

УДК 533.9:519.688

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОМИЧЕСКОГО СЦЕНАРИЯ РАЗРЯДА В ТОКАМАКЕ КТМ

Д.Ю. Сычугов (МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет ВМиК, Москва, Россия), Шаповалов Г.В., Волынкина, Ю.В. Садыков А.Д., Чектыбаев Б.Ж., Шипилов Д.В., Шумайлова О.Н. (Институт атомной энергии НЯЦ Республики Казахстан, г. Курчатов)

Обсуждаются расчёты омического разряда в токамаке КТМ, выполненные по кодам DINA и TOKAMEQ, получено хорошее соответствие результатов вычислений. С помощью кода TOKAMEQ изучается влияние внешних токов на параметры плазменного шнура.

Ключевые слова: Проект токамака КТМ, моделирование сценария разряда, библиотека программ «Виртуальный токамак».

THE NUMERICAL SIMULATION OF THE OMIC DISCHARGE SCENARIO IN TOKAMAK KTM. D.Yu. SYCHUGOV, G.V. SHAPOVALOV, Yu.V. VOLYNKINA, A.D. SADYKOV, B.Zh. CHEKTYBAEV, D.V. SHIPILOV. O.N. SHUMAILOVA. The results of calculations of the discharge scenario in KTM using two different numerical codes DINA and TOKAMEQ are discussed. It is founded a good agreement of results. Also the influence of the external coils of tokamak KTM to plasma characteristics was analysed.

Key words: The project of Tokamak KTM, the simulation of the discharge scenario, the library of standard codes The Virtual Tokamak.

ВВЕДЕНИЕ



Рис. 1. Монтаж токамака КТМ (г. Курчатов, РК, 2009 г.)

Токамак КТМ строится в Республике Казахстан (РК) в рамках национального проекта по развитию технологий управляемого термоядерного синтеза. Его характеристики показаны в табл. 1, внешний вид — на рис. 1. Установка спроектирована в ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, ее основные узлы изготовлены там же. В настоящее время на КТМ осуществляется переход от монтажа к пуско-наладке и подготовке к запуску в омическом режиме. Поэтому задача более детальной проработки сценария разряда актуальна.

Общеизвестно, что надежность моделирования повышается при подключении разных кодов. Нами были выбраны коды DINA [1] и TOKAMEQ [2, 3]. Ранее [4] по коду

DINA был проведен предварительный расчет режимов работы КТМ. Целью данной работы являлось:

- сравнить операционные точки сценария, рассчитанные по двум упомянутым кодам;
- изучить дополнительные возможности управления плазменным шнуром в токамаке КТМ.

Т а б л и ц а 1. Система обмоток полоидального магнитного поля токамака КТМ

Наименование обмотки	№ обмотки	Координаты центра сечения обмотки, м		Размеры сечения обмотки, м	
		R	Z	по R	по Z
CS	1	0,225	0	0,100	2,600
PF1	2	0,575	1,295	0,190	0,080
PF3	3	1,7	0,850	0,120	0,170
PF6	4	1,7	-0,25	0,120	0,170
PF5	5	1,24	-1,10	0,100	0,080
PF4	6	0,575	-1,295	0,190	0,080
PF2	7	1,25	1,250	0,080	0,050
HFC1	8	1,4	1,07	0,057	0,064
HFC2	9	1,4	-1,07	0,057	0,064

Основные характеристики токамака КТМ:

Большой радиус плазмы, м...	0,9
Малый радиус плазмы, м...	0,45
Аспектное отношение ...	2,0
Вытянутость плазмы, K_{95+} ...	1,7

Тороидальное магнитное поле, Тл...	1,0
Ток плазмы, МА...	0,75
Длительность плато тока, с...	4—5

Оказалось, что расчёты, проведённые по двум кодам, хорошо согласуются. Небольшие различия объясняются разницей моделей плотности тока в плазме и токами Фуко на камере.

Помимо сравнения, с помощью кода ТОКАМЕQ исследовано влияние элементов конструкции и токов в полоидальных катушках на характеристики плазменного шнура.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Краткое описание кодов DINA и ТОКАМЕQ. Код DINA [1] представляет собой эволюционно-транспортный код, применяющийся для расчёта сценариев разряда на установках токамак. Он является общепризнанным, с его помощью выполнен целый ряд работ, например, [5—13]. Код ТОКАМЕQ [2, 3] — стандартный код для расчета МГД-равновесия плазмы в токамаке, также неоднократно применявшийся [14—19]. С помощью его ранней версии впервые было проведено сравнение результатов математического моделирования и реального эксперимента на установке токамак и получено хорошее соответствие [19]. Его версия номер 21.9 [2] открыта для всеобщего пользования и является одним из модулей библиотеки «Виртуальный токамак» [20, 21]. В указанной версии кода функция распределения тока в плазме задаётся следующим образом:

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

где β — бета токовая; $\hat{R}^2 = \frac{\iint_{\Omega_p} r dr dz}{\iint_{\Omega_p} \frac{dr dz}{r}}$ — среднее по шнуру значение r^2 ; γ_1, γ_2 — показатели распределения

