УДК 621.039.616

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ НА ПОЛОЖЕНИЕ СЕПАРАТРИСЫ В ОБЛАСТИ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА Т-15МД*М.С. Горбун^{1, 2}, А.В. Мельников², Д.Ю. Сычугов³*¹*МФТИ (НИУ), Долгопрудный, Московская обл., Россия*²*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*³*Факультет Вычислительной математики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

В работе исследована возможность снижения локальных тепловых нагрузок на пластины дивертора в установке Т-15МД путём периодического перемещения области тепловыделения — положения сепаратрисы на пластине. Зависимость положения точки пересечения от вариаций токов в катушках полоидального поля была исследована для стационарной стадии разряда базовой магнитной конфигурации, рассчитанной ранее с помощью кодов DINA и TOKAMEQ. С помощью расчётов найден оптимальный сценарий управления положением сепаратрисы в области дивертора, в котором требуемое перемещение точек пересечения сепаратрисы и пластин дивертора достигается путём минимальных изменений токов в управляющих витках.

Ключевые слова: токамак Т-15МД, снижение тепловых нагрузок на дивертор, свипинг, оптимизация процедуры управления сепаратрисой.

INFLUENCE OF CONTROL CURRENTS VARIATION ON STRIKE-POINT POSITION IN THE DIVERTOR OF T-15MD TOKAMAK*M.S. Gorbun^{1, 2}, A.V. Melnikov², D.Yu. Sychugov³*¹*MIPT (State University), Dolgoprudny, Moscow region, Russia*²*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*³*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow, Russia*

Possibility of reducing the local thermal loads on the divertor plates of the tokamak T-15 MD by periodical moving the heat generation area (strike-point) was studied. The dependence of the strike-point position on the variations of currents in the poloidal field coils was investigated for the stationary stage of the discharge with the basic magnetic configuration, calculated earlier using the codes DINA and TOKAMEQ. The optimal scenario for controlling the position of the separatrix near divertor was found by numerical simulation, the required movement of strike-points was achieved by minimal changes in the currents in the control coils.

Key words: Tokamak T-15MD, reduction of heat loads on diverter, sweeping, optimisation of the separatrix control procedure.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-4-45-51

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» ведётся строительство модернизированного токамака Т-15МД с D-образной формой поперечного сечения плазмы и диверторной конфигурацией [1]. Его физическая программа охватывает широкий спектр задач современной физики горячей плазмы, таких как свойства удержания плазмы в крутом токамаке с сильным полем [2], повышение эффективности методов дополнительного нагрева плазмы с помощью ВЧ- и СВЧ-волн и горячих нейтральных атомов [3], исследование свойств альфвеновских собственных мод, возбуждаемых в плазме при дополнительном нагреве [4], роль электрического поля в процессах формирования турбулентности, включая зональные течения и геодезические акустические моды [5, 6], а также его влияние на перенос частиц и энергии поперёк удерживающего магнитного поля, развитие современных методов диагностики плазмы [2, 7]. На начальном этапе работы в Т-15МД планируется установить дивертор открытого типа. Одна из главных проблем, возникающих при эксплуатации диверторов, заключается в ограниченной тепловой прочности диверторных пластин, на которые приходится основная часть нагрузки. Превышение предельной тепловой нагрузки на диверторные пластины может стать причиной повреждений пластин и угрозой для стабильной работы токамака.

В настоящее время уже существуют базовые сценарии разрядов Т-15МД [8—11], рассчитанные с помощью кодов DINA и TOKAMEQ [12, 13]. В работе [14] было впервые проведено моделирование возможности снижения нагрузок на пластины дивертора путём периодического изменения положения точки пересечения сепаратрисы и пластины дивертора (сви́пинга) в динамике. Однако высокая индук-

тивность катушек полоидального магнитного поля является серьёзным затруднением при реализации этой процедуры. Поэтому желательно уменьшить диапазоны изменения управляющих токов, тем самым оптимизировать процесс управления сепаратрисой, а точнее — её положением на диверторных пластинах. Целью данной работы является оптимизация управления сепаратрисой или поиск минимальных диапазонов изменения управляющих токов, позволяющих осуществить применение метода свипинга [14—16] в токамаке Т-15МД при использовании имеющихся катушек полоидального магнитного поля. С помощью расчётов стационарных равновесных магнитных конфигураций по коду ТОКАМЕQ был проведён анализ трёх возможных сценариев изменения токов в катушках полоидального поля и найдены наиболее эффективные способы управления сепаратрисой.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ В УСТАНОВКЕ Т-15МД

