УДК 621.039.616

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В МОДЕРНИЗИРОВАННОМ ТОКАМАКЕ Т-15

В.Н. Докука¹, А.А. Кавин², В.Э. Лукаш¹, М.М. Соколов¹, Р.Р. Хайрутдинов¹, В.А. Хайрутдинова¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия²ОАО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена тестированию двухконтурной системы управления током, формой и положением плазмы в токамаке Т-15. Основной целью системы магнитного управления является обеспечение эволюции тока и формы плазмы в соответствии с их программными сценариями на протяжении всего плазменного разряда. Программные сценарии для токов в обмотках полоидального поля и ряда контролируемых параметров, необходимых для моделирования магнитного управления плазмой, были разработаны на основе предварительно рассчитанных в определённые моменты сценария разряда равновесий. На лимитерной и диверторной стадиях сценария применяются различные виды регуляторов. Моделирование выполнено с помощью кода ДИНА в рамках системы МАТЛАБ-Симулинк. Представлены результаты моделирования омического сценария и сценария с дополнительным нагревом.

Ключевые слова: система контроля, сценарий, плазма, ток, форма, равновесие.

NUMERICAL SIMULATION OF PLASMA CONTROL IN MODERNIZED TOKAMAK T-15

V.N. Dokuka¹, A.A. Kavin², V.E. Lukash¹, M.M. Sokolov¹, R.R. Khayrutdinov¹, V.A. Khayrutdinova¹¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia²D.V. Efremov Institute, Sankt-Peterburg, Russia

The paper is devoted to testing of two-loop system for current, shape and position control in T-15 tokamak plasma. The main goal of magnetic control system using is to provide the evolution of plasma current and shape according to their programmed scenarios on all duration of plasma discharge. The programmed scenarios for poloidal field currents and for a set of controlled parameters required for modeling of the plasma magnetic control were developed by using the preliminary calculated equilibriums (snapshots) at specific time moments of discharge scenario. The different kinds of controllers are applied on limiter and divertor stages of scenario. Modeling is carried out by DINA code using in frame of MATLAB-Simulink environment. The results of simulations for ohmic and auxiliary heating scenarios are presented.

Key words: control system, scenario, plasma, current, shape, equilibrium.

ВВЕДЕНИЕ

Модернизация токамака Т-15 предполагает разработку установки, которая позволяет в числе многих задач исследовать проблемы создания и эволюции диверторных магнитных конфигураций и связанные с этим задачи магнитного управления формой и положением плазменного шнура, рассмотрение которых необходимо с целью синтеза прототипов алгоритмов управления плазмой проектируемого токамака ИТЭР. Модернизированный токамак Т-15 предполагает работу как в омическом режиме, так и в режиме с дополнительным нагревом [1] с использованием системы магнитного управления током, положением плазмы и её формой.

В представленной работе рассматриваются результаты численного моделирования управляемых сценариев с омическим и дополнительным нагревом с использованием плазмозфизического кода ДИНА [2] со свободной границей плазмы. Сценарий включает в себя стадию ввода плазменного тока и стадию квазистационарного разряда. В работе рассмотрена конфигурация полоидальной магнитной системы модернизированного токамака Т-15, а также её параметры перед пробоем и после пробоя разряда, приведена постановка задачи, включающая в себя описание плазмозфизической модели и алгоритмы магнитного управления током, положением и формой плазмы с указанием управляемых параметров на лимитерной и диверторной стадиях разряда, а также структуры системы управления, описана используемая для решения поставленной задачи схема Simulink модели управления плазмой, приведены результаты моделирования плазмозфизических параметров в процессе управления, а также эволюции электрофизических параметров полоидальной магнитной системы токамака Т-15 в режиме омического разряда, приведены результаты моделирования параметров плазмы в разряде с дополнительным нагревом и выводы.

ПОЛОИДАЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ТОКАМАКА T-15

Используемая в расчётах конфигурация полоидальной магнитной системы вместе с вакуумной камерой и пассивными элементами токамака T-15 представлена на рис. 1. Катушки CSU, CSC и CSL используются в качестве основного источника магнитного потока. Полоидальные катушки PF1—PF6 используются для компенсации рассеянных магнитных полей на стадии пробоя и магнитного управления положением и формой плазмы соответственно на стационарной стадии разряда. Катушки HFC используются для управления положением плазмы по вертикали. В качестве пассивной магнитной системы рассматриваются элементы вакуумной камеры, пассивные медные элементы PS и диверторные пластины DIV. Начальное значение плазменного тока, с которого начинается управляемый сценарий ввода тока и для которого получена равновесная конфигурация плазмы для данного варианта конфигурации полоидальной магнитной системы токамака T-15, принято на уровне 130 кА.

На рис. 2 показано распределение полоидального магнитного потока в момент перед пробоем, когда величина рассеянного магнитного поля от катушек соленоида в области пробоя не превышает ~10 Гс за счёт его компенсации с помощью полоидальных катушек управления. При этом запас полоидального магнитного потока без учёта перематнивания катушек соленоида перед пробоем составляет ~3,5 Вб. Соответствующие значения токов в катушках полоидального магнитного поля приведены в табл. 1. На рис. 3 изображена равновесная конфигурация плазмы T-15 после пробоя, в начале

Таблица 1. Токи в катушках полоидальной магнитной системы, обеспечивающие магнитные конфигурации T-15 перед пробоем и после пробоя, в начале управляемого тока при токе плазмы $I_p = 130$ кА

Катушка	Ток в катушке, МА-виток	
	перед пробоем	в начале управляемого ввода тока
CSU	14,7	9,8
CSC	11,3	9,4
CSL	14,8	9,9
PF1	0,2	1,7
PF2	-0,04	-0,4
PF3	0,11	0,15
PF4	0,15	0,1
PF5	-0,04	-0,47
PF6	0,43	4,7
Ψ_{ext} , Вб	~3,5	~2,6

Рис. 1. Конфигурация полоидальной магнитной системы токамака T-15 вместе с вакуумной камерой и пассивными элементами

Рис. 2. Распределение полоидального магнитного потока в вакуумном объёме T-15 в момент перед пробоем ($t = 0$)

Рис. 3. Равновесие плазмы токамака T-15 перед началом управляемого ввода тока ($t = 0,1$ с, $I_p = 130$ кА)

управляемого ввода тока, с внутренней стороны вакуумной камеры при плазменном токе 130 кА. Соответствующие токи в катушках полоидальной магнитной системы, обеспечивающие эту конфигурацию, также приведены в табл. 1. Предполагается, что затраты полоидального потока на процесс пробоа и начальный неуправляемый ввод плазменного тока до уровня 130 кА равны $\sim 0,9$ Вб.

В данной работе представлены результаты расчётов индукционного ввода тока в плазму Т-15 до 2 МА с выходом плазмы на диверторную магнитную конфигурацию, а также поддержание этой величины плазменного тока до момента времени, когда значение тока в модулях центрального соленоида достигнет критического уровня, равного $I_{CS} = -10$ МА-витков.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Описание физической модели. Физическая модель использованного для моделирования кода ДИНА включает в себя осесимметричное двумерное уравнение равновесия плазмы со свободной границей во внешних магнитных полях, которое решается самосогласованно с одномерными, усреднёнными по тороидальным магнитным поверхностям уравнениями переноса электронной и ионной энергии, а также полоидального магнитного потока. Кроме того, физическая модель включает в себя систему контурных уравнений для тороидально симметричных элементов пассивной стабилизации, а также катушек активной стабилизации, которые создают внешнее по отношению к плазме полоидальное магнитное поле. Эти катушки являются активаторами системы магнитного управления током, положением и формой плазмы токамака в процессе разряда.