плотности тока; $f(r, \psi - \psi_p)$ — краткая запись выражения в фигурных скобках; $p(\psi)$ — распределение давления по магнитным поверхностям; $I(\psi)$ — полоидальный ток. Величины γ_1, γ_2 , определяют «пикированность» плотности тока. Множитель λ вычисляется в ходе решения, исходя из уже заданной величины полного тока в плазме I_{pl} :

$$\lambda \iint_{\Omega_p} f(r, \psi - \psi_p) dr dz = I_{pl}. \quad (2)$$

Сравнение результатов вычислений по кодам DINA и ТОКАМЕQ. Сопоставление результатов расчёта по данным кодам впервые было представлено в [5] при моделировании разряда в проекте токамака STF (Великобритания). Оказалось, что при одинаковом профиле тока и в отсутствии токов Фуко на камере результаты совпадают практически абсолютно. Поэтому в данной работе расхождение априори может быть либо из-за различия в профиле тока, либо из-за наведённых на элементах конструкции токов Фуко. Нами были взяты операционные точки сценария омического разряда [4], и при помощи кода ТОКАМЕQ воспроизведено МГД-равновесие. При вычислениях по коду ТОКАМЕQ параметры в формуле (1) подбирались так, чтобы наилучшим образом аппроксимировать профиль тока в коде DINA.

Линии уровня полоидального потока $\Psi = \text{const}$, рассчитанные для опорных моментов времени по плоху кодам, приведены на рис. 2. Заметных геометрических различий не наблюдается. Результаты сравнения характеристик МГД-равновесий для операционных точек приведены в табл. 2. Вне скобок заданы характеристики, рассчитанные с помощью кода DINA, в скобках — с помощью кода ТОКАМЕQ. Как видно, сопоставление результатов вычислений даёт вполне удовлетворительные результаты. Относительно небольшие различия по величинам внешних токов объясняются наличием токов Фуко на камере и различиями в профиле тока.

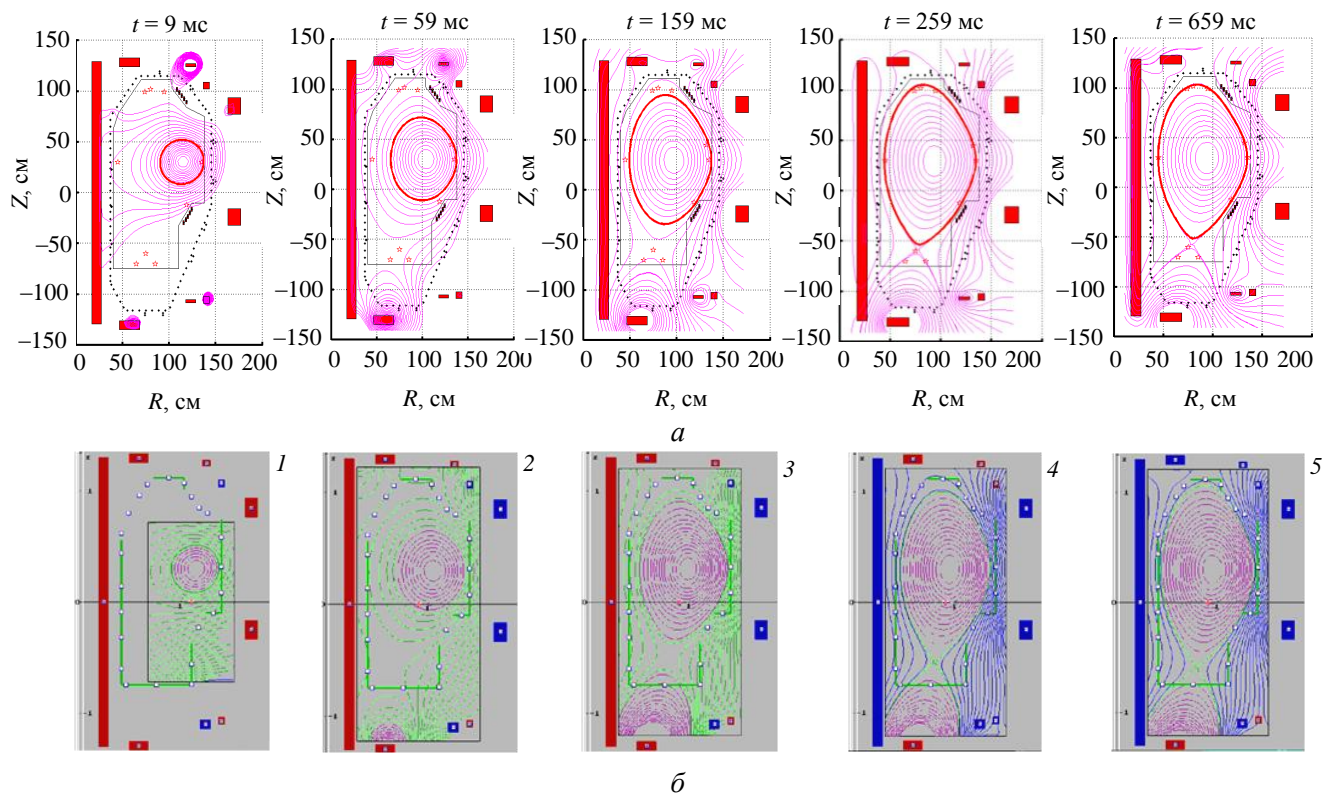


Рис. 2. Линии уровня полоидального потока $\Psi = \text{const}$, рассчитанные, соответственно, по кодам DINA (а) и TOKAMEQ (б), для моментов времени $t = 9$ (1), 59 (2), 159 (3), 259 (4), 659 мс (5)

