УДК 533.9.08, 621.039.6, 533.9:51-73

РАСЧЁТЫ РАВНОВЕСИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ ДЛЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ТОКАМАКА Т-15

В.Ф. Андреев¹, А.А. Иванов², Н.В. Касьянова¹, В.Э. Лукаш¹, С.Ю. Медведев², А.В. Мельников¹,
А.Д. Садыков³, А.В. Сушков¹, Д.Ю. Сычугов⁵, Р.Р. Хайрутдинов⁴

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

³Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Республика Казахстан

⁴Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва, Россия

⁵Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет ВМК, Москва, Россия

В связи с начавшимся в России строительством модернизированной установки токамак Т-15 весьма актуальными становятся предварительные расчёты основных режимов её работы. В статье приводятся результаты расчётов равновесия и устойчивости плазмы с омическим нагревом. С целью повышения надёжности моделирования одни и те же режимы работы установки просчитывались по различным численным кодам. В первой части работы проведено сравнение результатов расчётов МГД-равновесия и устойчивости плазмы по кодам DINA и TOKAMEQ, причём получено хорошее совпадение результатов. С помощью кодов SPIDER, KINX и TOKSTAB проведён анализ различных вариантов пассивной системы проводников для стабилизации вертикальной неустойчивости плазменного шнура. Выбран оптимальный вариант пассивной системы, который положен в основу конструкции установки. Отметим, что и здесь было получено хорошее соответствие результатов расчётов по различным кодам. Вторая часть работы посвящена изучению и поиску стационарных режимов разряда, характеризующихся большой вытянутостью и треугольностью плазменного шнура. Таким образом, проведён предварительный анализ некоторых режимов работы установки.

Ключевые слова: проект токамака Т-15, МГД-равновесие, вертикальная неустойчивость плазмы, сопоставление расчётов по различным кодам, изучение влияния токов в катушках полоидального поля, поиск конфигураций с повышенной треугольностью и эллиптичностью.

THE MODELLING OF PLASMA EQUILIBRIA AND STABILITY IN MODERNIZED T-15 DEVICE

V.F. Andreev¹, A.A. Ivanov², N.V. Kasyanova¹, V.E. Lukash¹, S.Yu. Medvedev², A.V. Melnikov¹, A.D. Sadykov³,
A.V. Sushkov¹, D.Yu. Sychugov⁵, R.R. Khairutdinov⁴

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia

³Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

⁴State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, Troitsk, Moscow, Russia

⁵Lomonosov Moscow State University, Department of Computation Mathematics and Cybernetics, Moscow, Russia

In connection with the construction in Russia of modernized T-15 tokamak device preliminary calculations of its main regimes of work are very important. The results of calculations of plasma equilibrium and stability are presented in the present paper. In order to make modeling more reliable the same work regimes have been calculated by different numerical codes. In the first part of the work plasma MHD equilibrium and stability calculation results from DINA and TOKAMEQ codes have been compared. Calculations of MHD equilibrium performed by codes DINA and TOKAMEQ showed good agreement. Different variants of passive coils system for stabilization of the plasma vertical instability has been analyzed using codes SPIDER, KINX and TOKSTAB. Optimal variant of passive system has been chosen and assumed as a basis in the design of the device. It must be mentioned that the results of calculations by different codes showed good agreement too. The second part of the work dedicated to the study and the search of the discharge regimes, which characterized by large elongation and triangularity of plasma cross-section. Thus preliminary analysis of some regimes of work of the device has been performed.

Key words: T-15M tokamak project, MHD-equilibrium, vertical instability of plasma, comparison of calculations by different codes, study of influence of currents in poloidal coils, searching of configurations with high triangularity and elongation.

ЦЕЛЬ ПРОЕКТА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ Т-15М

Разработка проекта модернизированной установки токамак Т-15 велась в России с начала 2000-х гг. Разработка проекта проводилась в НИИЭФА, экспертиза осуществлялась «сборной командой» исследователей под общим руководством НИЦ «Курчатовский институт» [1—4]. В настоящее время принята окончательная версия проекта установки и начато её строительство.

Целью создания данной установки является как поддержка проекта ИТЭР, так и проведение исследований в рамках национальной программы УТС. Предполагается изучение таких фундаментальных физических вопросов, как транспорт, турбулентность, зональные течения, геодезические, акустические моды, длинноволновые корреляционные структуры, роль электрического поля и вращения в удержании, L—H-переходов, формирование ВТБ, свойства профилей параметров плазмы и возможность управления профилями, исследование влияния периферийной плазмы, её влияния на глобальные характеристики разряда. Прикладные и технологические задачи предполагают исследование ИТЭР-подобных разрядов, работу со стационарными разрядами с неиндукционным поддержанием тока, испытания материалов первой стенки и дивертора, а также оптимизацию дивертора и многое другое.