Система управления. При моделировании сценария разряда использовалась общепринятая структура системы управления положением, током и формой плазмы, состоящая из двух контуров. «Быстрый» контур обеспечивает стабилизацию скорости вертикального движения плазмы (входные сигналы — скорость вертикального движения плазмы и ток обмотки HFC) на коротком масштабе времени, обусловленном инкрементом вертикальной неустойчивости вытянутой плазмы. «Медленный» контур управляет током и формой плазмы, обеспечивая требуемую конфигурацию плазмы с заданным током с помощью девяти полоидальных обмоток (PF1—PF6, CS) на более длительном масштабе времени. Управление напряжениями этих обмоток так же, как и управление напряжением обмотки HFC, осуществляется через регулятор обратной связи по входным сигналам согласно (1)

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_{\text{ref}}) \\ \mathbf{U}_{\text{fb}} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_{\text{ref}}) \end{cases}, \quad (1)$$

здесь $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$ — матрицы регулятора; $\mathbf{x}$ — внутренний переменный вектор; $\mathbf{U}_{\text{fb}}$ — напряжение на обмотках, генерируемое регулятором; $\mathbf{y}$, $\mathbf{y}_{\text{ref}}$ — входные сигналы регулятора и, соответственно, их программные значения.

Разделение масштаба времени между контурами (более медленное управление током и формой плазмы) осуществляется при синтезе регулятора по форме и току плазмы.

Система магнитного управления должна обеспечить поддержание параметров плазмы в соответствии с их программными значениями как на лимитерной, так и на диверторной стадиях разряда. При разработке системы управления целесообразно использование различных регуляторов управления формой и током плазмы для лимитерной и диверторных конфигураций.

На лимитерной стадии магнитное управление осуществляется 13 параметрами:

— R_{max} — положение радиальной координаты точки на границе плазменного шнура, наиболее удалённой от центра симметрии;

— κ — вытянутость плазмы в вертикальном направлении;

— Z_{axis} — вертикальное положение магнитной оси;

— I_p — ток плазмы;

— I_{PF} , I_{CS} — токи в катушках полоидальной магнитной системы (9 токов).

На диверторной стадии магнитное управление осуществляется 16 параметрами:

- g_1, g_2 — отклонения услов сепаратрисы от референсных точек на контуре первой стенки;
- g_3 — положение максимальной радиальной координаты точки на границе плазменного шнура;
- g_4 — положение верхней точки плазменного шнура;
- g_5 — положение минимальной радиальной координаты точки на границе плазменного шнура;
- I_p — ток плазмы;
- I_{PF}, I_{CS} — токи в катушках полоидальной магнитной системы (9 токов);
- I_{HFC} — ток в обмотке управления вертикальным положением плазмы.

МОДЕЛЬ SIMULINK УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ T-15

Моделирование сценария разряда в токамаке T-15 с учётом системы магнитного управления положением, током и формой шнура выполнено с использованием системы Simulink, являющейся расширением системы инженерных и научных расчётов MATLAB. В системе Simulink модель управления объектом разрабатывается на основе структурной схемы, где все функциональные подсистемы (блоки) и их взаимосвязи полностью определены и остается только заменить их соответствующими математическими моделями, выполненными в виде соответствующих функциональных блоков. Модель системы магнитного управления плазмой в токамаке T-15 включает в себя объект управления — модель плазмы, выполненная на основе кода ДИНА [3, 4]. На рис. 4 представлена модель Simulink, использованная при моделировании системы управления плазмой в сценарии с омическим нагревом.

На третий вход блока модели плазмы со стороны блока системы управления поступает задающее воздействие в виде напряжений на обмотках полоидального поля. Входными параметрами блока магнитного управления служат значения токов в обмотках полоидального поля, ток плазмы и геометрические параметры плазменного шнура.

Рис. 4. Simulink-модель системы магнитного управления плазмой в токамаке T-15 в омическом сценарии разряда

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКОГО СЦЕНАРИЯ РАЗРЯДА T-15

Результаты моделирования омического сценария разряда в плазме T-15 охватывают стадию подъёма тока плазмы до величины 2 МА в течение времени $\sim 1,5$ с и стадию стационарного разряда продолжительностью $\sim 0,5$ с. В расчётах переноса тепла в омическом сценарии разряда используется скейлинг T-11 для электронов и неоклассика для ионов. Профиль плотности плазмы в процессе моделирования считается фиксированным и имеющим параболическую форму с плотностью на границе, равной 0,9 от плотности в центре. При моделировании учитывается вклад бутстреп-тока I_{bs} .