Т а б л и ц а 2. Параметры расчётов равновесия по двум кодам

Параметр	Момент разряда, мс					
	9	59	159	259	659	
Геометрические параметры плазменного шнура, м						
R_{\min} , м	0,90 (0,90)	0,65 (0,65)	0,49 (0,49)	0,45 (0,45)	0,44 (0,43)	
R_{\max} , м	1,38 (1,38)	1,38 (1,38)	1,38 (1,38)	1,34 (1,35)	1,34 (1,34)	
Z_{\min} , м	0,08 (0,09)	-0,10 (-0,10)	-0,38 (-0,38)	-0,55 (0,55)	-0,53 (-0,58)	
Z_{\max} , м	0,53 (0,51)	0,70 (0,71)	0,95 (0,94)	1,06 (1,02)	1,04 (1,07)	
E (эллиптичность)	0,94 (0,88)	1,1 (1,1)	1,55 (1,49)	1,8 (1,74)	1,76 (1,76)	
R_0 , м	1,15 (1,15)	1,05 (1,05)	0,98 (0,98)	0,96 (0,96)	0,94 (0,94)	
Z_0 , м	0,3 (0,3)	0,3 (0,3)	0,3 (0,3)	0,3 (0,3)	0,3 (0,3)	
Физические параметры плазменного шнура						
Ψ_p , В·с (магн. поток)	1,293	0,53	0,29 (0,28)	0,0953	-0,3509	
I_p , МА (ток плазмы)	0,05 (0,05)	0,175 (0,175)	0,35 (0,35)	0,7 (0,7)	0,75 (0,75)	
β	0,1 (0,10)	0,1 (0,1)	0,1 (0,1)	0,15 (0,07)	0,15	
Токи в обмотках полоидальной системы						
CS, МАвиток	1	10,15 (10,15)	6,345 (6,598)	1,692 (1,692)	-1,692 (-1,692)	-8,46 (-8,46)
PF1, МАвиток	2	0,176 (0,176)	0,150 (0,148)	0,096 (0,096)	0,044 (0,045)	-0,143 (-0,143)
PF3, МАвиток	3	-0,008 (0,042)	-0,027 (-0,026)	-0,085 (-0,108)	-0,134 (-0,134)	-0,153 (-0,243)
PF6, МАвиток	4	-0,005 (0,012)	-0,028 (-0,027)	-0,085 (-0,106)	-0,131 (-0,131)	-0,144 (-0,219)
PF5, МАвиток	5	-0,129 (-0,129)	-0,142 (-0,16)	-0,175 (-0,180)	-0,2 (-0,2)	-0,205 (-0,225)
PF4, МАвиток	6	0,326 (0,290)	0,494 (0,452)	0,835 (0,801)	1,157 (1,157)	0,833 (0,689)
PF2, МАвиток	7	0,089 (0,089)	0,072 (0,072)	0,043 (0,043)	0,014 (0,014)	-0,003 (-0,003)
HFC1, МАвиток	8	-0,069 (-0,069)	-0,051 (-0,051)	-0,020 (-0,020)	0,125 (0,125)	-0,004 (-0,004)
HFC2, МАвиток	9	0,069 (0,069)	0,051 (0,051)	0,020 (0,020)	-0,125 (-0,125)	0,004 (0,004)

Примечание: R_{\min} — r -координата крайней левой точки плазменного шнура; R_{\max} — r -координата крайней правой точки плазменного шнура; Z_{\min} — z -координата крайней нижней точки плазменного шнура; Z_{\max} — z -координата крайней верхней точки плазменного шнура; R_0 — r -координата центра магнитной оси плазмы; Z_0 — z -координата центра магнитной оси плазмы.

Влияние изменения профиля тока на моделирование плазмы. Для изучения влияния модели тока (1) в базовой конфигурации разряда $t = 259$ мс (см. рис. 2) изменялись значения β и показатели γ_1, γ_2 при фиксированном положении центра плазмы. Фиксация центра шнура объясняется необходимостью

сохранения зазора между первой стенкой и плазмой. При этом исследовались изменения эллиптичности плазмы и положения X-точки сепаратрисы.

При омическом нагреве полоидальная β составляет 0,1—0,15. Большие значения β достигаются при дополнительном ВЧ-нагреве плазмы, при этом предельное значение β определяется условиями существования равновесия, а также МГД-устойчивостью плазмы. На рис. 3 и в табл. 3 представлены результаты расчёта изменённой базовой конфигурации в зависимости от β при фиксированных значениях γ_1, γ_2 . Видно, что при увеличении β эллиптичность шнура уменьшается, а треугольность растёт.