Основные параметры окончательной версии проекта установки приведены в табл. 1, её внешний вид показан на рис. 1.

Рис. 1. Внешний вид модернизированной установки T-15

Таблица 1. Основные параметры установки T-15 в сравнении с другими установками и проектами

Параметр	T-15	AUG	DIII-D	EAST	WEST	KSTAR	ИТЭР
I_p , МА	2	1,6	3,5—5	0,5	1	2	15
A , отн. ед.	2,2	3,3	2,5	4,1	5—6	3,6	3,1
R_0 , м	1,48	1,65	1,67	1,75	2,5	1,8	6,2
a , м	0,67	0,5	0,67	0,43	0,5	0,5	2
k_{95}	1,7—1,9	1,8	≤ 2	1,6—2	1,3—1,8	2	1,85
δ_{95}	0,3—0,4	0,4	$\leq 0,6$	0,6—0,8	0,5—0,6	0,8	0,48
B_{tR_0} , Тл	2,0	3,1	2,2	3,5	3,7	3,5	5,3
$t_{имп}$, с	10	10	10	1000	1000	300	400
P_{AUX} , МВт:							
ЭЦР	6	4	5	0,5	0,6	7,5	20—40
НИ	9	20	17			20	33—50
ИЦР	6	6	5	3	3—9	6	20—40
НГ	4			4	6—7	5	0—40

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТОВ МГД-РАВНОВЕСИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ ПО РАЗЛИЧНЫМ КОДАМ

В настоящее время общепринятой практикой при разработке новых сложных физических и технических установок является применение «перекрестного» моделирования, выполняемого с помощью различных численных кодов. Резоны подобного подхода просты и понятны. Во-первых, при расчётах по схожим моделям резко понижается вероятность ошибки. Хорошее совпадение результатов независимо проведённых расчётов обычно говорит о том, что ошибки нет. При наличии разных моделей, применяемых в кодах, можно понять чувствительность результата к выбору модели и при серьёзном расхождении расчётов провести её коррекцию. Не последнюю роль играет и ещё один аргумент. Для сложных систем численное моделирование обходится на несколько порядков дешевле натурного эксперимента. Поэтому применение для расчётов одного и того же процесса двух-трёх различных численных кодов не является сколько-нибудь обременительным с финансовой точки зрения, особенно по сравнению с весьма неприятными и дорогостоящими последствиями «экономии на спичках», т.е. на вычислителях. Именно по всем указанным причинам подход «перекрестного» моделирования применялся нами при анализе конструкции и моделировании будущих экспериментов на модернизированной установке T-15.

Предварительный расчёт сценария разряда проводится в настоящее время с помощью кода DINA (ТРИНИТИ, НИЦ «Курчатовский институт») [5]. Для повышения надёжности моделирования в опорных точках сценария проведены сравнения расчётов МГД-равновесия, выполненных с помощью кодов DINA и TOKAMEQ (МГУ, ВМК) [4, 6], который, хотя и обладает меньшими, чем код DINA, возможностями, тем не менее, благодаря высокой скорости счёта очень полезен при оптимизации конструкции установок. В табл. 2 сопоставлены результаты расчётов МГД-равновесия для стационарной стадии разряда, выполненных с помощью данных кодов. При расчётах по обоим кодам были фиксированы положения шести контрольных точек: координаты крайней правой, крайней левой и верхней точек границы плазмы, координаты x -точки сепаратрисы, а также положения её левого и правого «усов». Также в обоих расчётах значения токового бета и внутренней индуктивности выбирались одинаковыми и были соответственно равны $\beta_j \approx 0,18$, $I_i \approx 0,7$, что соответствует омическому нагреву плазмы и широкому (не пикированному) профилю тока. Более детальной идентификации профилей тока не проводилось. Поскольку геометрия катушек внешнего поля, положение контрольных точек границы плазмы, а также основные параметры распределения плазменного тока в обоих расчётах совпадали, то единственно возможное различие в обоих расчётах могло быть в величинах внешних удерживающих токов. Это различие и отражено в крайнем правом столбце табл. 2: слева даны значения внешних токов, рассчитанных с помощью кода DINA, справа — с помощью кода TOKAMEQ. Видно, что результаты расчётов отлично совпадают.