Модель магнитного управления (1) предполагает задание программных значений контролируемых параметров y_{ref} как на лимитерной, так и диверторной фазах сценария. Эти параметры находятся в процессе расчёта неуправляемого сценария с учётом расхода полоидального магнитного потока, необходимого на подъём плазменного тока и компенсацию резистивных потерь на стационарной стадии разряда. Неуправляемый сценарий рассчитывался в соответствии с эволюцией формы плазменного шнура, которая специфицировалась в характерные моменты развития разряда.

Управление положением и формой плазмы на лимитерной стадии разряда определяется положением радиальной координаты точки на границе плазменного шнура, наиболее удалённой от центра симметрии ($R_{\max}$), вытянутостью плазмы в вертикальном направлении (κ) и вертикальным положением магнитной оси (Z_{axis}). На диверторной стадии магнитное управление формой плазмы осуществляется в соответствии со специфицированным положением пяти контрольных точек g_1 — g_5 на границе плазменного шнура в характерные моменты времени.

Полученные в результате моделирования неуправляемого сценария данные, касающиеся значений плазменного тока, формы плазмы и токов в катушках полоидальной магнитной системы, использованы в качестве программных значений в модели управления (1). Самосогласованное моделирование по коду ДИНА управляемого сценария выполняется с учётом минимизации вектора ошибок между выходными расчётными параметрами и соответствующими программными значениями.

Моделирование омического сценария начинается с момента времени $t = 0,1$ с, в который плазма имеет почти круглую форму сечения с малым радиусом $a \cong 0,35$ м. Согласно сценарию разряда в плазме Т-15 одновременно с ростом плазменного тока линейно по времени увеличивается средняя плотность плазмы, которая достигает при номинальной величине плазменного тока на стационарной стадии разряда значения $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Развитие лимитерной стадии заканчивается при $t \cong 1,19$ с. В этот момент времени малый радиус плазмы находится на уровне $a \cong 0,65$ м, положение магнитной оси $R_{\text{mag}} \cong 1,55$ м, $Z_{\text{mag}} \cong 0,08$ м, величина плазменного тока близка к номинальной $I_p \cong 1,6$ МА. Вслед за этим формируется магнитная конфигурация плазмы, соответствующая началу диверторной стадии с образованием нижней X-точки. Далее в течение 0,3 с подъём тока плазмы продолжается до уровня 2 МА.

На рис. 5, 6 показаны отклонения контролируемых геометрических параметров шнура от их программных значений соответственно на лимитерной и диверторной стадиях омического разряда. В процессе развития лимитерной стадии разряда максимальные отклонения геометрических параметров плазмы от своих программных значений не превышают 5—6 см на рассматриваемой стадии разряда. При этом отклонения вытянутости шнура от программных данных остаются в интервале 5—7%. На рис. 6 видно, что наибольшие отклонения зазоров между плазмой и вакуумной камерой от их программных значений наблюдаются в промежутке между моментом образования диверторной конфигурации и моментом окончания стадии ввода плазменного тока. Проблемными с точки зрения магнитного управления оказываются положения усов сепаратрисы g_1 — g_2 , а также положение верхней точки сепаратрисы g_3 . После выхода на стадию плато тока отклонения по всем контролируемым параметрам формы не превышают 1 см. Отметим, что регулятор обеспечивает достаточно хорошее совпадение контролируемых параметров с их программными значениями.

Рис. 5. Отклонение управляемых геометрических параметров шнура от их программных значений в процессе развития лимитерной стадии разряда

Рис. 6. Отклонение зазоров g_1 — g_5 от своих программных значений в процессе развития диверторной стадии разряда:
— g_1 ; — g_2 ; — g_3 ; — g_4 ; - - g_5

Результаты моделирования показывают, что система магнитного управления обеспечивает хорошее качество управления процессом ввода тока в плазму токамака Т-15. На рис. 7 представлена динамика ввода плазменного тока. Здесь же приводится эволюция бутстреп-тока, величина которого на стадии плато тока в режиме омического нагрева не превышает 7% от полного тока плазмы. Отметим, что согласно сценарию разряда средняя плотность плазмы $\langle n_{20e} \rangle$ линейно растёт на стадии ввода тока плазмы и достигает своего стационарного значения вместе с выходом тока плазмы на плато.