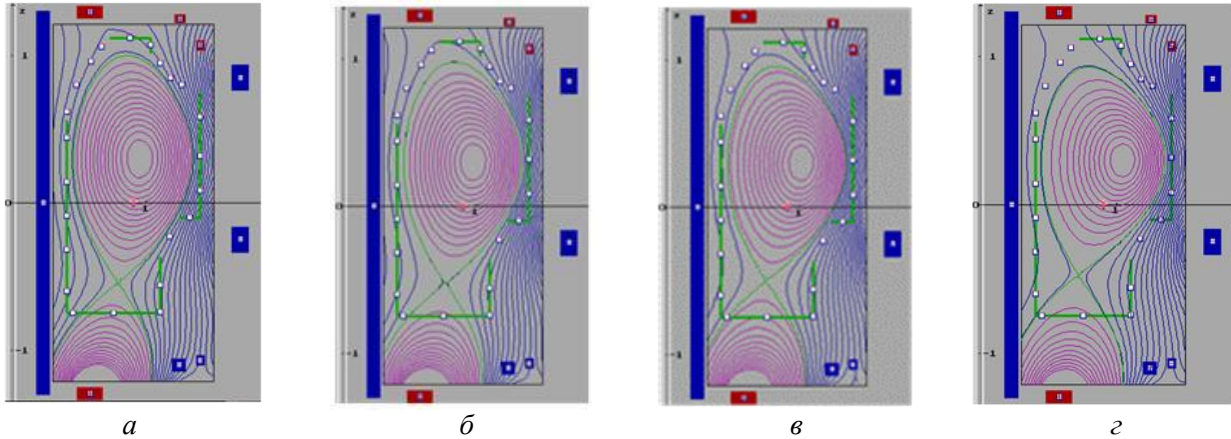


Рис. 3. Изменение формы плазменного шнура при увеличении β : 0,15 (а); 0,55 (б); 1 (в); 1,5 (г)

Т а б л и ц а 3. Влияние величины бета на геометрические характеристики шнура

Параметр	β			
	0,15	0,55	1	1,5
E (эллиптичность)	1,824	1,6771	1,6067	1,5116
δ (треугольность)	0,1454	0,2007	0,2679	0,3471
R_x (X-точка), м	0,78	0,76	0,74	0,72
Z_x (X-точка), м	—	-0,5216	-0,4885	—
R_{max} , м	1,349	1,3474	1,3493	1,3532
R_{min} , м	0,451	0,4526	0,4505	0,4469
Z_{max} , м	1,0065	0,9791	0,9556	0,9255
Z_{min} , м	-0,51	-0,5216	-0,4885	-0,4445

Следующая серия вычислений проводилась при фиксированном и заложенном в базовый сценарий разряда значении $\beta = 0,15$ и меняющихся значениях параметров пикированности тока, причём принималось $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$. По результатам вычислений оказалось (рис. 4 и табл. 4), что при увеличении γ увеличивается треугольность плазмы, но её эллиптичность изменяется незначительно. Это объясняется тем, что внешние токи при вычислениях подбирались так, чтобы сохранить геометрический центр плазмы.

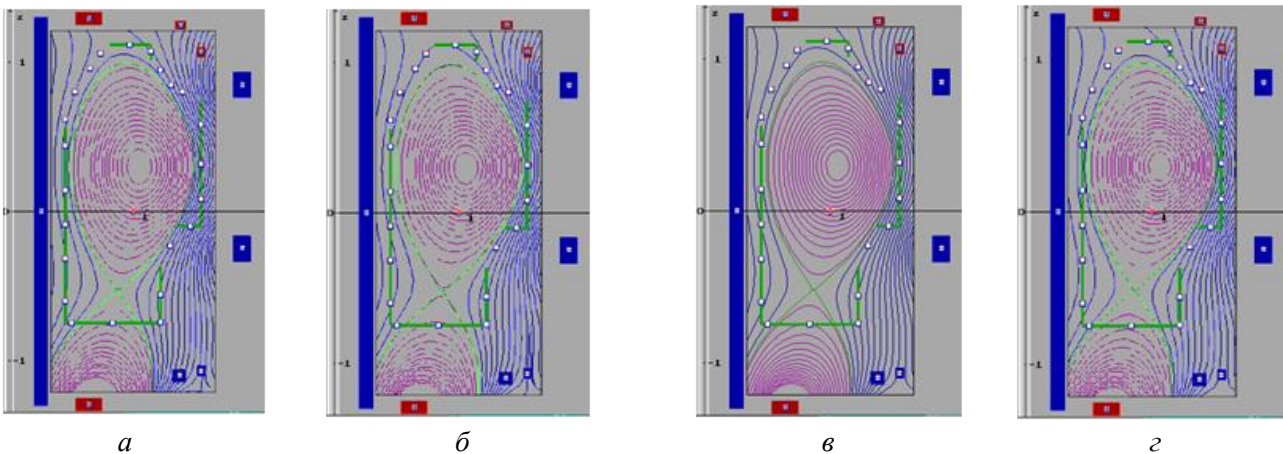


Рис. 4. Изменение формы плазменного шнура в зависимости от γ при $\gamma_1 = \gamma_2$: 1,55 (а); 1,85 (б); 2 (в); 2,2 (г)

Т а б л и ц а 4. Результаты изменения параметров плазменной конфигурации при изменении профиля плотности тока плазмы

Параметр	$\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$			
	1,55	1,85	2	2,2
E (эллиптичность)	1,6752	1,6398	1,6365	1,6237
δ (треугольность)	0,1542	0,1695	0,1770	0,2969
R_x (X-точка), м	0,78	0,78	0,78	0,78
Z_x (X-точка), м	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52
R_{max} , м	1,3533	1,3581	1,3601	1,362
R_{min} , м	0,4466	0,4417	0,44	0,438
Z_{max} , м	0,9944	0,9848	0,9807	0,9754
Z_{min} , м	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52

На рис. 5, 6 приведены графики плотности тока плазмы $j_\phi(r, z_0)$ при изменении β_P и γ .

