью доступных с терминала коэффициентов CF1 ÷ CF8 изменять формулы, используемые в модели.

Вывод информации на экран осуществляется в трех видах (модах). В основном режиме (мода 1) на экран выводятся все радиальные профили, заказанные в модели. Для этого экран разделен на восемь окон, в которых изображено по два графика. Переменные, выводимые как зависящие от времени [заданные строками вида (16)], печатаются при этом в цифровом виде в нижних строках экрана. Там же показаны название установки, малый радиус, магнитное поле, текущее время и шаг по времени. Для рассмотрения каких-либо профилей в более крупном виде используется вывод в моде 2. При этом графики из первых двух окон увеличиваются до размера всего экрана. Для просмотра в укрупненном виде других радиальных профилей их надо переставить в первые два окна, что также можно делать с терминала.

Для просмотра переменных, заказанных как зависящие от времени, существует мода 3. В этом режиме на экране появляются временные развертки первых четырех из заказанных величин. Просмотреть остальные можно, изменив номера переменных вывода.

Помимо корректировки формул и управления выводом при запуске задачи в режиме связи с терминалом можно изменять и другие важные для работы программы параметры. Возможности управления задачей с терминала следующие:

- M (Mode) — изменение моды вывода;
- C (Constant) — изменение констант CF1 ÷ CF8 в формулах;
- W (Window) — изменение номера окна, в которое выводится график;
- S (Scale) — изменение масштабов графиков;
- T (Type) — печать результатов расчета на экран в цифровом виде;
- F (File) — запись текущего состояния расчета в память (файл) для дальнейшего расчета или анализа с помощью другой модели;
- D (Delta) — изменение управляющих работой программы интервалов времени;
- H (Help) — печать списка команд управления задачей с терминала;
- * или : — увеличение или уменьшение максимально допустимого шага по времени в 2 раза;
- / или (CTRL)Z — прекращение расчета;
- (CTRL)P — перерыв в расчете (например, для просмотра исходных уравнений) ;
- (CTRL)W — обновление графиков на экране;
- (CTRL)C — отмена режима управления задачей с клавиатуры.

Заказ этих команд осуществляется однократным нажатием на клавиатуре соответствующего знака. Если ошибочно нажата клавиша, которой нет в списке управляющих команд, то ТКМ не реагирует на этот заказ. Для исправления ошибки надо нажать правильную клавишу. Рассмотрим теперь каждую из команд отдельно.

Переход из одной моды вывода в другую осуществляется набором на клавиатуре клавиши M, при этом в нижней строке экрана появляется запрос

Enter a new MODE # [N]

Число в квадратных скобках означает текущий номер. Набрав нужный номер (1, 2 или 3) и (CR) (возврат каретки), попадаем в требуемый режим.

Изменение констант CF1 ÷ CF8 осуществляется набором клавиши C. После этого появляется строка

CF1 : Enter a new value [1.000]

которая означает, что текущее значение константы CF1 = 1 (это всегда предполагается при запуске). Для изменения значения этой константы нужно набрать требуемое число и <CR>. Затем константе CF1 будет присвоено новое значение, а ТКМ напечатает аналогичную строку, но для коэффициента CF2. Изменив CF2, переходим к CF 3 и т.д. Если коэффициент менять не нужно, то следует просто нажать <CR>. Выход из режима изменения коэффициентов осуществляется либо после исправления CF8, либо в любой момент после нажатия клавиш / и <CR>. Если по ошибке нужный коэффициент был пропущен или требуется его повторное изменение, то набрав клавиши — и <CR>, можно изменить направление движения по цепочке и перейти уже не от CF1 к CF8, а наоборот.

Изменение места графика на экране осуществляется командой W. После ее набора на экране появляется строка

name : Enter a new window [1]

где name — название переменной, определенное в управляющей строке (14) или (16), а число в квадратных скобках — номер канала (в данном случае окна на экране), по которому эта переменная выводится. При запуске задачи этот номер совпадает с порядковым номером управляющей строки радиального вывода в описании модели. Для изменения окна надо набрать нужный номер канала (от 1 до 16 в моде 1, 2 и от 1 до 8 в моде 3) и <CR>. Если установить номер 0, то данный график вообще не будет выводиться. Для сохранения номера достаточно нажать <CR>. Далее происходит переход к изменению окна следующей переменной с теми же правилами движения по цепочке, что и при изменении коэффициентов CF.