Рис. 7. Динамика плазменного тока I_p (—), бутстреп-тока I_{bs} (—), I_p программ (•) (а), средней плотности плазмы $\langle n_{20e} \rangle$ (б) в процессе развития омического разряда

На рис. 8 представлен ряд плазменных магнитных конфигураций в характерные моменты развития разряда. На лимитерной стадии разряда контроль формы ведётся по положению контрольной точки 3,

Рис. 8. Эволюция плазмы в процессе ввода тока и развития стадии плато тока в сценарии с омическим нагревом плазмы: а — начальная конфигурация плазмы, $I_p = 0,13$ МА, $t = 0,09$ с; б — конфигурация плазмы на лимитерной стадии развития разряда, $I_p = 0,9139$ МА, $t = 0,7$ с; в — конфигурация плазмы на момент перехода в диверторную стадию, $I_p = 1,5806$ МА, $t = 1,193$ с; г — конфигурация плазмы на момент выхода на плато тока, $I_p = 1,9737$ МА, $t = 1,519$ с

вертикальному положению центра плазмы (значок «+») и величине вытянутости плазмы по вертикали. На диверторной стадии контролируются отклонение усов сепаратрисы от заданных точек 1, 2 и положение точек на границе плазмы 3—5.

На рис. 9 приводится конфигурация плазмы на момент окончания стационарной стадии разряда. Представление о характере изменения магнитной конфигурации в процессе развития омического сценария разряда даёт рис. 10.

Рис. 9. Конфигурация плазмы на момент окончания стадии плато тока, $I_p = 1,9876$ МА, $t = 2$ с

Рис. 10. Эволюция магнитной конфигурации в процессе развития омического сценария разряда

На рис. 11, 12 показана эволюция токов в катушках полоидальной магнитной системы вместе с их программными значениями, обозначенными синими точками. Кроме того, на рис. 13 представлены токи в «быстрой» обмотке HFC управления плазмой по вертикали, а также токи в медных витках пассивной стабилизации, размещённых на внешнем обводе вакуумной камеры I_{pass} и в стальных пластинах, расположенных в нижней части камеры I_{div} .

Рис. 11. Динамика токов I_{CSU} (а), I_{CSC} (б), I_{CSL} (в) в секциях индуктора и ток I_{PFI} (г) в обмотке управления формой плазмы в процессе моделирования омического сценария: • — программа; — ДИНА

Рис. 12. Динамика токов I_{PF2} (а), I_{PF3} (б), I_{PF4} (в), I_{PF5} (г) в обмотках управления формой плазмы в процессе моделирования оми-ческого сценария: $\bullet$ — программа; — ДИНА

Рис. 13. Динамика тока I_{PF6} в обмотке управления формой плазмы: $\bullet$ — программа, — ДИНА (а), тока I_{HFC} в «быст-рой» обмотке управления плазмы по вертикали (б) и токи в элементах пассивной структуры I_{pass} (в), тока I_{div} : — левая пластина; - - - правая пластина (г) в процессе оми-ческого сценария

На рис. 14 представлена эволюция выходных напряжений блока магнитного управления плазмой, приложенных к обмоткам индуктора CSL, CSC, CSU, обмоткам управления формой PF1—PF6 и «быстрой» обмотке управления плазмой по вертикали HFC. Видно, что напряжения достигают уровней насыщения в обмотках индуктора CSC, CSU, а также во всех обмотках управления, исключая PF3.

Рис. 14. Выходные напряжения блока магнитного управления плазмой, приложенные к обмоткам: *a* — индукторов CSL (---), CSC (—), CSU (—); *б* — управления формой PF1 (—), PF2 (—), PF3 (—), PF4 (---), PF5 (---), PF6 (---); *в* — «быстрой» обмотке управления плазмой по вертикали HFC в процессе омического сценария

Эволюция физических параметров плазмы, полученных в процессе моделирования омического разряда, представлена на рис. 15—18.