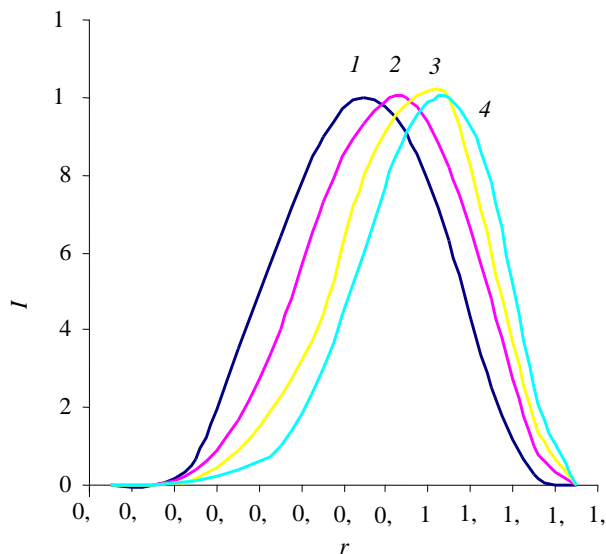


Рис. 5. Изменение профиля плотности тока при изменении β_P : 0,15 (1); 0,55 (2); 1,5 (3); 1 (4)

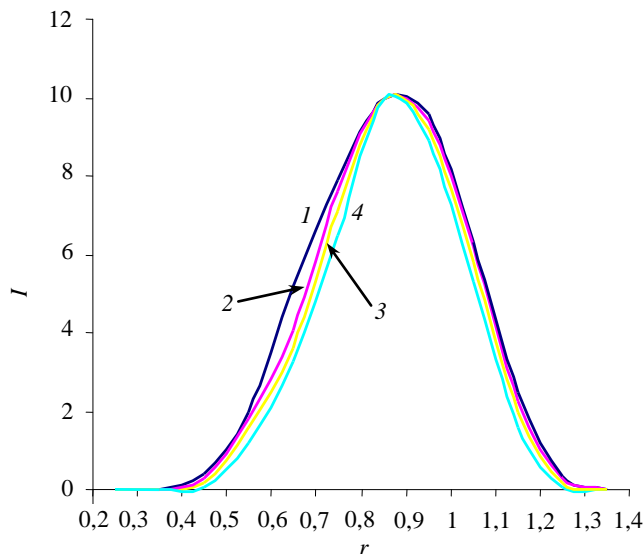


Рис. 6. Изменение профиля плотности тока при изменении γ : 1,55 (1); 1,85 (2); 2 (3); 2,2 (4)

Влияние возможных неточностей в монтаже установки на параметры плазменного шнура. С целью выяснить, как могут повлиять неточности, для операционной точки $t = 259$ мс менялись положения и размеры катушек и рассчитывались величины компенсирующих внешних магнитных полей, при которых параметры плазмы оставались неизменными. Оказалось, что неточности в монтаже системы порядка $\pm 1-2$ см приводят к необходимости изменения внешних полей на величину порядка $\pm 3-4\%$. Подобные изменения невелики и, безусловно, лежат в пределах технической возможности системы электропитания обмоток.

Влияние токов, растягивающих шнур (катушки PF1 и PF4), на конфигурацию плазмы токамака КТМ. В данном пункте исследовалось, как в базовой операционной точке $t = 259$ мс изменение тока в катушке PF1 влияет на геометрию шнура и на ток в катушке PF4. Результаты расчетов сведены в табл. 5. Видно, что при увеличении тока в катушке PF1 ток в катушке PF4 растёт в целом нелинейно. Увеличение тока в катушке PF1 в 2 раза приводит к достижению порогового значения тока в катушке PF4, равного 1,44 МА.

Т а б л и ц а 5. Результаты изменений тока в катушке I_{PF4} и геометрии плазменного шнура при изменении тока в катушке I_{PF1}

	I_{PF1} , МАвиток	I_{PF4} , МАвиток	Магнитная ось		R_{min} , м	R_{max} , м	Z_{min} , м	Z_{max} , м	E
			R , м	Z , м					
1	0,045	1,0493	0,96	0,3	0,45	1,34	-0,55	1,06	1,731
2	0,056	1,08	0,9416	0,3	0,4576	1,3423	-0,508	0,997	1,698
3	0,1	1,21	0,9387	0,3	0,4725	1,3271	-0,505	0,992	1,756
4	0,15	1,34	0,9361	0,3	0,4884	1,3116	-0,486	0,984	1,785

Изменение геометрии плазменного шнура приведено в табл. 5 и на рис. 7. Видно, что при увеличении тока в PF1 верхняя и нижняя X-точки сближаются. Конструкция КТМ является однодиверторной, поэтому такая тенденция нежелательна, так как приводит к потокам частиц на камеру.

Влияние распределения тока по катушкам горизонтального равновесия PF3, PF6 на геометрию плазменного шнура. Для операционной точки $t = 259$ мс при фиксированном положении центра