Изменение масштаба графиков производится после набора клавиши S. При этом появляется строка

name : Enter a new scale [число]

где "число" — это текущее значение масштаба для данной переменной. Для переменных с автоматическим масштабом в этом месте указывается 0. Реальным масштабом в этом случае служит минимальное из чисел последовательности 0,01; 0,02; 0,05; 0,1, ..., позволяющее разместить на графике почти всю кривую (за исключением, может быть, правого и левого края). Участки графика, попадающие за пределы экрана,

как при автоматическом, так и при фиксированном масштабе отбрасываются. Правила изменения масштабов и перехода по цепочке переменных те же, что и для изменения номера окна.

Изменение временных шагов осуществляется при наборе клавиши D. Цепочку переменных, которые могут изменяться данной командой, составляют

- DRout — интервал времени обновления графиков на экране;
- DTout — интервал запоминания переменных, зависящих от времени;
- DCout — интервал времени, через который происходит запись результатов расчета на диск;
- DTEQ(J) — интервал времени, с которым идет обращение к подпрограмме с номером J.

Правила изменения значений и движения по цепочке такие же, как и правила изменения номера окон.

Остальные команды выполняются сразу после нажатия соответствующей клавиши и не требуют дополнительных пояснений.

8. ЗАДАНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

Помимо описания уравнений и способа представления результатов приходится задавать параметры, управляющие режимом работы программы. К ним относятся, например, временной и пространственный шаг численной схемы, число итераций, промежутки времени, через которые происходит выдача или запись результатов, обращение к внешним подпрограммам и т.д. Эти параметры перечислены в п. 6 приложения 1. Программа ТКМ организована таким образом, что все параметры управления численным расчетом могут не задаваться. Тогда они будут иметь стандартные значения. Кроме ключей KEY и IFBAT, которые определяются способом запуска задачи, стандартные значения остальных управляющих параметров в начале расчета следующие:

NA = 20, NA1 = 21,
TAU = 0.001, TAUMAX = 0.01,
ITER = 1, NITER = 20,
DROUT = 0.01, DTOUT = 0.01, DCOUT = 100,
DTEQ(N) = 0.01 для всех подпрограмм.

Переменные NA и NA1 в настоящем варианте программы не могут меняться. Значения остальных параметров могут быть изменены исходя из потребностей конкретной задачи. Для изменения этих параметров в начале расчета служат управляющие строки, которые могут быть введены в описание модели

par = number

где par — любой из параметров: TAU, TAUMAX, ITER и т.д.; number — требуемое значение этого параметра. Отметим, что если шаг по времени TAU не задан, то он выбирается автоматически в диапазоне $TAUMAX > TAU > TAUMAX/100$ с начальным значением 0,001. При работе в режиме связи с терминалом значение TAU печатается на экране.

Интервалы обращения к подпрограмме DTEQ могут задаваться и при заказе вызова подпрограммы управляющей строкой (8) [переменная tim см. (9)].

Управляющие параметры расчета, заданные при запуске задачи, в режиме связи с терминалом можно изменять непосредственно по ходу расчета. Эта возможность существует для переменных TAUMAX, ITER, DROUT, DTOUT, DCOUT и DTEQ. Правила изменения этих параметров при работе с терминалом описаны в разд. 7.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Используемые обозначения

1. Параметры установки и разряда (см. HLP PARAMETERS)

AB, RTOR	— малый и большой радиусы тора, м;
VOLUME	— объем камеры, m^3 ;
BTOR	— тороидальное магнитное поле, Тл;
AMAIN, ZMAIN	— масса (в протонных массах) и заряд основных ионов плазмы;
IPL	— ток плазмы, МА;
LEXT	— индуктивность внешней цепи, мкГн;
UEXT	— напряжение обхода, В;
TIME	— время, с.