Рис. 15. Динамика положения магнитной оси (*a*) и малого радиуса плазмы (*б*) в процессе омического сценария

Рис. 16. Эволюция электронной T_e (—), ионной T_i (—) температуры в центре плазмы (*a*) и энергетического времени τ_E (*б*) в процессе омического сценария

Рис. 17. Динамика треугольности δ_{95} (а), внутренней индуктивности плазменного шнура $I_i(3)$ (б), вытянутости κ_{95} (в), запаса устойчивости на магнитной оси q_0 (—) и границы плазмы q_{95} (—) (г) в процессе омического сценария

Рис. 18. Эволюция резистивного напряжения плазменного шнура (а), полоидальных потоков на магнитной оси от обмоток Ψ_{CS+PF} (---), плазмы Ψ_p (—), суммарного потока $\Psi_{CS+PF+p}$ (—), а также резистивных потерь Ψ_{res} (—) в процессе омического сценария (б)

Результаты приведённого численного анализа сценария омического разряда в плазме Т-15 показывают, что продолжительность стационарной стадии разряда при максимальной величине плазменного тока на уровне 2 МА не превышает $\sim 0,5$ с. Это связано с быстрым достижением предельной величины тока -10 МА-витков в катушке CSC центрального соленоида, что показано на рис. 11. Увеличение длительности стационарной стадии разряда возможно за счёт использования дополнительного нагрева, позволяющего снизить расход полоидального магнитного потока за счёт увеличения электропроводности плазмы.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЦЕНАРИЯ РАЗРЯДА Т-15 С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВОМ

Как было показано, в условиях омического нагрева можно поддерживать режим стационарного разряда в течение не более 0,5 с. В сценарии с дополнительным нагревом плазмы возможно продлить длительность этого режима примерно до 2 с при максимальной величине плазменного тока 2 МА. В качестве источников дополнительного нагрева в токамаке Т-15 предполагается использование нейтральной инжекции атомов дейтерия и ЭЦ-волны. Увеличение длительности связано как с ростом электропроводности плазмы, так и с генерацией токов увлечения в случае тангенциальной инжекции. В соответствии с проектом токамака Т-15 мощность нейтральной инжекции пучка атомов дейтерия с энергией 75 кэВ составляет 8 МВт, мощность электронно-циклотронного нагрева 5 МВт. Согласно предварительным оценкам после перезарядки на выходе инжектора получают атомы с энергией 75/37,5/25 кэВ и с распределением по мощности 0,58/0,29/0,13 соответственно. Размер пучка по вертикали и горизонтали составляет 80×30 см при величине прицельного параметра 117 см. Инжекция ведётся параллельно экваториальной плоскости токамака.

Для моделирования сценария разряда в плазме с дополнительным нагревом разработана модель Simulink, включающая внешний блок, обеспечивающий расчёт и передачу на вход блока ДИНА профилей нагрева и токов увлечения. На рис. 19 представлена модель Simulink с модулем расчёта нейтральной инжекции и ЭЦ-нагрева, используемым для вычисления профилей нагрева плазмы и токов увлечения при моделировании системы управления в сценарии с дополнительным нагревом. Структура блока представлена на рис. 20, на котором отдельно показаны модули расчёта нейтральной инжекции и ЭЦ-нагрева. Обмен данными между модулями обеспечивается средствами системы Simulink на каждом временном шаге.

Рис. 19. Simulink-модель системы управления плазмой с дополнительным нагревом плазмы

Рис. 20. Структура блока расчёта профилей нагрева и токов увлечения

Нейтральный пучок с учётом разбиения по группам моделируется набором ниточных пучков с сеткой 25×9 соответственно по вертикали и горизонтали. Предполагается экспоненциальное распределение мощности пучка по его сечению. Распределение мощности ЭЦ-нагрева определяется заданием положения центра и полуширины зоны поглощения.

