

*М.С.Горбун<sup>1,2</sup>, А.В.Мельников<sup>1,2,3</sup>, Д.Ю.Сычугов<sup>4</sup>*

## МАГНИТНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТРЕУГОЛЬНОСТЬЮ В УСТАНОВКЕ ТОКАМАК Т-15МД

### Введение

Большинство современных токамаков, включая строящийся сейчас в г. Кадараше (Франция) международный токамак-реактор ИТЭР, имеют диверторную магнитную конфигурацию, в которой сепаратриса (крайняя магнитная поверхность плазмы) имеет X-точку, а вертикальное сечение плазмы имеет D-образную форму (положительную треугольность). В современных установках типичные значения эллиптичности сечения плазменного шнура составляет величины  $\epsilon = 1.8 - 2.5$  и треугольности  $\delta = 0.2 - 0.4$ .

Однако недавние эксперименты заставляют усомниться в бесспорности выбора таких типичных, "стандартных" конфигураций. В 1997 на токамаке TCV был впервые получен разряд с отрицательной треугольностью (то есть сечением плазмы с формой обратного D), характеризующийся некоторым небольшим улучшением удержания плазмы [1]. Совсем недавно, в 2019 году, на установках TCV и DIII-D были получены режимы с отрицательной треугольностью и с уже существенным улучшением удержания плазмы в разрядах по сравнению со "стандартными" режимами [2]. Известно, что поперечный перенос энергии и частиц в токамаке связан с турбулентными процессами. Механизмы влияния отрицательной треугольности на турбулентность и улучшение удержания плазмы на данный момент не изучены. В то же время поиск режимов с улучшенным удержанием плазмы остается одним из наиболее важных направлений современных исследований в области управляемого термоядерного синтеза.

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» завершен монтаж модернизированного токамака Т-15МД и ведутся работы по его подготовке к физическому пуску. Базовая конфигурация плазменного шнура на этой установке является диверторной, D-образной,

---

<sup>1</sup> Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (научно-исследовательский университет), г. Долгопрудный, Российская Федерация

<sup>3</sup> Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

несимметричной по  $z$ , с одной  $X$ -точкой и будет иметь малый радиус  $a = 0,67$  м;  $\varepsilon = 1,75$ ;  $\delta = 0,317$  [3, 4]. Вместе с тем, намеченная программа исследований на этой установке может расширяться, в том числе и исследованиями режимов с отрицательной треугольностью. Предварительные расчеты показали, что магнитная система Т-15МД обладает достаточной гибкостью, и позволяет значительно изменять параметры конфигурации, включая положение  $X$ -точки сепаратрисы и точек пересечения сепаратрисы с дивертором [5] и объем плазмы [6]. В то же время важной частью научной программы Т-15МД является исследование процессов, влияющих на турбулентность и перенос плазмы [7].

Вопрос возможности создания на Т-15МД конфигураций с отрицательной треугольностью при помощи уже смонтированной системы катушек полоидального поля представляет интерес для научной программы установки и является целью данной работы.

## 1. Математическая модель, алгоритм и программный ресурс расчета МГД равновесия плазмы

Сама постановка задачи, численный метод ее решения и численные коды, применяющиеся в расчетах, подробно описаны нами в предыдущей работе [5], поэтому мы здесь ограничимся лишь кратким ее описанием. Математическая постановка задачи основана на двумерном уравнении МГД равновесия плазмы Грэда—Шафранова [8]. В настоящее время алгоритмы решения такой задачи хорошо отработаны, доведены до уровня стандартных кодов и включены в совместно разработанную сотрудниками факультета ВМК, исследователями НИЦ "Курчатовский Институт" и Института Атомной Энергии Казахстана библиотеку программ "Виртуальный токамак" [9], основные модули которой выложены на сайте [pfusion.cs.msu.ru](http://pfusion.cs.msu.ru) [10]. Программы библиотеки показали свою эффективность при расчетах равновесных конфигураций, а также при проектировании электромагнитной диагностики [11], анализе условий старта разряда [12, 13] и расчете сценариев разряда [14].

## 2. Результаты расчётов

Полоидальное поле в установке создаётся шестью полоидальными катушками (PF1—PF6) и тремя катушками индуктора (CSU, CS0, CSD). Геометрические характеристики катушек и величины предельно допустимых токов, которые могут течь по ним, приведены в нашей предыдущей работе [6]. Исследование влияния токов в катушках полоидального поля на форму сечения плазмы в Т-15МД с помощью расчетов стационарных магнитных конфигураций по коду TOKAMEQ [9]

показало возможность получения конфигураций с различными значениями отрицательной треугольности. Были найдены пары конфигураций, идентичные по основным геометрическим параметрам (объём, малый радиус, вытянутость и др.) и равной по модулю треугольностью, но различающиеся по ее знаку. Как оказалось, заложенная в основу Т-15МД магнитная система обладает значительно большими возможностями, чем предполагалось ранее.