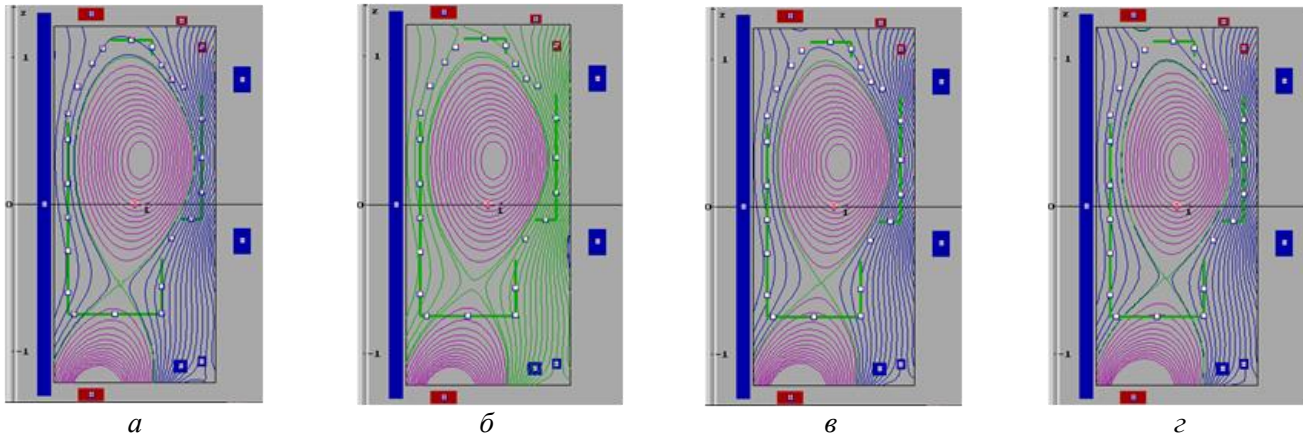


Рис. 7. Изменение плазменной конфигурации при увеличении тока в катушке PF1: $I_{PF1} = 0,045$ (а); $0,056$ (б); $0,1$ (в); $0,15$ МАвиток (г) шнура менялось распределение тока в катушках PF3, PF6 и изучалось изменение геометрии и токов в катушках PF1 и PF4. Результаты показаны в табл. 6 и на рис. 8. Видно, что при изменении токов в обмотках PF3 и PF6 в пределах 20—30% ток в обмотке PF4 меняется значительно, приближаясь к своему пороговому значению 1,4 МАвиток, изменение тока в катушке PF1 менее значительно. В табл. 6 и на рис. 8 приведено изменение геометрии плазмы. Видно, что перераспределением токов в катушках PF3 и PF6 можно управлять положением «уса» сепаратрисы и тем самым потоками частиц на дивертор.

Т а б л и ц а 6. Результаты изменения токов в катушках I_{PF1} , I_{PF4} и геометрии плазменного шнура при изменении распределения токов в катушках I_{PF3} и I_{PF6}

№ п/п	I_{PF3} , МАвиток	I_{PF6} , МАвиток	I_{PF1} , МАвиток	I_{PF4} , МАвиток	Магнитная ось		R_{min} , м	R_{max} , м	Z_{min} , м	Z_{max} , м	E
					R , м	Z , м					
1	-0,2175	0,2126	0,045	1,0493	0,96	0,3	0,45	1,34	-0,55	1,06	1,74
2	-0,2	-0,22	0,0453	1,179	0,940	0,3	0,467	1,333	-0,53	0,959	1,714
3	-0,19	-0,228	0,0456	1,2838	0,939	0,3	0,476	1,325	-0,5	0,936	1,674
4	-0,18	-0,23	0,0556	1,3612	0,938	0,3	0,483	1,317	-0,49	0,917	1,688

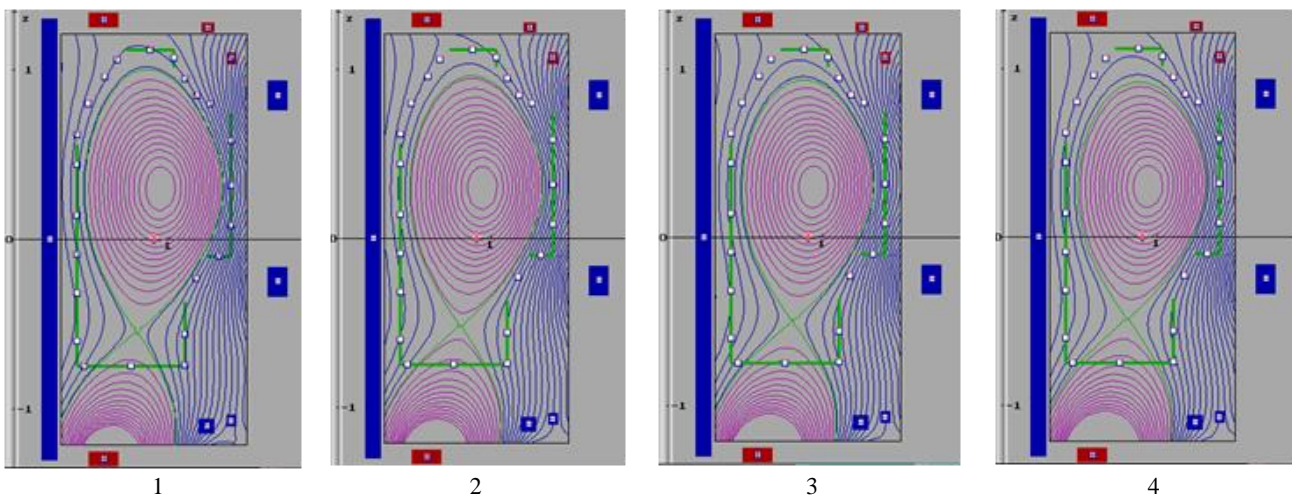


Рис. 8. Изменение формы плазменного шнура при изменении токов в полоидальных катушках PF3, PF6 (в соответствии с табл. 6)

Влияние тока в катушке PF5 на сепаратрису и степень асимметрии плазменного шнура. Поскольку конструкция токамака является однодиверторной, представляется важным создать высокую степень асимметрии системы по Z . В данном пункте исследовалась степень влияния тока в катушке PF5 на асимметрию плазменного шнура, положение X -точки и направление «усов» сепаратрисы. При модификации базовой операционной точки $t = 259$ мс фиксировались центр плазменного шнура и токи в катушках PF1, PF2 и HFC, а токи в катушках PF3, PF4 и PF6 подбирались.