Рис. 21. Сценарии нагрева компонентов плазмы пучками быстрых нейтралов и гиротронами: — el, — ion, --- tot

На рис. 21 показаны сценарии нагрева ионов и электронов плазмы пучками быстрых нейтралов и гиротронами. Мощность ЭЦ-нагрева составляет 5 МВт, которая включается в момент времени 0,8 с. Через 0,5 с после этого включаются пучки быстрых нейтралов мощностью 8 МВт. Программные сценарии для тока плазмы, токов в катушках полоидального поля, а также для контролируемых параметров плазмы были разработаны

в предположении использования скейлинга IPB98(y, 2) с фактором улучшения $H_{(y, 2)} = 1,4$ в режиме с дополнительным нагревом.

На рис. 22 представлена эволюция отклонений контролируемых зазоров между границей плазмы и вакуумной стенкой для сценария с дополнительным нагревом плазмы. Наибольшие отклонения зазоров наблюдаются в интервале между моментом образования диверторной конфигурации и моментом окончания стадии ввода тока плазмы. На стадии плато тока отклонения по всем контролируемым параметрам формы не превышают 0,5 см.

На рис. 23 показаны расчётные токи с их программными значениями в обмотках индуктора в сценарии с дополнительным нагревом. Программный сценарий тока плазмы I_p вместе с данными моделирования эволюции тока плазмы, бутстреп-тока I_{bs} и токов увлечения I_{NBSD} в процессе разряда с дополнительным нагревом плазмы, а также сценарий изменения средней плотности плазмы $\langle n_{e20} \rangle$ представлены на рис. 24.

Эволюция физических параметров плазмы в процессе моделирования омического разряда представлена на рис. 25—28. Как видно на рис. 25, после выхода на плато тока наблюдается стабилизация положения магнитной оси Z_{mag} , R_{mag} и малого радиуса плазмы a . Примерно с этого момента отмечается выход на стационарные значения электронной T_e и ионной T_i температуры в центре плазмы, а также энергетического времени τ_E в сценарии с дополнительным нагревом (см. рис. 26).

Рис. 22. Отклонение зазоров g_1 — g_5 от своих программных значений в процессе развития диверторной стадии разряда:

— g_1 , — g_2 , — g_3 , — g_4 , — g_5

Рис. 23. Динамика токов I_{CSU} (а), I_{CSC} (б), I_{CSL} (в) и их программные данные (•) в секциях индуктора в сценарии с дополнительным нагревом

Рис. 24. Динамика средней плотности плазмы $\langle n_{e20} \rangle$ (а), плазменного тока I_p (—•—), бутстреп-тока I_{bs} (—•—), токов увлечения I_{NBSD} (---) (б) в процессе развития разряда с дополнительным нагревом

Рис. 25. Динамика положения: a — магнитной оси Z_{mag} , b — R_{mag} (—), малого радиуса плазмы a (—) в сценарии с дополнительным нагревом

Рис. 26. Эволюция электронной T_e (—), ионной T_i (—) температуры в центре плазмы (a), энергетического времени τ_E (b) в сценарии с дополнительным нагревом

Рис. 27. Динамика треугольности δ_{95} (a), внутренней индуктивности плазменного шнура $I_i(3)$ (b), вытянутости κ_{95} (c), запаса устойчивости на магнитной оси q_0 (—) и границе плазмы q_{95} (—) (d) в сценарии с дополнительным нагревом

Рис. 28. Изменение резистивного напряжения плазменного шнура (а), полоидальных потоков на магнитной оси от обмоток Ψ_{CS+PF} (---), от плазмы Ψ_P (—), их суммарного потока $\Psi_{CS+PF+P}$ (—), а также резистивные потери Ψ_{res} (—) в процессе сценария с дополнительным нагревом