Таблица 2. Сравнение расчётов МГД-равновесия для стационарной стадии разряда, выполненных с помощью кодов DINA и TOKAMEQ

Катушка	R , м	Z , м	ΔR , м	ΔZ , м	Ток, МА-виток	
					DINA	TOKAMEQ
CSU	0,335	1,845	0,132	0,874	–0,125	–0,125
CS0	0,335	0	0,132	2,517	–12,356	–12,356
CSD	0,335	–1,845	0,132	0,874	–1,943	–1,943
PF1	0,87	2,291	0,24	0,257	0,011	0,0111
PF2	2,32	2,08	0,255	0,272	–0,573	–0,573
PF3	3,04	0,935	0,144	0,205	–0,3018	0,3068
PF4	3,24	–0,86	0,153	0,272	–0,6016	–0,6115
PF5	2,63	–2,302	0,204	0,272	–0,861	–0,861
PF6	0,74	–2,995	0,459	0,664	4,459	4,486

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ ПАССИВНЫХ ВИТКОВ

К началу расчётов вертикальной устойчивости плазмы ещё оставалась возможность внесения не больших изменений в конструкцию установки. Поэтому, помимо методических сравнений, решалась также задача выбора оптимальной пассивной стабилизирующей системы. С помощью кодов SPIDER [7], KINX [8] и TOKSTAB [9] был проведён анализ различных вариантов систем пассивных проводников. Отметим, что и здесь было получено хорошее соответствие результатов расчётов, полученных с помощью разных кодов.

Необходимость пассивной стабилизации плазмы в Т-15 связана с относительно тонкой стенкой вакуумной камеры по сравнению с большими токамаками типа ИТЭР. Резистивное время стальной стенки толщиной 0,8 см в токамаке Т-15 $\tau_w = \mu_0 \sigma_w d_w a_w = 0,01$ с (σ_w , d_w , a_w — проводимость, толщина и малый радиус стенки соответственно) более чем на порядок меньше по сравнению с 0,25 с для ИТЭР. Снизить инкременты вертикальной неустойчивости до величины $\gamma < 20$ с^{–1} для последующего активного подавления неустойчивости с помощью системы управления положением шнура можно за счёт установки пассивных витков, попарно соединённых коаксиальной перемычкой для компенсации наведённых токов, возникающих при вводе тока в плазму.

Обсудим два возможных варианта пассивных стабилизирующих систем. Первый вариант включает в себя три пары медных пассивных витков (рис. 2, а), которые увеличивают среднее резистивное время стенки до $\tau_w \sim 0,2$ с. В этом варианте в предположении непроводящей стенки плазма неустойчива с альфвеновскими инкрементами, если использовать только одну пару витков, однако любые две пары обеспечивают пассивную стабилизацию. При этом стабилизирующее влияние наружной пары витков наибольшее, а пары витков верх-низ наименьшее. Второй вариант отличается от первого отсутствием пары витков верх-низ. Он включает в себя две пары медных пассивных витков, (рис. 2, б). Таким образом, система с двумя парами витков (см. рис. 2, б) является конструктивно более простой, чем система из трёх пар проводников. В то же время она достаточно надёжно стабилизирует плазму, снижая инкремент её вертикальной неустойчивости до величины порядка $10\text{--}14\text{ с}^{-1}$.

Рис. 2. Варианты пассивной стабилизации вертикальной неустойчивости в T-15: а — система из трёх пар витков (1, 2, 3, KINX); б — система из двух пар витков (1, 2, TOKSTAB). Под днищем камеры показаны два элемента конструкции m , создающие тороидальное замыкание

ПОИСК РАВНОВЕСНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ С ВЫСОКОЙ ВЫТЯНУТОСТЬЮ И ТРЕУГОЛЬНОСТЬЮ

Одной из целей, преследуемых проектом T-15M, является поиск режимов длительного неиндуктивного горения плазмы с высокими параметрами (β_N , $H_{y,2}$, q_{95} , k , δ , n/n_G). В данном разделе приводятся примеры оптимизационных расчётов равновесной магнитной конфигурации, а именно получения плазмы с максимальными значениями вытянутости и треугольности в рамках технических ограничений на максимальные величины токов в витке $I_{\text{макс в}}$ и катушках с числом витков N — $I_{\text{макс N}} = I_{\text{макс в}} \cdot N$ системы полоидального поля. Эти ограничения указаны в табл. 3, в столбцах 1—3. Кроме этих ограничений, ми-

Т а б л и ц а 3. Величины внешних токов для режимов с улучшенными характеристиками разряда

