

УДК 621.039.061,519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ РАВНОВЕСНЫХ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ДЛЯ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК T-15МД

Д.Ю. Сычугов^{1,2}, Д.В. Рыжаков², В.Ф. Андреев², А.В. Горбунов^{2,3}, Н.А. Кирнева^{2,3}, Д.А. Кислов²,
Г.Е. Ноткин², А.В. Сушков², К.Н. Тарасян², Д.А. Шелухин², Э.Н. Хайрутдинов²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

В 2023 г. на установке токамак T-15МД были проведены две экспериментальные кампании. Основной задачей экспериментов было получение разрядов с током плазмы в диапазоне сотен килоампер и длительностью порядка нескольких секунд. Для получения равновесных магнитных конфигураций и обеспечения устойчивых сценариев разряда до начала экспериментов и во время кампании была проведена серия расчётов по коду TOKSEN. С учётом проведённых расчётов в ходе экспериментов были реализованы устойчивые конфигурации плазменного шнура с током до 250 кА и длительностью до 2 с.

Ключевые слова: установка токамак T-15МД, математическое моделирование, первые эксперименты, устойчивые разряды.

MODELING OF STABLE EQUILIBRIUM MAGNETIC CONFIGURATIONS FOR THE FIRST EXPERIMENTS ON THE TOKAMAK T-15MD INSTALLATION

D.Yu. Sychugov^{1,2}, D.V. Ryzhakov², V.F. Andreev², A.V. Gorbunov^{2,3}, N.A. Kirneva^{2,3}, D.A. Kislov²,
G.E. Notkin², A.V. Sushkov², K.N. Tarasyan², D.A. Shelukhin², E.N. Khairutdinov²

¹Lomonosov MSU, Moscow, Russia,

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

³NRNU MEPhI, Moscow, Russia

In 2023, two experimental campaigns were carried out at the T-15MD tokamak installation. The main goal of the experiments was to obtain discharges with a plasma current in the range of hundreds of kiloamperes and a duration of about several seconds. To obtain equilibrium magnetic configurations and ensure stable discharge scenarios, a series of calculations using the TOKSCEN code were carried out before the start of the experiments and during the campaign. Taking into account the calculations carried out during the experiments, stable configurations of the plasma cord with a current of up to 250 kA and a duration of up to 2 s were realized.

Key words: tokamak installation T-15MD, mathematical modeling, first experiments, stable discharges.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-3-5-16

ВВЕДЕНИЕ

Установка T-15МД — токамак с D-образным сечением плазменного шнура, сооруженный в НИЦ «Курчатовский институт» [1—3]. В настоящее время проводится вывод токамака на проектные параметры.

В 2023 г. на установке были проведены две экспериментальные кампании, основными задачами которых было осуществление пробоя и получение устойчивых режимов с токами порядка сотен килоампер при длительности импульса более 1 с. Эксперименты проводились в лимитерной конфигурации плазменного шнура.

В весенней кампании был проведён комплекс пусконаладочных работ базовых систем установки и получены первые разряды с плазмой. В ряде разрядов наблюдалась вертикальная неустойчивость плазменного шнура. Параметры указанных разрядов были проанализированы численно [4]. На основе результатов были выработаны рекомендации по обеспечению вертикальной устойчивости плазмы. В ходе экспериментов были проведены дополнительные расчёты для уточнения условий устойчивости по вертикали и обеспечения требуемого положения плазмы по большому радиусу токамака.

В статье описаны программные модули (численные коды), при помощи которых проводились расчёты; обсуждаются результаты анализа вертикальной устойчивости для одного из разрядов, выбранного в качестве опорного; описаны конфигурации внешних магнитных полей, обеспечивающие устойчивое положение шнура по вертикали; описаны расчёты по оптимизации положения плазмы по большому радиусу, проводившиеся в ходе экспериментов 2023 г.; сформулированы основные результаты работы.

ЧИСЛЕННЫЕ КОДЫ

Для расчёта сценария разряда используются следующие три численных кода, которые к настоящему времени интегрированы в единую систему [5].