2. Радиальные профили, вычисляемые при решении уравнений (6) — (7) (см. HLP MAIN)

TE(r)	— температура электронов, кэВ;
TI(r)	— температура ионов, кэВ;
NE(r)	— плотность электронов, $10^{19} m^3$;
CU(r)	— плотность тока, МА/ m^2 ;
FP(r)	— полоидальный поток, В·с;
MU(r)	— величина вращательного преобразования, равная $1/q$;

UT(r)	— напряжение обхода, В;
VP(r)	— cE/B_y , м/с;
GN(r)	— поток частиц, $10^{19}/(m^3 \cdot c)$;
NUEST(r)	— ν_e^* ;
NUIST(r)	— ν_i^* ;
SQEPS(r)	— $\sqrt{\epsilon}$;
PETOT(r)	— плотность мощности в электронах, МВт/м ³ ;
PITOT(r)	— плотность мощности в ионах, МВт/м ³ ;
SNTOT(r)	— плотность источника частиц, $10^{19}/(m^2 \cdot c)$.

3. Граничные значения параметров

TEB	— граничная температура электронов, кэВ;
TIB	— граничная температура ионов, кэВ;
NEB	— граничная плотность плазмы, $10^{19}/m^3$;
NNCL	— граничная плотность холодных нейтралов, $10^{19}/m^3$;
NNWM	— граничная плотность теплых нейтралов, $10^{19}/m^3$.

4. *Переменные обмена* (в уравнениях (6) — (7) они только используются, а определяются другими уравнениями или экспериментальными данными; по отношению к транспортным уравнениям эти переменные являются внешними, см. HLP EXTERNAL)

GNX(r)	— внешний поток частиц (см. приложение 2), $10^{19}/(m^2 \cdot c)$;
SNX(r)	— внешний источник частиц, $10^{19}/(m^2 \cdot c)$;
PEX(r)	— плотность внешней мощности в электронах, МВт/м ³ ;
PIX(r)	— плотность внешней мощности в ионах, МВт/м ³ ;
PRADX(r)	— плотность мощности радиационных потерь, МВт/м ³ ;
TEX(r)	— сторонняя температура электронов, кэВ;
TIX(r)	— сторонняя температура ионов, кэВ;
NEX(r)	— сторонняя плотность плазмы, $10^{19}/m^3$;
CUX(r)	— плотность стороннего тока, МА/м ² ;
NN(r)	— относительная плотность нейтральных атомов, нормированная на плотность влетающих атомов;
TN(r)	— температура нейтральных атомов, кэВ;
CAR1 ÷ CAR8(r)	— восемь радиальных профилей, не имеющих заранее определенного смысла, для обмена с дополнительными подпрограммами;

- CV1 ÷ CV8 — восемь чисел для обмена с внешними подпрограммами;
- CF1 ÷ CF8 — константы для изменения формул с экрана дисплея.

5. *Библиотечные формулы* (список этих формул постоянно расширяется по мере возникновения потребности в новых выражениях; последний вариант списка можно получить по HLP FORMULAS, более подробную информацию — по HLP name)