Результаты вычислений приведены в табл. 7. Здесь применяются следующие обозначения: I_{PF5} — ток в обмотке PF5; I_{PF4} — ток в обмотке PF4; r_x, z_x — координата положения X -точки; r_l, r_r — координата пересечения «усов» сепаратрисы с пластинами дивертора. Третья строка таблицы соответствует базовой операционной точке $t = 259$ мс.

Т а б л и ц а 7. Положение сепаратрисы при различных токах в катушке PF5

№ п/п	I_{PF5} , МАвиток	I_{PF4} , МАвиток	r_{X3} , м	z_{X3} , м	r_{l3} , м	r_{r3} , м
1	-0,02	0,5067	0,82	-0,63	0,68	0,91
2	-0,08	0,6832	0,81	-0,6	0,63	0,91
3	-0,11	1,0433	0,79	-0,55	0,55	0,92
4	-0,16	1,0434	0,79	-0,56	0,56	0,93
5	-0,22	1,1041	0,79	-0,53	0,54	0,93
6	-0,25	1,1946	0,79	-0,53	0,52	0,94
7	-0,3	1,3461	0,78	-0,5	0,5	0,94
8	-0,32	1,4065	0,78	-0,5	0,5	0,94

Видно, что при изменении тока в обмотке PF5 от -0,02 до -0,32 МАвиток положение X-точки смещается по вертикали на 13 см вниз и на 4 см внутрь. Точка пересечения правого «уса» сепаратрисы незначительно смещается внутрь, при этом левый «ус» достаточно сильно отклоняется влево — на 18 см. Верхнее и нижнее значения тока в обмотке PF5 являются предельными для данной конфигурации. При дальнейшем уменьшении тока PF5 (по абсолютному значению) и при переходе его в плюс плазма смещается на стенку камеры (рис. 9, а). Увеличение тока по модулю выше 0,32 МАвиток невозможно из-за ограничения по питанию обмотки PF4, максимальный ток в которой составляет 1,44 МАвиток.

На рис. 9 показаны конфигурации плазмы для двух предельных случаев и базового варианта, на рис. 10 — крайние положения сепаратрисы. Как видно на рис. 10, несмотря на незначительное смещение точки касания «уса» сепаратрисы с диверторными пластинами по внешнему обводу, всё же существует возможность изменения потоков частиц плазмы на дивертор за счёт смещения положения X-точки по горизонтали.

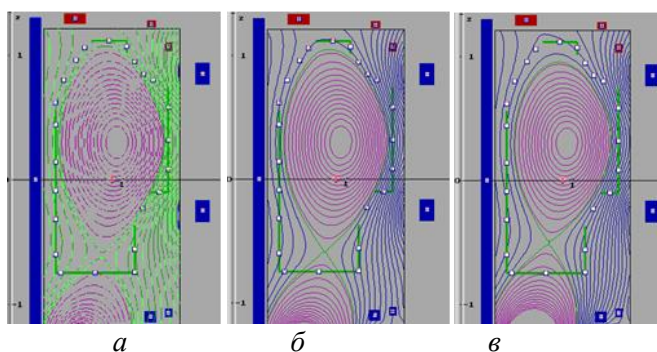


Рис. 9. Равновесная конфигурация плазмы при токе в катушке PF5 $I_{PF5} = -0,02$ (а), $-0,11$ (б), $-0,32$ МАвиток (в)

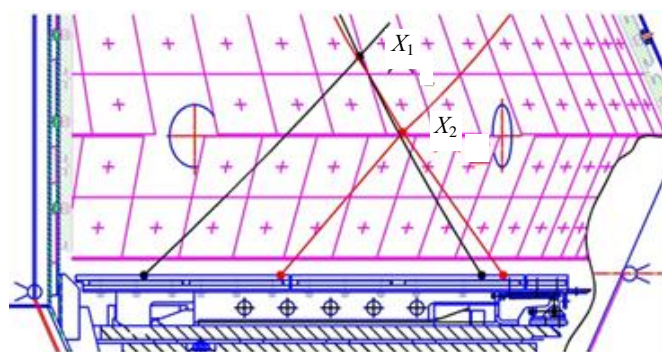


Рис. 10. Положение сепаратрисы при разных токах в обмотке PF5: сепаратрисе X_2 соответствует ток $I_{PF5} = -0,02$ МАвиток, X_1 — ток $I_{PF5} = -0,32$ МАвиток

ВЫВОДЫ

Проведённые сравнения по двум кодам показали достаточную надёжность проработки базового омического сценария разряда. Вместе с тем окончательная конструкция установки несколько отличается от исследованной в данной работе (например, центральный соленоид смещён), поэтому желателен повторный уточняющий сценарий разряда по двум кодам.

Ожидаемые неточности в монтаже системы (± 1 — 2 см) не приводят к каким-либо существенным изменениям как формы, так и положения плазмы. Необходимые компенсирующие изменения внешних полей также невелики ($\pm 3\%$) и, безусловно, лежат в пределах технической возможности системы электропитания обмоток.

Проведены детальные исследования влияния токов полоидальной системы на геометрические характеристики плазменного шнура, такие, как эллиптичность, треугольность, положение X-точки, форма сепаратрисы и степень асимметрии по Z.