Модуль PLASMALESS [6], который основан на численном решении системы уравнений Кирхгофа для обмоток полоидального поля, индуктора и токов, наведённых в вакуумной камере токамака:

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt} + \mathbf{R}\mathbf{I} = -\frac{\partial \Psi}{\partial t}. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{L}$ — матрица индуктивностей; $\mathbf{I}$ — вектор наведённых токов на пассивных элементах конструкции; $\mathbf{R}$ — вектор сопротивлений; Ψ — суммарный полоидальный магнитный поток, создаваемый катушками магнитного поля и пассивными витками.

Программа TOKAMEQ — модуль для расчёта МГД-равновесия плазмы в токамаке [7]. Для полоидального потока магнитного поля $\psi(r, z)$ решается задача расчёта стационарной равновесной магнитной конфигурации в неограниченной области пространства с условиями регулярности на главной оси тора и на бесконечности:

$$-\frac{1}{r} \Delta^* \Psi = \gamma \begin{cases} j_\phi(r, \Psi - \Psi_P) & \text{при } \Psi > \Psi_P \quad (\text{внутри плазмы}), \\ \sum_{k=1}^N I_k \delta(r - r_k, z - z_k) & \text{при } \Psi < \Psi_P \quad (\text{вне плазмы}), \end{cases} \quad (2)$$

$$\Psi(0, z) = 0, \quad (3)$$

$$\lim_{r, z \rightarrow \infty} \Psi(r, z) = 0, \quad (4)$$

здесь (r, Ψ, z) — цилиндрические координаты с осью z , направленной вдоль главной оси тора;

$$\Delta^* \Psi \equiv \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right); \quad (5)$$

$\gamma = 0,8\pi^2$ — размерный множитель, при котором расстояние измеряется в метрах, ток в МА, магнитное поле в Тл, магнитный поток в В·с (Веберах); r_k, z_k, I_k — координаты внешних проводников и величины токов в них (проводники могут считаться как бесконечно тонкими, так и имеющими конечные размеры); N — количество внешних проводников; Ψ_P — значение магнитного потока на границе плазмы. Сама граница плазмы изначально неизвестна и находится в процессе вычислений.

Программа TOKSTAB — модуль для расчёта вертикальной устойчивости плазмы с учётом конечной проводимости пассивных проводящих элементов конструкции (вакуумной камеры токамака и витков пассивной стабилизации) [8]. В его основе лежит модель пассивной обратной связи как с бесконечной, так и с конечной проводимостью витков пассивной стабилизации и модель «твёрдого сдвига» для идеально проводящей плазмы. Модель предполагает, что плазменный шнур движется по вертикали без изменения формы, как твёрдое тело, а смещение шнура от положения равновесия $\xi(t)$ полагается малым по сравнению с поперечными размерами плазмы.

Постановка задачи состоит в нахождении функции $\xi(t)$ из уравнения движения плазмы и уравнений Кирхгофа для витков пассивной стабилизации:

$$10^{-6} M \frac{d^2 \xi}{dt^2} = F_A' \xi(t) + F_1 I_1(t) + F_2 I_2 + \dots + F_N I_N(t); \quad (6)$$

$$L_{i1} \frac{dI_1}{dt} + \dots + L_{iN} \frac{dI_N}{dt} + R_i I_i = -I_P \frac{dL_{iP}}{d\xi} \frac{d\xi}{dt} = -\Phi_i \frac{d\xi}{dt}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (7)$$

Здесь M — масса плазменного шнура; $F_A' \xi$ — сила Ампера, возникающая при его смещении; I_k — наведённый ток в k -м пассивном витке; $F_k I_k$ — возвращающая сила со стороны k -го витка; N — число

витков; L_{ik} — коэффициенты взаимной (само-) индукции; R_i — омическое сопротивление; L_{ip} — коэффициент взаимной индукции между i -м витком и плазменным шнуром; I_p — полный ток в плазме.

Уравнения (6), (7) записаны в системе единиц: расстояние — метр [м], время — секунда [с], масса — килограмм [кг], сила тока — МегаАмпер [МА], сопротивление — Ом [Ом], магнитный поток — Вебер [В·с], индукция магнитного поля — Тесла [Тл], коэффициенты само- и взаимоиндукции — микроГенри [мкГн].