- CCSP(r) — классическая спитцеровская проводимость плазмы, MA/(B.m) ;
- CCSPX(r) — классическая спитцеровская проводимость, рассчитанная по экспериментальной температуре TEX, MA/(B.m) ;
- CNHH(r) — неоклассическая проводимость по Хинтону—Хазелтину, MA/(B.m) ;
- CNHHX(r) — неоклассическая проводимость плазмы, рассчитанная по экспериментальной температуре TEX, MA/(B.m) ;
- DNHH(r) — неоклассический коэффициент диффузии по Хинтону—Хазелтину, м²/с;
- ENHH13(r) — неоклассический коэффициент пинчевания частиц по Хинтону—Хазелтину;
- ENHH23(r) — неоклассический коэффициент пинчевания тепла по Хинтону—Хазелтину;
- ETAЕ(r) — $d \ln(T_e) / d \ln(n)$;
- ETAИ(r) — $d \ln(T_i) / d \ln(n)$;
- FPR(r) — параболический профиль, равный $1 - (r/a)^2$;
- HAALC(r) — аномальная алкаторная теплопроводность, м²/с;
- НАСТЕ(r) — аномальная теплопроводность по СТЕ-моду, м²/с;
- HAED (r) — аномальная теплопроводность на электронной дрейфовой моде, м²/с;
- HAETAИ (r) — аномальная теплопроводность на η_i-моду, м²/с;
- НАММ(r) — аномальная теплопроводность Мережкина — Муховатова, м²/с;
- НАРУУ(r) — аномальная теплопроводность Параила—Юшманова, м²/с;
- HAQ1(r) — аномальная теплопроводность внутри поверхности q = 1, м²/с;

HNCHI(r)	— неоклассическая ионная теплопроводность по Ченгу—Хинтону, $\text{м}^2/\text{с}$;
HNGSBI(r)	— неоклассическая ионная теплопроводность в банановом режиме по Галееву—Сагдееву, $\text{м}^2/\text{с}$;
HNGSI(r)	— неоклассическая ионная теплопроводность по Галееву—Сагдееву, $\text{м}^2/\text{с}$;
HNGSPI(r)	— неоклассическая ионная теплопроводность в режиме плато по Галееву—Сагдееву, $\text{м}^2/\text{с}$;
HNHHE(r)	— неоклассическая электронная теплопроводность по Хинтону—Хазелтину, $\text{м}^2/\text{с}$;
HNHHI(r)	— неоклассическая ионная теплопроводность по Хинтону—Хазелтину, $\text{м}^2/\text{с}$;
HNHH12(r)	— неоклассический коэффициент конвекции тепла за счет ∇n по Хинтону—Хазелтину, $\text{м}^2/\text{с}$;
HNPSI(r)	— неоклассическая ионная теплопроводность в режиме Пфирша—Шлютера, $\text{м}^2/\text{с}$;
NUE(r)	— ν_e — полная частота электронных столкновений, с^{-1} ;
NUEE(r)	— частота электрон-электронных столкновений ν_{ee} , с^{-1} ;
NUI(r)	— полная частота ионных столкновений ν_i , с^{-1} ;
NUPP(r)	— частота протон-протонных столкновений ν_{pp} , с^{-1} ;
PE GN(r)	— плотность вклада мощности в электроны за счет потока частиц, $\text{МВт}/\text{м}^3$;
PEI CL(r)	— электрон-ионный теплообмен за счет кулоновских столкновений, $\text{МВт}/\text{м}^3$;
PEIGN(r)	— электрон-ионный теплообмен за счет потока частиц, $\text{МВт}/\text{м}^3$;
PENEUT(r)	— электронные потери энергии на ионизацию, $\text{МВт}/\text{м}^3$;
PINEUT(r)	— ионный источник тепла за счет ионизации и перезарядки, $\text{МВт}/\text{м}^3$;
PIONZ(r)	— ионный источник тепла за счет ионизации холодных нейтралов, $\text{МВт}/\text{м}^3$;
PICX(r)	— ионный источник тепла за счет перезарядки холодных нейтралов, $\text{МВт}/\text{м}^3$;
PIGN(r)	— вклад мощности в ионы за счет потока частиц, $\text{МВт}/\text{м}^3$;
PITCX(r)	— ионный источник тепла за счет перезарядки хо-