Катушка	N	$I_{\text{макс к}}, \text{ кА} / I_{\text{макс N}}, \text{ МА-виток}$	Ток, МА-виток (рис. 3, а)	Ток, МА-виток (рис. 3, б)	Ток, МА-виток (рис. 4, а)	Ток, МА-виток (рис. 4, б)	Ток, МА-виток (рис. 5, а)	Ток, МА-виток (рис. 5, б)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CSU	154	40/6,16	−0,0251	−0,0251	−0,0251	−0,0291	−0,0251	−0,0251
CS0	442	40/17,68	−12,3563	−12,3563	−12,3563	−12,3563	−14,8563	−15,5563
CSD	154	40/6,16	−0,9525	−1,4425	−0,5925	−4,0055	−0,1025	−2,6105
PF1	100	20/2,0	0	0	0,509	0,509	0,4508	0,347
PF2	100	20/2,0	−0,262	−0,2342	−0,2197	−0,2573	−0,969	−0,8698
PF3	48	20/0,96	−0,471	−0,4685	−0,4546	−0,4706	−0,1955	−0,2343
PF4	60	20/1,2	−0,9388	−0,9339	−0,9062	−0,9381	−0,48	−0,4907
PF5	80	20/1,6	0	0	0	0	−0,89	−0,75
PF6	216	20/4,32	1,075	0,9576	0,161	2,706	0,695	0,591

нимальное расстояние между плазменным шнуром и первой стенкой не должно было быть меньше величины порядка 10 см, поскольку оценка приграничного слоя давала оценку $SOL = 4\text{--}6$ см.

Оптимизационные расчёты МГД-равновесия проводились с помощью кода TOKAMEQ. Рассматривалась возможность получения одно- и двухнулевой конфигураций плазмы с максимально возможными значениями её вытянутости ($k \sim 2$) и треугольности ($\delta \sim 0,4$), различным положением x -точек и величиной полного тока плазмы. Параметры распределения тока во всех расчётах были равны $\beta_p = 0,18$, $l_i = 0,65\text{--}0,68$, что соответствует омическому нагреву плазмы. Результаты расчётов представлены на рис. 3—5, величины удерживающих токов приводятся в табл. 3, в столбцах 4—9.

Рис. 3. Однулевые магнитные конфигурации с большой вытянутостью $k_{95} = 1,96$, $\delta_{95} = 0,28$ (а) и $k_{95} = 2,01$, $\delta_{95} = 0,26$ (б). Проводники, в которых ток положительный (сонаправлен току плазмы), отмечены красным цветом, отрицательный — синим, равен нулю — зелёным

Рис. 4. Двухнулевые магнитные конфигурации с большой вытянутостью $k_{95} = 2,01$, $\delta_{95} = 0,31$ (а) и $k_{95} = 1,99$, $\delta_{95} = 0,28$ (б)

Рис. 5. Двухнулевые магнитные конфигурации с большой треугольностью $\delta_{95} = 0,4$, $k_{95} = 1,6$ (а) и $\delta_{95} = 0,4$, $k_{95} = 1,7$ (б)

На рис. 3, а, б показаны однонулевые равновесные магнитные конфигурации с максимальной вытянутостью ($k_{95} \sim 2$) в двух предельных положениях нижней x -точки по вертикали $z = -1,44$ м и $z = -1,55$ м соответственно. Полный ток плазмы $I_p = 1,85$ МА.

На рис. 4, а, б показаны двухнулевые равновесные магнитные конфигурации с максимальной вытянутостью ($k_{95} \sim 2$) в двух предельных положениях нижней x -точки по горизонтали $R = 1,08$ м и $R = 1,33$ м соответственно. Полный ток плазмы $I_p = 1,85$ МА.

Таким образом, вытянутость $k_{95} \sim 2$ может быть получена для одно- и двухнулевой магнитных конфигураций в широком диапазоне допустимых положений нижней x -точки: $\Delta R \approx 25$ см и $\Delta z \approx 11$ см.

Расчёты равновесных магнитных конфигураций с максимальной треугольностью при различных положениях x -точек показали, что одно- и двухнулевые магнитные конфигурации с треугольностью $\delta_{95} \sim 0,4$ могут быть получены в широком диапазоне положений нижней x -точки по вертикали $\Delta z \approx 25$ см.

На рис. 5, а, б показаны двухнулевые магнитные конфигурации с максимальной треугольностью в двух предельных положениях нижней x -точки по вертикали $z = -1,25$ м и $z = -1,50$ м соответственно. Полный ток плазмы $I_p = 1,85$ МА.