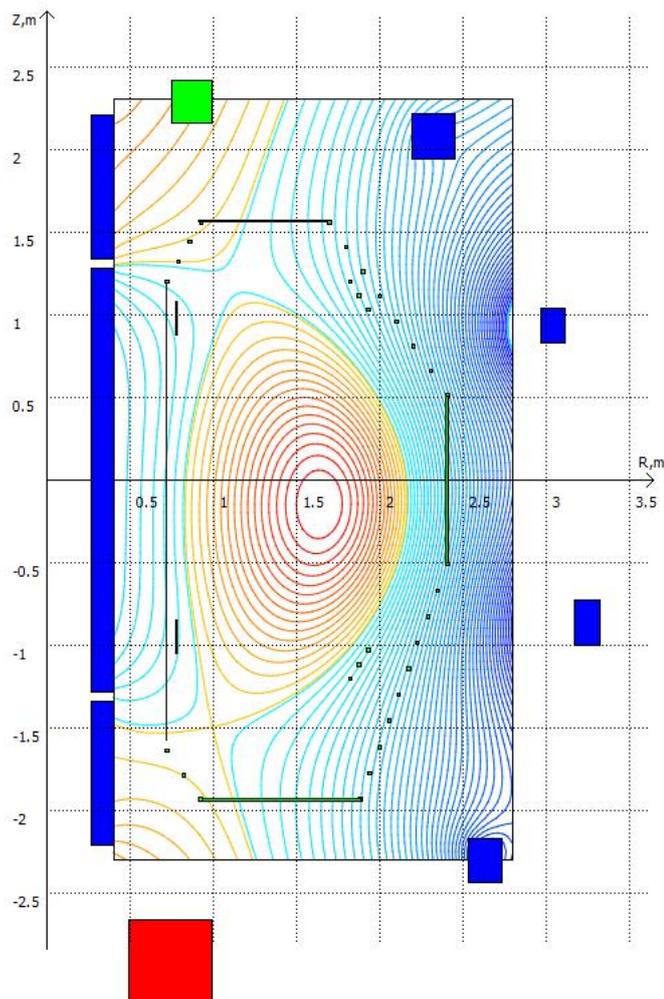


Рис 1. Базовая конфигурация разряда в Т-15МД с положительной треугольностью.

Эти возможности иллюстрирует таблица, в которой показано, каким образом можно, изменяя величины токов, управлять формой сечения шнура и получать конфигурации с отрицательной треугольностью. В первой строке приведены величины внешних токов, соответствующих базовой конфигурации в Т-15МД [3].

Т а б л и ц а. Величины токов в витках магнитной системы Т-15 МД для получения различных магнитных конфигураций

CSU	CS0	SCD	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
-0.85	-15.05	-2.32	0	-0.1	-0.79	-0.93	-0.36	0.055
0	2.5	0.5	0.4	0,7	-0.28	-1.16	0.6	2.1
0	2.5	-0.1	-0.2	1.3	-0.96	-1.27	1.2	0.4