	плотных нейтралов при записи в неявной форме, МВт/м ³ ;
PJOULE(r)	— плотность джоулевого источника нагрева, МВт/м ³ ;
PTOT (r)	— суммарная плотность источников энергии в плазме, МВт/м ³ ;
QEGN (r)	— мощность, вкладываемая в электроны за счет потока частиц, МВт;
QEICL(r)	— мощность вкладываемая в электроны за счет кулоновских столкновений, МВт;
QEIGN (r)	— мощность обмена электронов и ионов за счет потока частиц, МВт;
QETOT(r)	— полная мощность, вкладываемая в электроны, МВт;
QEX(r)	— внешняя мощность, вкладываемая в электроны (за счет PEX), МВт;
QIGN (r)	— мощность, вкладываемая в ионы за счет потока частиц, МВт;
QITOT (r)	— полная мощность, вкладываемая в ионы, МВт;
QIX(r)	— внешняя мощность, вкладываемая в ионы (за счет PIX), МВт;
QJOULE(r)	— мощность джоулевого нагрева, МВт;
QNTOT(r)	— полный источник частиц, 10 ¹⁹ /с;
QNX (r)	— внешний источник частиц (за счет SNX), 10 ¹⁹ /с;
QRADX(r)	— мощность радиационных потерь, МВт;
QTOT(r)	— полная мощность, вкладываемая в плазму, МВт;
SIGVCX(r)	— $\langle \sigma v \rangle$ перезарядки, 10 ¹⁹ м ³ /с;
SIGVDT(r)	— $\langle \sigma v \rangle$ реакции D + T = α + n, 10 ¹⁹ м ³ /с;
SIGVD1(r)	— $\langle \sigma v \rangle$ реакции D + D = n + ³ He, 10 ¹⁹ м ³ /с;
SIGVD2(r)	— $\langle \sigma v \rangle$ реакции D + D = t + p, 10 ¹⁹ м ³ /с;
SIGVIE(r)	— $\langle \sigma v \rangle$ ионизации электронным ударом, 10 ¹⁹ м ³ /с;
SNNEUT(r)	— плотность источника частиц за счет ионизации нейтралов электронным и ионным ударом, м ⁻³ с ⁻¹ ;
SNNIE(r)	— плотность источника частиц за счет ионизации электронным ударом, м ⁻³ с ⁻¹ ;
SNNII(r)	— плотность источника частиц за счет ионизации ионным ударом, м ⁻³ с ⁻¹ ;
WE(r)	— энергосодержание электронов, МДж;
WI(r)	— энергосодержание ионов, МДж;

WTOT(r)	– энергосодержание плазмы, МДж;
BETAPB	– полоидальная β ;
GRAD(Arg)	– градиент (аргумент Arg – переменная из списка 2 или 4);
LINTB	– внутренняя индуктивность;
NEAVB	– средняя по объему плотность, $10^{19}/\text{м}^3$;
NECHC	– средняя по центральной хорде плотность, $10^{19}/\text{м}^3$;
TAUEEB	– электронное энергетическое время, с;
TAUEIB	– ионное энергетическое время, с;
TAUEB	– полное энергетическое время, с;
TAUPB	– время жизни частиц, с;
TEAVB	– средняя по объему температура электронов, кэВ;
TIABV	– средняя по объему температура ионов, кэВ;
FJUMP(T1),	– функции единичного скачка в точке T1 и линей-
FRAMP(T1, T2)	ного нарастания от 0 в точке T1 до 1 в точке T2.

6. *Параметры численного расчета* (см. HLP PARAMETERS и HLP DISPLAY)

KEY, IFBAT	– логические ключи, управляющие режимом работы и обмена программы с внешними устройствами;
NA, NA1	– (NA1 = NA + 1) – число точек сетки по радиусу;
HA	– HA = AB/(NA + 0,5) – шаг сетки по радиусу;
TAU	– текущий шаг по времени, с;
TAUMAX	– (TAUMAX > TAU > TAUMAX/100) – максимальный шаг по времени, с;
ITER	– число итераций в численной схеме;
NITER	– число поколений нейтралов;
DROUT	– временной интервал выдачи радиальных профилей на экран, с;
DTOUT	– интервал вывода зависящих от времени переменных, с;
DCOUT	– промежуток времени, через который производится запись результатов на диск, с;
DTEQ(N)	– интервал времени, с, через который происходит обращение к подпрограмме с номером N.