Работа поддержана грантами РФФИ № 08-07-00182, 08-01-00721 и договором между МГУ им. М.В. Ломоносова и Институтом атомной энергии НЯЦ РК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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, p. 193—201.
2. **Сычугов Д.Ю.** Код для расчета МГД-равновесия ТОКАМЕQ (модуль библиотеки программ «Виртуальный токамак»). — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 85—89.
3. **Сычугов Д.Ю.** Новая версия кода ТОКАМЕQ для расчета конфигураций с произвольным профилем тока и расширенным дивертором (модуль библиотеки программ «Виртуальный токамак»). — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 60—62.
4. **Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р.** Расчёт основных сценариев разряда на токамаке КТМ. Технический отчёт. ТРИНИТИ, г. Троицк, 2005 г.
5. **Dnestrovskij A., Voss G., Sychugov D., Lukash V., Khayrutdinov R.** Non-inductive current ramp up scenario and steady state regime optimization for Component Test Facility. — In: 34st EPS Conf. on Plasma Phys. Warsaw, 2007, P.-1.101.
6. **Khayrutdinov R.R., Lister J.B., Lukash V.E., Wainwright J.P.** Comparing DINA code simulations with TCV experimental plasma equilibrium responses. — *Plasma Phys. Control Fusion*, 2001, vol. 43, p. 321—342.
7. **Favez J-Y., Khayrutdinov R.R., Lister J.B., Lukash V.E.** Comparing TCV experimental VDE responses with DINA code simulations. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2002, vol. 44, p. 171—193.
8. **Lister J.B., Dokouka V.N., Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. et al.** Evolution of the DINA-CH tokamak full discharge simulator. — *Fusion Eng. and Design*, 2005, vol. 74, p. 633—637.
9. **Lukash V.E., Raju D., Dokouka V.N., Favez J.-Y., Khayrutdinov R.R., Lister J.B.** DINA simulations of TCV electron cyclotron heating discharges. — *Fusion Eng. and Design*, 2003, vol. 66—68, p. 767—770.
10. **Lukash V.E., Gribov Y., Kavin A., Khayrutdinov R.R., Cavinato M.** Simulation of ITER scenarios. — *Plasma Devices and Operations*, 2005, vol. 13, № 2, p. 143—156.
11. **Лукаш В.Э., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р.** Программно-вычислительный комплекс ДИНА в системе МАТЛАВ для решения задач управления плазмой токамака. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 1, с. 40—49.
12. **Хайрутдинов Р.Р.** Развитие моделей учёта магнитопровода в коде ДИНА при определении равновесной конфигурации плазмы токамака. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 62—67.
13. **Dnestrovskij A., Lukash V.E., Khayrutdinov R.R.** Calculations of current ramp-up scenarios for the component test facility tokamak using the DINA code. — *Plasma Devices and Operations*, 2007, vol. 15, № 3, p. 1—10.
14. **Вознесенский В.А., Гасилов Н.А., Днестровский Ю.Н., Кузнецов А.Б., Сычугов Д.Ю., Цаун С.В.** ТОКАМЕQ — код для расчета равновесия плазмы в токамаке. — М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2001.
15. **Какурин А.М., Леонов В.М., Ноткин Г.Е., Хвостенко П.П., Цаун С.В., Бондарчук Э.Н., Васильев В.И., Минеев А.Б., Максимова И.И., Амелин В.В., Гасилов Н.А., Сычугов Д.Ю.** Основные сценарии разряда токамака Т-15М. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 4, с. 53.
16. **Wilson H.R., Voss G.M., Akers R.J., Appel L., Christiansen J.P., Dnestrovskij A., Keating O., Hender T.C., Hole M.J., Huysmans G., Kirk A., Knight P.J., Loughlin M., McClemens K.G., O'Brien M.R., Sychugov D.Yu., Valovic M.** The physics basis of a spherical tokamak components test facility. — In: 31st EPS Conf. on Plasma Physics. London, 28 June — 2 July, 2004, ECA, vol. 28G, P-4.196.
17. **Dnestrovskij A., Voss G., Sychugov D., Lukash V., Khayrutdinov R.** Non-inductive current ramp up scenario and steady state regime optimization for component test facility. — In: 34st EPS Conf. on Plasma Phys. Warsaw, 2007, P.-1.101.
18. **Voss G.M., Davis S., Dnestrovskij A., Kirk A., Knight P.J., Loughlin M., O'Brien M., Sychugov Yu.D., Tabasso A., Wilson H.R.** Conceptual design of a component test facility based on the spherical tokamak. — In: ISFNT-8 Conf. Heidelberg, Germany, October 2007, PS3-1005.
19. **Герасимов С.Н., Попов А.М., Сычугов Д.Ю.** Сравнение математического моделирования равновесия и МГД-устойчивости плазмы с экспериментом на установке Т-12. — *Физика плазмы*, 1983, т. 9, № 4, с. 688—696.
20. **Зайцев Ф.С.** Концепция библиотеки программ «Виртуальный токамак». <http://leader.ic.msu.su/~fusion/VT/VT.pdf>.
21. **Сычугов Д.Ю., Шишкин А.Г., Зайцев Ф.С., Лукаш В.Э., Семёнов И.Б., Хайрутдинов Р.Р., Зотов И.В., Нефедов В.В.** Библиотека программ «Виртуальный токамак». — В сб.: XI Межд. семинар «Супервычисления и математическое моделирование». Саров, 5—9 октября 2009 г., с. 101—102.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2009 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 1, с. 38—45.