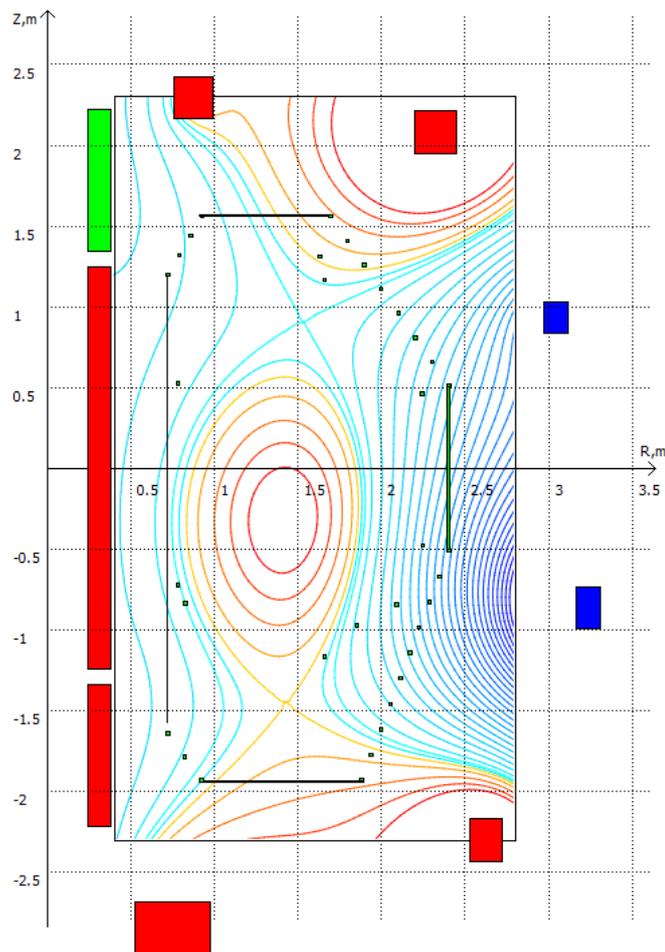


Рис 2. Однонулевая конфигурация с отрицательной треугольностью.

Линии уровня магнитного потока  $\psi(r, z) = const$ , соответствующие данному равновесию, приведены на рисунке 1. При этом сечением плазменного шнура является "капля" с одним острием (однонулевая конфигурация). Красный цвет линий уровня соответствует значениям магнитного потока большей величины, чем на границе плазмы, при этом весь плазменный ток сосредоточен только внутри "капли". Синий цвет линий уровня соответствует значениям магнитного потока меньшей

величины, чем на границе плазмы. По катушкам, которые выделены красным цветом, ток течет в том же направлении, что и по плазме (положительному), синий цвет выделения катушек соответствует отрицательному току. Зеленым цветом выделены незадействованные катушки, ток в которых равен нулю.

Во второй и третьей строках таблицы приведены величины внешних токов, создающие однонулевую (рисунок 2) и двухнулевую (рисунок 3) конфигурации с отрицательными треугольностями сечения шнура. При этом величины полного тока в плазме составляли 2МА, 1 МА и 1.4 МА соответственно.

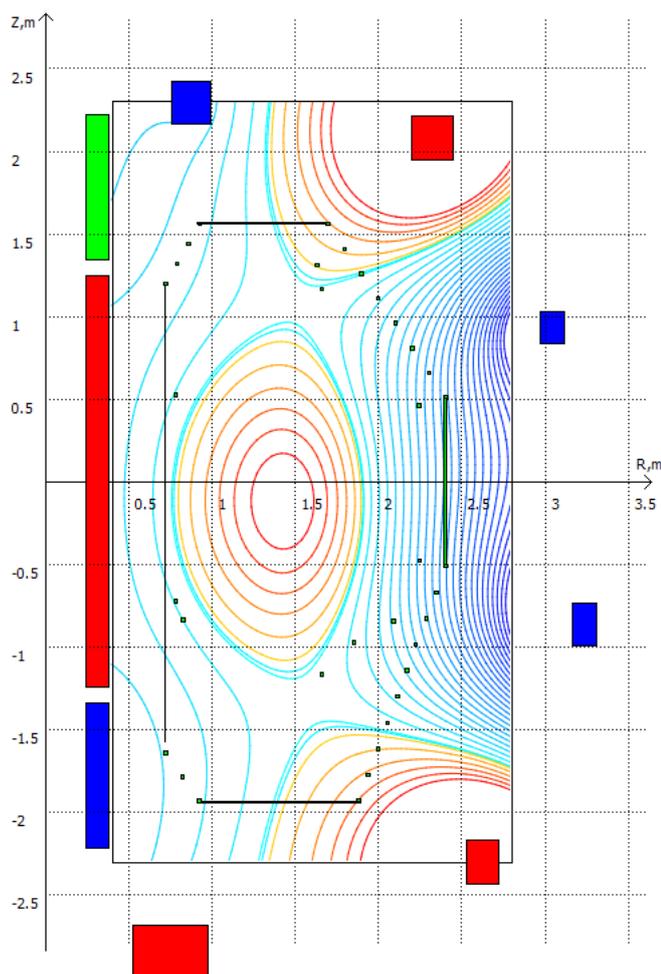


Рис 3. Двухнулевая конфигурация с отрицательной треугольностью.

### 3. Выводы

Проведенные расчеты показали, что "гибкость" установки Т-15МД оказалась выше тех представлений, которые имелись при ее проектировании и строительстве. Это обстоятельство позволит расширить

намеченную программу исследований, включив в нее исследования разрядов с отрицательной треугольностью.

#### 4. Благодарности

Расчеты выполнены при поддержке Российского Научного Фонда, проект 19-12-00312. Д.Ю. Сычугов благодарит РФФИ проект № 20-07-00391 за поддержку исследований. А.В. Мельников благодарит программу повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ за поддержку.