7. *Библиотечные подпрограммы* (список этих подпрограмм постоянно расширяется по мере разработки; полный список можно получить, набрав HLP SUBROUTINES; подробная информация о каждой подпрограмме будет напечатана при наборе HLP name)

CNSTNE	– подпрограмма поддерживает постоянную среднехордовую плотность, равную начальному значению;
--------	--

SETNE(NEGIVN, NESLOP)	} — подпрограммы обеспечивают выход средней по объему (SETNE) и средне-хордовой (FIXNE) плотности на заданное значение NEGIVN, $10^{19}/\text{м}^3$, со скоростью NESLOP, $10^{19} \text{ м}^3/\text{с}$;
FIXNE(NEGIVN, NESLOP)	
GNXSRC	— вычисление стационарного потока частиц за счет ионизации нейтральных атомов;
NEUT(ENC, ENW)	— расчет распределения NN и температуры TN нейтральных атомов (ENC и ENW — энергии холодной и теплой компонентнейтралов, летящих со стенки).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Уравнения, граничные условия и разностная схема

1. Уравнения

Вид транспортных уравнений в гауссовой системе единиц дан в основном тексте [см. (6) — (7)]. Перепишем эти же уравнения с некоторыми дополнительными деталями и разъяснениями в той системе единиц, которая принята в ТКМ:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(DN \frac{\partial n}{\partial r} + HN \frac{n}{T_e} \frac{\partial T_e}{\partial r} + XN \frac{n}{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial r} - \right. \right. \\ \left. \left. - \underline{CN} \cdot n \cdot V_p \right) \right] + \underline{SN} + n \cdot \underline{SNN}; \quad (\text{П. 1})$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial (nT_e)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left((HE + \frac{5}{2} HN)n \frac{\partial T_e}{\partial r} + (DE + \frac{5}{2} DN)T_e \frac{\partial n}{\partial r} + \right. \right. \\ \left. \left. + (XE + \frac{5}{2} XN)n \frac{T_e}{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial r} - (CE + \frac{5}{2} CN)nT_e V_p - \frac{5}{2} T_e \Gamma_x \right) \right] + \\ + 625 \cdot (\underline{PE} + T_e \cdot \underline{PET}); \quad (\text{П.2})$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial(nT_i)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left((XI + \frac{5}{2} XN) n \frac{\partial T_i}{\partial r} + (DI + \frac{5}{2} DN) T_i \frac{\partial n}{\partial r} + (HI + \frac{5}{2} HN) n \frac{T_i}{T_e} \frac{\partial T_e}{\partial r} - (CI + \frac{5}{2} CN) n T_i V_p - \frac{5}{2} T_i \Gamma_x \right) \right] + 625 \cdot (PI + T_i \cdot PIT); \quad (П. 3)$$

$$0,4 \pi CC \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) - 0,8 \pi^2 R \left[CD + \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{r \mu B_z} \times \left(HC \cdot n \frac{\partial T_e}{\partial r} + DC T_e \frac{\partial n}{\partial r} + XC n \frac{T_e}{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) \right]. \quad (П. 4)$$

Здесь подчеркнуты те члены уравнений, которые входят в генерируемую программу только в том случае, если описание модели содержит эти величины в левой части управляющих строк (см. разд. 4). Эти величины имеют следующие размерность и смысл:

DN, HN, XN, DE, HE, XE, DI, HI, XI,	— коэффициенты переноса, m^2/c ;
CN, CE, CI, DC, HC, XC	— то же, безразмерные;
CC	— проводимость, $(m\Omega \cdot m)^{-1}$ или $MA/(B \cdot m)$;
SN	— источники частиц, $10^{19}/(m^3 \cdot c)$;
SNN	— то же, c^{-1} ;
PE, PI	— источники тепла, $MBт/m^3$;
PET, PIT	— то же, $MBт/(m \cdot кэВ)$;
CD	— источник тока, MA/m^2 .