Полоидальное поле в установке создаётся шестью модулирующими катушками (PF1—PF6) и тремя катушками индуктора (CSU, CS0, CSD). Геометрические характеристики катушек, а также величины предельно допустимых токов, текущих по ним, приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристики катушек полоидального поля

Параметр	Катушка								
	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	CSU	CS0	CSD
Количество витков	100	100	48	60	80	216	154	442	154
Максимальный ток в витке, кА	20	20	20	20	20	20	40	40	40
Максимальный ток в катушке, МА-виток	2,0	2,0	0,96	1,2	1,6	4,32	6,16	17,7	6,16
Площадь сечения катушки, м ²	0,25	0,28	0,12	0,17	0,22	1,31	0,46	1,35	0,46
z-координата катушки, м	2,29	2,08	0,94	−0,86	−2,30	−3,00	1,77	0	−1,77
r-координата катушки, м	0,87	2,32	3,04	3,24	2,63	0,74	0,34	0,34	0,34

За основу последовательности анализируемых в работе равновесных конфигураций была взята базовая однонулевая конфигурация плазмы, рассчитанная в [2] (малый радиус $a = 66$ см, вытянутость $\varepsilon = 1,75$, треугольность $\delta = 0,317$), которая изображена на рис. 1. Значения токового бета и внутренней индуктивности в базовой конфигурации были соответственно равны $\beta = 0,18$, $l = 0,7$, что соответствует омическому нагреву плазмы и широкому (не пикированному) профилю тока. Токи в катушках полоидального поля этой конфигурации представлены в табл. 2.

Рис. 1. Вертикальное сечение Т-15МД, направление тока в катушках: — положительное совпадающее с током плазмы, — отрицательное, — катушка с нулевым током

Т а б л и ц а 2. Токи в базовой конфигурации

Катушка	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	CSU	CS0	CSD
I , кА	0	210	698	1047	400	3155	1055	15056	5147

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 показано, что положение «усов» сепаратрисы должно быть наиболее чувствительно к изменению величин токов в ближайших к ним катушках PF5 и PF6. Однако скорость изменения тока в магнитных катушках крупного размера сильно ограничена её высокой индуктивностью, поэтому практическая реализация свипинга требует уменьшения диапазона вариаций тока в каждой отдельной катушке.

Первый вариант постановки задачи состоит в достижении максимального изменения положения внешней и внутренней точек пересечения «уса» сепаратрисы с пластиной дивертора («страйк-поинтов») при сохранении положения центра плазменного шнура.

Второй вариант более жёсткий, в нём накладывается дополнительное условие: изменение малого радиуса и площади сечения плазмы должно находиться в пределах 1%. В обоих вариантах перемещение «уса» должно превышать 3 см.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для расчётов равновесных конфигураций применялся код ТОКАМЕQ [12], позволяющий путём автоматического подбора величин внешних токов получать решения уравнения Грэда—Шафранова с наперёд заданными геометрическими параметрами: площадью сечения плазменного шнура, положением его центра, а также эллиптичностью. Изменение положения страйк-поинтов осуществлялось двумя способами:

- 1-й способ — за счёт изменения тока в одной катушке PF5;
- 2-й способ — за счёт изменения тока в двух катушках PF5 и PF6.

При использовании обоих способов центр плазменного шнура удерживался в первоначальном положении с помощью подбора токов в PF3 и PF4.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Рис. 2. Изменение токов в управляющих катушках (звёздочками в легенде отмечены токи, полученные способом 2 — изменением тока в катушках PF3—PF6): ● — I_{PF3} , ● — I_{PF4} , ● — I_{PF5} , ● — I_{PF6} (кА)

Результаты расчётов приведены на рис. 2—6. На рис. 2 показано, что в случае использования четырёх катушек для изменения положения страйк-поинтов вместо трёх мы видим уменьшение диапазона изменения тока в PF5 с 200—450 до 300—450 кА-виток (синяя и красная кривые). Диапазон изменения тока в PF3 и PF4 при изменении тока в PF5 от 200 до 450 кА-виток и тока в PF6 от 2850 до 3155 кА сравним с диапазоном их изменения при токе в PF5 от 300 до 450 кА-виток и неизменном токе в PF6. Пунктирная линия изображает предельно допустимый ток в катушке PF4. Две из десяти предложенных конфигураций имеют ток, достаточно близкий к этому пределу, что может затруднить техническую реализацию этих конфигураций. Однако ни один из токов не превышает предела, который указан в [3] как допустимый.