Подробный вывод для расчёта формул, входящих в систему (6), (7) коэффициентов приведён в работе [9].

С помощью подстановок $\xi(t) = \xi_0 e^{\gamma t}$, $v(t) = \xi'(t) = \xi_0 \gamma e^{\gamma t} = v_0 e^{\gamma t}$, $I_k(t) = I_{k0} e^{\gamma t}$, $k = 1, \dots, N$ (6), (7) преобразуются в систему линейных алгебраических уравнений, а задача нахождения функции $\xi(t)$ сводится к алгебраической задаче на собственные значения

$$\lambda B X = A X, \quad (8)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} -R_1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & -R_N & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ F_1 & \dots & F_N & F'_A & 0 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} L_{11} & \dots & L_{1N} & F_1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{N1} & \dots & L_{NN} & F_N & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & M \end{pmatrix}.$$

Далее вычисляется главное собственное значение, соответствующее задаче (8) $\lambda_0 = \alpha_0 + i\beta_0$, удовлетворяющее условию $\alpha_0 = \max_k (\operatorname{Re} \lambda_k)$. Если $\alpha_0 \leq 0$, то плазма устойчива.

Программа TOKSCEN — модуль для расчёта эволюции равновесной плазменной конфигурации в токамаке [8]. На каждом временном шаге совместно с решением уравнений Кирхгофа (1) производится расчёт квазистационарного равновесия плазмы (2)—(4). Контроль вертикальной устойчивости плазмы осуществляется в каждый момент времени путём решения задачи (8).

Коды TOKAMEQ и TOKSTAB реализованы как отдельно, так и в виде блоков, входящих в код TOKSCEN.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ

Для создания и поддержания тока плазмы в течение всего разряда используются индуктор и полоидальные обмотки. В токамаке Т-15МД обмотка индуктора состоит из секций CS1, CS2 и CS3 [2]. Задавая временную эволюцию токов в индукторе, можно обеспечить необходимый ток в плазме в течение всего разряда.

В табл. 1 даны электротехнические параметры секций обмотки индуктора CS1, CS2 и CS3. Предельные величины токов заданы как на один виток (кА), так и на суммарные на всю секцию (МА·витки).

Т а б л и ц а 1. Основные параметры секций обмотки индуктора

Параметр	CS1	CS2	CS3
N витков	151	445	151
$I_{\max}$, кА	40	40	40
$I_{\max}$, МА·витки	6,04	17,8	6,04
$U_{\max}$, кВ	1,188	3,24	1,188
R , Ом	0,0112	0,0328	0,0113
L , Гн	0,0072	0,0222	0,0063

Полоидальная система токамака Т-15МД состоит из шести обмоток PF1—PF6. Полоидальные обмотки необходимы для поддержания плазмы в равновесии в заданном месте вакуумной камеры, а также для обеспечения её устойчивости в течение всего разряда.

В табл. 2 приведены электротехнические параметры полоидальных обмоток PF1—PF6 [2].

Т а б л и ц а 2. Основные параметры полоидальных обмоток

Параметр	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
N витков	100	100	48	60	80	216
$I_{\max}$, кА	1,5	7	10	13	14	18
$I_{\max}$, МА·витки	0,15	0,7	0,48	0,78	1,12	3,888
$U_{\max}$, кВ	0,81	1,62	1,62	1,0044	3,915	2,025
R , Ом	0,033	0,076	0,0673	0,0704	0,0455	0,1095
L , Гн	0,042	0,123	0,082	0,087	0,044	0,320

На рис. 1 показаны полоидальное сечение вакуумной камеры токамака Т-15МД, полоидальные обмотки, индуктор и витки пассивной стабилизации.

АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗРЯДОВ

Оценка времени затухания токов Фуко в вакуумной камере и витках пассивной стабилизации. Система подавления вертикальной неустойчивости плазмы обычно имеет пассивные и активные элементы. Пассивные элементы включают вакуумную камеру и специальные стабилизирующие витки, изготовленные из материала с высокой проводимостью (медь или сплавы на её основе). Назначение пассивных элементов состоит в увеличении времени развития неустойчивости с МГД-времен $\sim 10^{-6}$ с до времени затухания токов Фуко в витках $\sim 10^{-2}—10^{-1}$ с. В этом случае становится возможным воздействие на плазменный шнур с помощью системы активной обратной связи (АОС). В отсутствие системы АОС время жизни разряда при вертикальной неустойчивости плазмы определяется характерным временем затухания токов в камере и пассивных витках τ_{decay} .

Целью первой серии расчётов, выполненных с помощью кода PLASMALESS, было определение времени τ_{decay} . Для этого решались уравнения Кирхгофа (1) с начальными условиями, имитирующими наличие тока на верхней части камеры некоторой амплитуды. Амплитуда тока роли не играет, так как характерное время спада определяется сопротивлением и индуктивностью камеры и витков пассивной стабилизации.

Результаты расчётов показаны на рис. 2. Видно, что токи в камере (изображены зелёными линиями) затухают за время ~ 10 мс, но при этом они успевают индуцировать токи в витках пассивной стабилизации (розовый цвет). В свою очередь, характерное время затухания токов в витках составляет ~ 100 мс для пары внутренних витков и ~ 200 мс для внешних.

Таким образом, при вертикальной неустойчивости плазменные разряды могут существовать максимум $\sim 100—200$ мс. Поскольку такое малое время не позволяет провести полноценные эксперименты с плазмой и надёжную проверку систем установки, возникла задача поиска равновесий, устойчивых без обратных связей.

Численный анализ импульса 451. По окончании весенней экспериментальной кампании был проведён численный анализ одного из разрядов — импульса 451. Поддер-

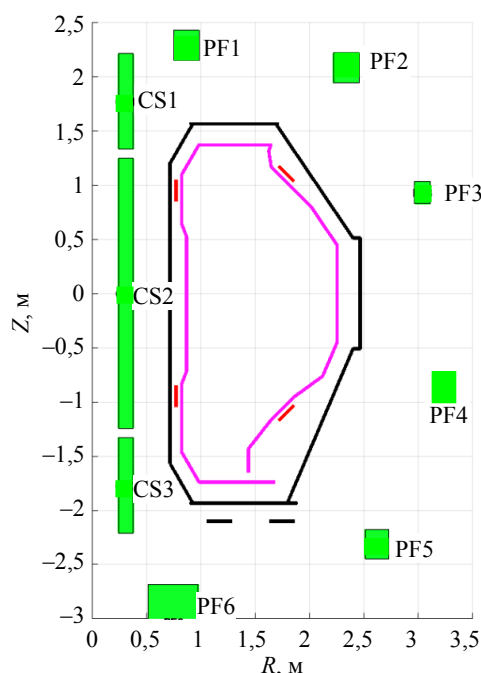


Рис. 1. Схема сечения вакуумной камеры установки Т-15МД (размеры даны в метрах): ■ — обмотки полоидального поля PF1—PF6, индукторы CS1—CS3; — вакуумная камера; — первая стенка, — витки пассивной стабилизации

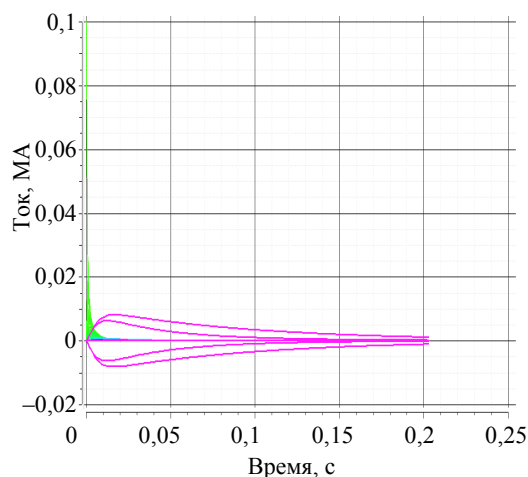


Рис. 2. Динамика затухания наведённых токов в элементах камеры (—) и в пассивных витках (—)

жание тока в этом разряде и его устойчивость обеспечивались за счёт токов в центральной секции соленоида CS2 и в катушках полоидального поля PF3, PF 4. В этом разряде ток в плазме достигал ~30 кА, и затем плазменный шнур уходил вверх и касался верхней части вакуумной камеры, что приводило к прекращению разряда за время порядка 10 мс.