Напомним, что уравнения (П. 2) и (П. 3) содержат члены с коэффициентами DN, HN, XN, CN тогда и только тогда, когда способ пересчета (см. разд. 4) имеет тип FULL. В противном случае подразумевается, что конвективный поток тепла включен в другие члены уравнения. Одна из возможностей задания конвективного переноса тепла связана с использованием слагаемого Γ_x в уравнениях для T_e и T_i . Вообще говоря, в уравнениях переноса такое слагаемое отсутствует [см. (6), (7)]. Однако в программу оно введено для того, чтобы можно было задавать поток частиц явным образом, взяв его, например, из эксперимента или как интеграл от источника частиц

$$\Gamma_x = \frac{1}{r} \int_0^r r(SN + n \cdot SNN) dr \equiv GNXSRC.$$

Подчеркнем, что такая процедура имеет смысл, если уравнение для n не решается, а коэффициенты DN , HN , XN , CN не определены или, что то же самое, равны нулю.

Выпишем для справок некоторые формулы, связывающие различные физические величины в системе единиц ТКМ:
поток частиц, $10^{19} / (m^2 c)$:

$$\Gamma = - DN \frac{\partial n}{\partial r} - HN \frac{n}{T_e} \frac{\partial T_e}{\partial r} - XN \frac{n}{T_e} \frac{\partial T_i}{\partial r} + CN \cdot n V_p + \Gamma_x;$$

напряжение обхода, В:

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial t};$$

плотность тока, MA/m^2 :

$$j = \frac{10}{8\pi^2 B_r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right);$$

обратный коэффициент запаса устойчивости:

$$\frac{1}{q} = \mu = \frac{1}{2\pi r B_r} \frac{\partial \Psi}{\partial r};$$

полный ток, МА:

$$I_p = \frac{5r}{2\pi R} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \Big|_{r=a};$$

закон Ома:

$$\sigma U = 2\pi R(j - j_{ext} - j_b);$$

бутстреп-ток, MA/m^2 :

$$j_b = - \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{B_\theta} \left(HC \cdot n \cdot \frac{\partial T_e}{\partial r} + DC T_e \frac{\partial N_e}{\partial r} + XC n \frac{T_e}{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right);$$

скорость пинчевания, м/с:

$$V_p = \frac{U}{2\pi R B_\theta} = \frac{U}{2\pi r \mu B_z};$$

Физические величины выражаются в обозначениях ТКМ следующим образом:

Обозначение в формуле	Обозначение в ТКМ	Единица измерения	Физический смысл
t	TIME	с	Время
r	FR	м	Радиус магнитной поверхности
n	NE	$10^{19}/\text{м}^3$	Плотность плазмы
T_e	TE	кэВ	Электронная температура
T_i	TI	кэВ	Ионная температура
Ψ	FP	В.с	Полоидальный поток
V_p	VP	м/с	Дрейфовая скорость по полоидальному полю
σ	CC	$(\text{мкОм.м})^{-1}$	Проводимость
π	GP		Число
R	RTOR	м	Большой радиус
a	AB	м	Малый радиус
j_{ext}	CD	МА/м ²	Плотность стороннего тока
B_z^2	BTOR	Тл	Тороидальное магнитное поле
Γ	GN	$10^{19}/(\text{м}^2\text{с})$	Поток частиц
U	UT	В	Напряжение обхода
j	CU	МА/м ²	Плотность тока
μ	MU		Вращательное преобразование
I_{pe}	IPL	МА	Полный ток плазмы
U_{ext}	UEXT	В	Напряжение индуктора
L_{ext}	LEXT	мкГн	Внешняя индуктивность
Γ_x	GNX	$10^{19}/(\text{м}^2\text{с})$	Внешний поток частиц

2. Граничные условия

В уравнениях для n, T_e и T_i используются граничные условия первого рода, т.е. заданное значение функции на границе. Например, запись

$$NEB = \text{FRAMP}(0., 0.1)$$

$$TEB = TIB$$

показывает, что значение плотности на границе плазмы $n|_{r=a}$ будет изменяться с течением времени по закону, определенному функцией FRAMP, значение $T_e|_{r=a}$, начиная с первого шага по времени будет совпадать с граничным значением $T_i|_{r=a}$. Отсутствие в левых частях формул величины TIB означает, что величина $T_i|_{r=a}$ определена начальными условиями и в последующем не меняется.