Применение способа 2 (использования четырёх катушек для изменения положения страйк-поинтов) позволяет лучше сохранять геометрию плазменного шнура, и тем самым создавать меньшее отклонение от стандартной конфигурации. Расчёты показывают, что способ 2 позволяет достичь качественного уменьшения диапазона изменения для малого радиуса плазмы a (рис. 3, а) и площади сечения шнура S (рис. 3, б) при изменении I_{PF5} в интервале от 300 до 450 кА-виток.

Рис. 3. Зависимость малого радиуса (а) и площади сечения плазмы (б) от тока в PF5: способ 1 — изменение тока в PF3—PF5 (●); способ 2 — изменение тока в PF3—PF6 (●)

На рис. 4 *а, б* показано, как меняется сепаратриса. На рис. 4, *а* показано, что при реализации первого способа увеличение тока в PF5 влияет на внешний «ус» сильнее, чем на внутренний. При реализации второго способа это различие сглаживается за счёт изменения тока в PF6 (см. рис. 4, *б*).

Рис. 4. Положение сепаратрисы в области диверторных пластин (—) для конфигураций с минимальным током в PF5: способ 1 — изменение тока в PF3—PF5 (*а*); способ 2 — изменение тока в PF3—PF6 (*б*); *а* — внутренний страйк-пойнт, ближайший к большой оси тора; *б* — внешний; — наименьший ток в PF5; — наибольший ток в PF5

На рис. 5 показано, что дополнительное изменение тока в PF6 (применение способа 2) увеличивает диапазон изменения положения точки пересечения обоих «усов» с диверторными пластинами.

Рис. 5. Смещение внутреннего (*а*) и внешнего (*б*) страйк-пойнтов

Таким образом, диапазон изменения положения точки пересечения «уса» с дивертором может достигать 3 см для внутреннего и 5 см для внешнего «уса».

Рис. 6. Ток в PF6 (●) как функция тока в PF5 (●) в сравнении с изменением тока в PF5

Резюмируя, можно предложить три способа управления сепаратрисой:

— способ 1. Ток в катушке PF5 менялся в пределах от 300 до 450 кА-виток с шагом 50 кА-виток, при этом токи в PF3 и PF4 подбирались, исходя из условия неизменности координат центра шнура, сохранения формы и размеров сечения шнура;

— способ 2. Ток в катушке PF5 менялся в пределах от 200 до 450 кА с шагом 50 кА, при этом токи в PF3 и PF4 подбирались, исходя из условия сохранения координат центра шнура, а ток PF6 подбирался с целью максимального сохранения формы и размеров сечения шнура;

— способ 2а. Способ 2а отличается от способа 2 тем, что ток в катушке PF5 изменялся в более узких пределах от 300 до 450 кА-виток с шагом 50 кА-виток (в пределах способа 1).

Эти способы были реализованы в виде серии рассчитанных равновесий.

Изменение тока в PF6 относительно тока в PF5 (при реализации способа 2) показано на рис. 6.

Рассмотрим преимущества различных способов решения этой задачи, опираясь на сводные табл. 3—5.

Т а б л и ц а 3. Диапазоны отклонений токов от базовой конфигурации, кА-виток

Способ	Задано	Рассчитано	PF3	PF4	PF5	PF6
1	PF5	PF3, PF4	49	130	150	0
2	PF5, PF6	PF3, PF4	57	149	250	305
2а	PF5, PF6	PF3, PF4	46	57	150	305

Примечание. «Задано» и «Рассчитано» относятся к токам в указанных катушках: заданные вручную или рассчитанные кодом при условии сохранения положения центра плазменного шнура.