#### Литература

1. *J.-M. Moret, S. Franke, H. Weisen, M. Anton, R. Behn, B. P. Duval, F. Hofmann, B. Joye, Y. Martin, C. Nieswand, Z. A. Pietrzyk, and W. van Toledo.* Influence of Plasma Shape on Transport in the TCV Tokamak. // *Physical Review Letters*, 1997. V. 79 (11), P. 2057–2060.
2. *M. E. Austin, A. Marinoni, M. L. Walker, M. W. Brookman, J. S. deGrassie, A. W. Hyatt, G. R. McKee, C. C. Petty, T. L. Rhodes, S. P. Smith, C. Sung, K. E. Thome, and A. D. Turnbull.* Achievement of Reactor-Relevant Performance in Negative Triangularity Shape in the DIII-D Tokamak// *Physical Review Letters*, 2019, V. 122, 115001.
3. *Андреев В.Ф., Иванов А.А., Касьянова Н.В., Лукаш В.Э., Медведев С.Ю., Мельников А.В., Садыков А.Д., Сушков А.В., Сычугов Д.Ю., Хайрутдинов Р.Р.* Расчёты равновесия и устойчивости плазмы для модернизированного токамака Т-15. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный Синтез*, 2014, вып. 3, с. 48—55.
4. *N.V. Kasyanova, V.F. Andreev, A.V. Melnikov, A.V. Sushkov, D.Yu. Sychugov, A.D. Sadykov.* Calculation of the equilibrium plasma configurations with high elongation and triangularity for the T-15 Upgrade tokamak // 41-st EPS Conference on Plasma Physics, 2014, ECA Vol. 38A, Rep. P4.072 <http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/pdf/P4.072.pdf>
5. *Горбун М.С., Мельников А.В., Сычугов Д.Ю.* Влияние вариации управляющих токов на положение сепаратрисы в области дивертора токамака Т-15МД. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный Синтез*, 2019, том 42, № 4, с. 45-51.
6. *Горбун М.С., Мельников А.В., Сычугов Д.Ю., Садыков А.Д.* О возможности получения в установке Токамак Т-15МД разрядов с уменьшенным объемом плазменного шнура. // В сб. *Прикладная математика и информатика. Труды факультета Вычислительной*

математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020, т.64, с. 5-16.

7. *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 and V L Vdovin G.N.* Physical Program and Diagnostics of the T-15 Upgrade Tokamak: Brief Overview // *Fusion Engineering and Design*, 2015, V. 96–97 P. 306–310.
8. *Шафранов В.Д.* О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях. // *ЖЭТФ*, 1957, 33, вып.3, с. 710-722.
9. *Сычугов Д.Ю.* Код для расчёта МГД равновесия ТОКАМЕQ (модуль библиотеки программ «Виртуальный Токамак». // *ВАНТ. Сер. Термоядерный Синтез*, 2008, вып.4, с. 85—89.
10. *Высоцкий Л.И., Соловьев С.Ю., Сычугов Д.Ю.* Интернет-технологии интегрированного моделирования процессов в установках токамак. // *Computational nanotechnology*, 2018, том 1, с. 21-24.
11. *Zotov I.V., Melnikov A.V., Sychugov D.Yu., Lukash V.E., Khayrutdinov R.R.* Optimization of electromagnetic diagnostic system of the T-15 tokamak *Proc. 43<sup>rd</sup> EPS Conference on Plasma Physics (Leuven, Belgium, 4–8 July 2016)* ECA Vol. 40A, P2.035 (<http://ocs.ciemat.es/EPS2016PAP/pdf/P2.035.pdf>)
12. *D.Yu. Sychugov, I.V. Zotov, N.V. Kasyanova, A.V. Melnikov, V.N. Dokuka, V.E. Lukash, R.R. Khayrutdinov, S.V. Tsaun, and A.D. Sadykov* Analysis of the initial stage of discharge in the T-15MD tokamak // *44th EPS Conf. on Plasma Physics, Belfast, North. Ireland, June 26- 30, 2017, UK, ECA Vol. 41F:P1.142* (<http://ocs.ciemat.es/EPS2017PAP/pdf/P1.142.pdf>)
13. *Сычугов Д.Ю., Zotov И.В., Мельников А.В., Цаун С.В., Андреев В.Ф.* Анализ начальной стадии разряда на установке токамак Т-15 // *Computational nanotechnology*. 2017. №2. С. 24—29.
14. *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. — *J. of Physics: Conference series*, 2017, Issue 907, 012011.