Краевым условием для Ψ служит закон электромагнитной индукции Фарадея

$$L \frac{dI_{pl}}{dt} + U_{pl} = U_{ext},$$

где $L dI_{pl}/dt$ — изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную некоторым замкнутым контуром, лежащим на границе плазмы, и обусловленное изменением тока плазмы; $U_{pl} = U|_{r=a}$ — напряжение обхода по этому контуру; U_{ext} — изменение магнитного потока через ту же поверхность, обусловленное индуктором и управляющими обмотками. Важными частыми случаями этого краевого условия являются условия заданного тока

$$I_{pl} = I(t) \quad (L = \infty \text{ при } I_{pl}(t) = \text{const})$$

и заданного напряжения обхода ($L = 0$)

$$U_{pl} = U_{ext}(t).$$

Определяется краевое условие для Ψ описанием (появлением в левой части формулы) двух величин: IPL и UEXT. Различаются следующие возможности:

- 1) IPL — описано; описание UEXT игнорируется — заданный ток;
- 2) IPL — не описано; UEXT — не описано — постоянный ток;
- 3) IPL — не описано; UEXT — описано — уравнение цепи (случай $L = 0$ соответствует заданному напряжению обхода).

На магнитной оси (при $r = 0$) во всех случаях подразумевается граничное условие второго рода — равенство нулю потоков тепла, частиц и пологидального потока.

3. Разностная схема

Транспортное уравнение можно записать в общем виде

$$\frac{\partial(nu)}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(A \frac{\partial u}{\partial r} + Bu) \right] + C + Du.$$

Это уравнение аппроксимируется следующей разностной схемой:

$$r_i \frac{h^2}{\tau} (n_i u_i - \check{n}_i \check{u}_i) = r_{i+1/2} \check{A}_{i+1/2} (u_{i+1} - u_i) - r_{i-1/2} \check{A}_{i-1/2} \times \\ \times (u_i - u_{i-1}) + h(r_{i+1/2} \check{B}_{i+1/2} u_{i+1/2} - r_{i-1/2} \check{B}_{i-1/2} u_{i-1/2}) + r_i h^2 (\check{C}_i + \check{D}_i u_i).$$

Здесь обозначено

$$r_i = (i - \frac{1}{2})h; \quad f_i = f(r_i, t + \tau); \quad \check{f}_i = f(r_i, t);$$

$$f_{i+1/2} = (f_i + f_{i+1})/2; \quad h = a/(NA + 0,5).$$

Полученная система алгебраических уравнений решается последовательной прогонкой. В правой части транспортного уравнения источник разбит на две части, с тем чтобы по желанию физика его можно было описывать явно или неявно. Если исключить влияние источника, то для линейной задачи (A и B не зависят от u) разностная схема безусловно устойчива. При наличии зависимостей $A(u)$, $B(u)$ в разностной схеме используется значение неизвестной функции $u(r,t)$ с предыдущего слоя, т.е. $A(\check{u})$ и $B(\check{u})$. В этом случае для повышения порядка аппроксимации схемы и точности расчета используется схема с итерациями. Количество итераций определяется значением параметра ITER. Обычно итерации не требуются и ITER = 1.

В реальном расчете неустойчивость, как правило, бывает связана с недифференциальными членами (источниками и стоками) в правой части уравнения. При уменьшении шага по времени эта неустойчивость может быть подавлена. В программе ТКМ используется автоматический выбор шага по времени τ по правилу

$$\tau = \check{\tau} / \max(0,9, 10 \cdot \left| \frac{\check{u}}{u} - 1 \right|),$$

но при этом диапазон изменения τ ограничен неравенством

$$\frac{\tau_{\max}}{100} \leq \tau \leq \min(\tau_{\max}, D\tau_{\text{out}})$$

где τ_{\max} определяется физиком и имеет масштаб $0,2\tau_E$. Этот алгоритм во всех проведенных расчетах показал хорошие результаты.

Препринт ИАЭ-4545/15. М., 1987