Таким образом, расчёты показали возможность управления равновесной плазменной конфигурацией модернизированного токамака Т-15М в режимах с омическим нагревом в широких пределах, создающих благоприятные условия для получения режимов с высокими параметрами плазмы (режимов «advanced tokamak»). Достижимость таких параметров является предметом дальнейших расчётных исследований, предполагающих интегрированное моделирование эволюции плазмы на всём протяжении разряда, включая подъём тока, управление положением и формой плазменного шнура в режимах с дополнительным нагревом, а также поведение плазмы во время срыва.

Работа поддержана фондами РФФИ № 14-07-00483-а, 14-02-01182-а и 14-07-00912-а и договором между МГУ имени М.В. Ломоносова и Институтом атомной энергии НЯЦ Республики Казахстан.

REFERENCES

1. Dnestrovskij Yu.N., Leonov V.M., Notkin G.E., Khvostenko P.P., Savrukhn P.V., Trubnikov A.S., Tsaun S.V., Filatov O.G., Vasilev V.I., Mineev A.B., Muratov V.P., Khayrutdinov R.R., Sychugov D.Yu., Voznesenskij V.A., Gasilov N.A. Discharge scenario for T-15M tokamak design project. — Problems of Atomic Science and Technology, 2000, № 3, Series: Plasma Physics (5), pp. 25—27.

2. **Bondarchuk E.N., Dnestrovskii Yu.N., Leonov V.M., Maksimova I.I., Sychugov D.Yu., Tsaun S.V., Voznesesky V.A.** Vertical MHD stability of the T15-M tokamak plasma. — Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, № 4, pp. 219—227.
3. **Kas'yanova N.V., Andreev V.F., Mel'nikov A.V., Sushkov A.V., Sychugov D.Yu., Sadykov A.D.** Calculation of plasma equilibrium configurations with a large elongation and triangularity for the upgraded tokamak T-15M. — In coll.: XLI International (Zvenigorod) conference on plasma physics and controlled nuclear fusion research. Zvenigorod, February 2014, <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLI/M.html#Sekcija%20MU> (in Russian).
4. **Kasyanova N.V., Andreev V.F., Melnikov A.V., Sushkov A.V., Sychugov D.Yu., Sadykov A.D.** Calculation of the equilibrium plasma configurations with high elongation and triangularity for the T-15 upgrade tokamak. — In: EPS Conf. on Plasma Physics. Berlin, 2014.
5. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — J. Comput. Physics, 1993, vol. 109, pp. 193—201.
6. **Sychugov D.Yu.** The code TOKAMEQ for simulation MHD-equilibrium (module of program library «Virtual Tokamak»). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue 4, pp. 85—89 (in Russian).
7. **Ivanov A.A., Martynov A.A., Medvedev S.Yu., Poshekhonov Yu.Yu., Konovalov S.V., Khayrutdinov R.R.** The SPIDER code. Mathematical modeling of tokamak plasma equilibrium and evolution. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2014, vol. 37, issue 1, pp. 80—96 (in Russian).
8. **Degtyarev L., Martynov A., Medvedev S., Troyon F., Villard L., Gruber R.** The KINX ideal MHD stability code for axisymmetric plasmas. — Computer Physics Communications, 1997, vol. 103, pp. 10—27.
9. **Sychugov D.Yu., Amelin V.V., Gasilov N.A.** The code TOKSTAB (module of program library «Virtual Tokamak»). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2010, issue 3, pp. 46—49 (in Russian).

AUTHORS

Andreev V.F. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Andreev_VF@nrcki.ru

Ivanov A.A. Keldysh Institute of Applied Mathematics, Miusskaya sq., 4, Moscow, 125047, Russia; aai@a5.kiam.ru

Kasyanova N.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; kasianova_n@mail.ru

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

Medvedev S.Yu. Keldysh Institute of Applied Mathematics, Miusskaya sq., 4, Moscow, 125047, Russia; medvedev@a5.kiam.ru

Melnikov A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Melnikov_AV@nrcki.ru

Sadykov A.D. Institute of Atomic Energy NNC RK, 071100, Kazakhstan, Kurchatov, st. Krasnoarmeyskaya, 2 buil.54 B

Sushkov A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; alexey-sushkov@yandex.ru

Sychugov D.Yu. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Leninskie gory, 119992 Moscow, Russia; sychugov@cs.msu.ru

Khayrutdinov R.R. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; Khayrutdinov_RR@nrcki.ru

Received 22 November 2013
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2014, vol. 37, issue 3, pp. 48—55