Как видно на рис. 27, в сценарии с дополнительным нагревом после достижения плато тока стабилизируются значения треугольности δ_{95} и вытянутости κ_{95} плазменного шнура вместе с запасом устойчивости на границе плазмы q_{95} . Некоторый рост внутренней индуктивности плазменного шнура $l_i(3)$ и незначительную динамику запаса устойчивости на магнитной оси q_0 можно отнести на счёт пикирования тока плазмы в силу высокой температуры на её оси. На рис. 28 представлены эволюция резистивного напряжения плазменного шнура U_{res} и, соответственно, резистивные потери Ψ_{res} в сценарии с дополнительным нагревом, а также динамика полоидальных потоков на магнитной оси от обмоток Ψ_{CS+PF} , от плазмы Ψ_P и их суммарного потока $\Psi_{CS+PF+P}$. Наблюдается значительное снижение резистивного напряжения, что позволяет увеличить стадию плато тока более чем в четыре раза. При этом, как видно на рис. 22, к моменту окончания процесса моделирования сценария с дополнительным нагревом полного перемagnичивания индуктора не произошло — величина тока в наиболее напряжённой центральной секции индуктора достигает $\sim 7,3$ МА-виток.

ВЫВОДЫ

Результаты моделирования управляемого разряда в плазме токамака Т-15 показали, что в случае омической плазмы при максимальной величине тока 2 МА длительность стационарной стадии развития разряда не превышает 0,5 с. За счёт использования дополнительного нагрева затраты магнитного потока в процессе сценария разряда снижаются. Показано, что в плазме токамака Т-15 с дополнительным нагревом ~ 13 МВт при длительности стадии ввода тока 1,5 с и величине максимального тока в плазме 2 МА продолжительность стационарной стадии разряда может быть увеличена до 2—3 с (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Характерные параметры плазмы на момент окончания стационарной стадии разряда

Параметр	Омический разряд	Разряд с дополнительным нагревом
Электронная температура T_e , эВ	1,72	6,35
Энергетическое время жизни τ_E , с	0,16	0,10
Напряжение по тороидальному обходу U_{res} , В	1,10	0,14
Расход полоидального потока от обмоток Ψ_{CS+PF} , Вб	6,76	6,33
Сумма резистивных потерь Ψ_{res} , Вс	2,31	1,34
Полоидальное бета β_p	0,15	0,56
Внутренняя индуктивность плазменного шнура $l_i(3)$	0,75	0,90
Доля бутстреп-тока, %	6,8	22,7
Доля токов увлечения, %	—	6,7

Из данных табл. 2 следует, что в сценарии с дополнительным нагревом электронная температура в центре плазмы повышается почти в четыре раза по сравнению с омическим разрядом, при этом почти в семь раз снижается напряжение на тороидальном обходе шнура. Соответственно резистив-

ные потери в процессе стадии ввода тока и стационарной стадии разряда оказываются ниже на ~ 1 В·с по сравнению с омическим разрядом. Отметим, что на стационарной стадии развития разряда суммарная доля бутстреп-тока и токов увлечения составляет $\sim 30\%$ от величины тока плазмы.

Работа поддержана грантами РФФИ № 14-07-00483-а и № 14-07-00912-а.

REFERENCES

1. **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.
2. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — J. of Computational Physics, 1993, vol. 109, № 2, pp. 193—201.
3. **Khayrutdinov R.R., Lister J.B., Dokuka V.N., Duval B.P., Favez J.-Y., Lukash V.E., Raju D.** An open architecture version of the DINA 1.5D simulation code. — In: 30th European Society Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. St.-Petersburg, Russia, July 7—11, 2003, P-3.163. Preprint LRP 766/03, pp. 53—56.
4. **Dokuka V.N., Khayrutdinov R.R., Kavin A.A.** Synthesis and modeling of plasma magnetic control system in KTM tokamak. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue 1, pp. 12—25 (in Russian).

AUTHORS

Dokuka V.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; v.dokuka@mail.ru

Kavin A.A. D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; kavina57@mail.ru

Lukash V.E. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Lukash_VE@nrcki.ru

Sokolov M.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; itfusion@yandex.ru

Khayrutdinov R.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; khayrutd@mail.ru

Khayrutdinova V.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; vera_khayr@mail.ru

Received 21 April 2014
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2014, vol. 37, issue 3, pp. 56—70