Т а б л и ц а 4. Максимальные отклонения токов, % от базовой конфигурации

Способ	Задано	Рассчитано	PF3	PF4	PF5	PF6
1	PF5	PF3, PF4	7	11,5	25	0
2	PF5, PF6	PF3, PF4	8,2	13,4	50	9,7
2а	PF5, PF6	PF3, PF4	6,7	4,6	25	9,7

Т а б л и ц а 5. Диапазоны изменений и максимальные отклонения от базовой конфигурации геометрических параметров конфигураций

Способ	Δa , см	ΔS , м ²	δa , %	δS , %	$\Delta \xi_i$, см	$\Delta \xi_o$, см
1	1,7	0,12	1,8	3,4	1,4	3,8
2	2,2	0,14	2,5	4,0	3,2	5,0
2а	0,9	0,06	0,5	0,6	2,5	1,7

Примечание. Δa — диапазон изменения малого радиуса, ΔS — диапазон изменения площади сечения шнура, δa , δS — их относительные изменения соответственно, $\Delta \xi_i$, $\Delta \xi_o$ — диапазон изменения положения внутреннего и внешнего страйк-поинтов соответственно.

К преимуществам первого способа можно отнести постоянство тока в катушке PF6, самой большой и обладающей наибольшей индуктивностью, и изменение тока только в трёх, а не четырёх катушках. Это обстоятельство облегчает задание и исполнение программы изменения тока в катушках PF3—PF5 во время разряда.

В противовес этому второй способ предлагает больший диапазон положения страйк-поинта (5 вместо 3,8 см для внешнего «уса» и 3,2 вместо 1,4 см для внутреннего).

Главное преимущество третьего способа 2а — сохранение геометрии плазменного шнура. Относительные изменения малого радиуса и площади сечения шнура лежат в пределах 1%, чего невозможно добиться первыми двумя способами. Кроме того, этот способ предусматривает минимальное изменение тока в катушках PF3 и PF4 (6,7 и 4,6% соответственно).

ВЫВОДЫ

Вычисления показали принципиальную возможность оптимизации процедуры управления сепаратрисой, без установки дополнительных витков с использованием только имеющихся катушек полоидального поля. Оптимизация дала возможность снизить интервал изменения токов в катушках, что позволит снизить технические трудности при реализации «сви́пинга» и получить разряды T-15МД с большой мощностью нагрева и длительностью разряда для решения задач физической программы установки. Найденные с помощью кода ТОКАМЕQ конфигурации лягут в основу проектирования диагностик, в частности, расчетов траекторий зондирующих тяжёлых ионов для исследования электрических полей и турбулентности плазмы [17, 18]. Дальнейшие исследования будут посвящены расчётам устойчивости найденных конфигураций, а также сценариев плавного перехода между найденными равновесными магнитными конфигурациями.

Работа поддержана грантами РФФИ № 17-07-00544 и 17-07-00883, расчёты по методу 2 выполнены за счёт гранта РНФ 19-12-00312.

REFERENCES

1. **Khvostenko P.P., Anashkin I.O., Bondarchuk E.N., Inyutin N.V., Krylov V.A., Levin I.V., Mineev A.B., Sokolov M.M.** Experimental thermonuclear installation tokamak T-15MD. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2019, vol. 42, issue 1, pp. 15—38 (in Russian).
2. **Melnikov A.V., Sushkov A.V., Belov A.M., Dnestrovskij Yu.N., Eliseev L.G., Ivanov D.P., Kirneva N.A., Korobov K.V., Krupin V.A., Lysenko S.E., Mukhovatov V.S., Mustafin N.A., Perfilov S.V., Razumova K.A., Roy I.N., Savrukhin P.V., Strelkov V.S., Shestakov E.A., Tilinin G.N., Vdovin V.L.** Physical program and diagnostics of the T-15 upgrade tokamak: brief overview. — Fusion Engineering and Design, 2015, vol. 96—97, pp. 306—310.
3. **Ongena J., Messiaen A.M., Melnikov A.V., Ragona R., Kazakov Ye.O., Van Eester D., Dnestrovskii Y.N., Khvostenko P.P., Roy I.N., Romannikov A.N.** Conceptual study of an ICRH system for T-15MD using traveling wave antenna (TWA) sections. — Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 146, pp. 787—791.
4. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Ascasibar E., Chmyga A.A., Hidalgo C., Ido T., Jiménez-Gómez R., Komarov A.D., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Khrebtov S.M., Könies A., Kuznetsov Yu.K., López-Fraguas A., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Nagaoka K., de Pablos J.L., Pedrosa M.A., Perfilov S.V., Smolyakov A.I., Spong D.A., Ufimtsev M.V., Yamamoto S. and the TJ-II Team.** Alfvén eigenmodes properties and dynamics in the TJ-II Stellarator. — Nucl. Fusion, 2012, vol. 52, p. 123004.
5. **Melnikov A.V., Vershkov V.A., Eliseev L.G., Grashin S.A., Gudozhnik A.V., Krupnik L.I., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Perfilov S.V., Shelukhin D.A., Soldatov S.V., Ufimtsev M.V., Urazbaev A.O., Van Oost G., Zimeleva L.G.** Investigation of geodesic acoustic mode oscillations in the T-10 tokamak. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, pp. S87—S110.
6. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Perfilov S.V., Lysenko S.E., Shurygin R.V., Zenin V.N., Grashin S.A., Krupnik L.I., Kozachek A.S., Solomatin R.Yu., Elfimov A.G., Smolyakov A.I., Ufimtsev M.V.** The features of the global GAM in OH and ECRH plasmas in the T-10 tokamak. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 063001.
7. **Sushkov A.V., Belov A.M., Igonkina G.B., Kachkin A.G., Khayrutdinov E.N., Melnikov A.V., Sokolov M.M.** Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities on the T-15MD tokamak. — Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 146, pp. 383—387.
8. **Andreev V.F., Ivanov A.A., Kasyanova N.V., Lukash V.E., Medvedev S.Yu., Melnikov A.V., Sadykov A.D., Sushkov A.V., Sychugov D.Yu., Khayrutdinov R.R.** The modelling of plasma equilibria and stability in modernized T-15 device. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2014, issue 3, pp. 48—55 (in Russian).
9. **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: 41st EPS Conf. on Plasma Physics. Berlin, Germany, 2014, vol. 38F, P4.072.
10. **Sychugov D.Yu., Zotov I.V., Kasyanova N.V., Melnikov A.V., Dokuka V.N., Lukash V.E., Khayrutdinov R.R., Tsaun S.V., Sadykov A.D.** Analysis of initial stage of the discharge in the T-15 tokamak. — In: 44rd EPS Conf. on Plasma Physic. Belfast, Northern Ireland, 2017. Europhysics Conference Abstracts (ECA), series F, P1.142.
11. **Sychugov D.Yu., Zotov I.V., Kasyanova N.V., Melnikov A.V., Sushkov A.V., Sadykov A.D., Shapovalov G.V.** Analysis of discharge scenarios in the T-15 tokamak. — J. of Physics: Conference Series, 2017, vol. 907, p. 012011.
12. **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).
13. **Lukash V.E., Dokuka V.N., Khayrutdinov R.R.** Simulation code DINA into MATLAB environment for development of tokamak plasma control design. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2004, issue 1, pp. 41—50 (in Russian).
14. **Dubrov M.L., Khayrutdinov R.R., Lukash V.E., Dokuka V.N., Sokolov M.M.** Modeling control of diverted plasma of the T-15 tokamak. — In: 44th EPS Conf. on Plasma Physics. Belfast, Northern Ireland, 2017, P4.154.
15. **Li M.Y., Maviglia F., Federici G., You J.H.** Sweeping heat flux loads on divertor targets: thermal benefits and structural impacts. — Fusion Engineering and Design, 2016, vol. 102, pp. 50—58.
16. **Soukhanovskii V.A.** A review of radiative detachment studies in tokamak advanced magnetic divertor configurations. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2017, vol. 59, p. 064005.
17. **Drabinskiy M.A., Melnikov A.V., Khabanov P.O., Eliseev L.G., Kharchev N.K., Ilin A.M., Sarancha G.A., Vadimov N.A.** Conceptual design of the heavy ion beam probe diagnostic for the T-15MD tokamak. — JINST, 2019 (in press).
18. **Ilin A.M., Khabanov P.O., Melnikov A.V.** Probing ion trajectory simulations for the HIBP diagnostics at the T-

15MD tokamak. — J. of Physics: Conference Series, 2019 (in press).

AUTHORS

Gorbun M.S. Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, 141700 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russia ; NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Melnikov A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Melnikov_07@yahoo.com

Sychugov D.Yu. M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Leninskie gory 1-52, 119991 Moscow, Russia; sychugov@cs.msu.su

Received 24 September 2019

Revised 27 September 2019

Accepted 30 September 2019

Problems of Atomic Science and Technology

Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 4, pp. 45—51