Было высказано предположение, что причиной срыва разряда является неустойчивость по вертикали. Для подтверждения этой гипотезы была проведена серия расчётов по коду TOKSCEN. Опишем последовательность их проведения.

Результат расчёта равновесия в импульсе 451 перед срывом показан на рис. 3. Величины внешних токов (МА-витки), создающих данное равновесие, приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Величины внешних токов (заданы в МА-витках) равновесия в импульсе 451 перед срывом

CS1	CS2	CS3	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
0	-0,09434	0	0	0	-0,0251	-0,0315	0	0

Исследование устойчивости данного равновесия, проведённое с помощью кода TOKSTAB, показало, что шнур неустойчив по вертикали с инкрементом $\approx 57 \text{ с}^{-1}$ [4], что хорошо соответствует описанному эксперименту. Для объяснения причины возникновения неустойчивости с помощью кода PLASMALESS был проведён расчёт внешнего магнитного поля. Расчёты поля проводились в динамике, скорость изменения величин токов во всех катушках соответствовала экспериментальным данным. На рис. 4, а показана структура внешних магнитных поверхностей, она имеет «антибочкообразную» форму. При такой структуре внешних поверхностей плазменный шнур, смещаясь по вертикали, попадает в область более слабого магнитного поля, вследствие чего возникает неустойчивость. График нормализованной кривизны силовых линий $n(r, 0)$ (так называемого показателя спада)

$$n = -\frac{r}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial r} \quad (9)$$

показан на рис. 4, б. Видно, что всюду внутри камеры показатель спада находится глубоко в зоне отрицательных значений. Скачки кривизны поля на внешней и внутренней части стенки камеры возникают из-за наведённых на неё токов и не существенны для её внутренней рабочей части.

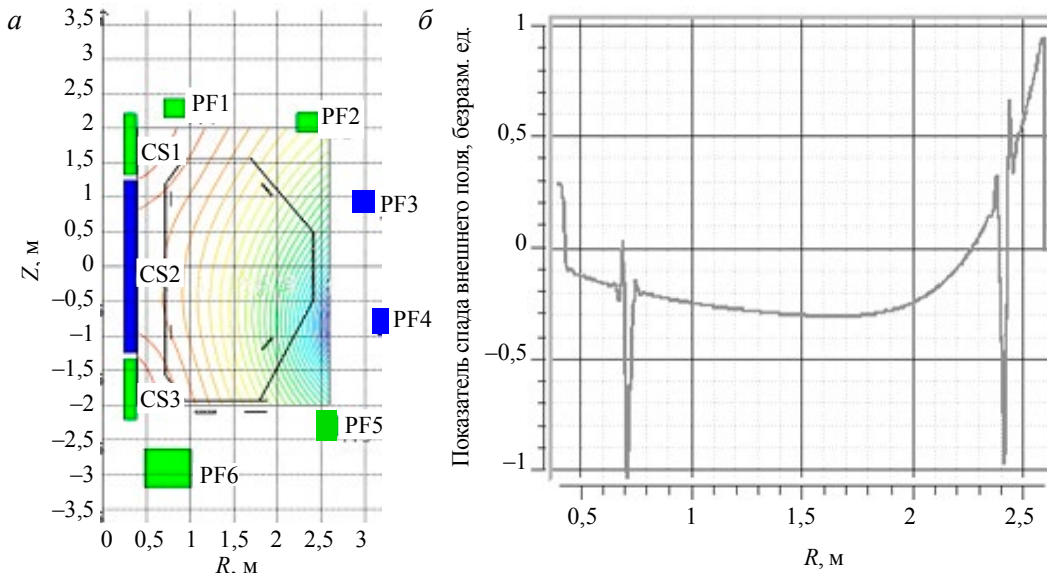


Рис. 4. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля (а) и показатель спада $n(r, 0)$ внешнего поля (б) в импульсе 451 перед срывом

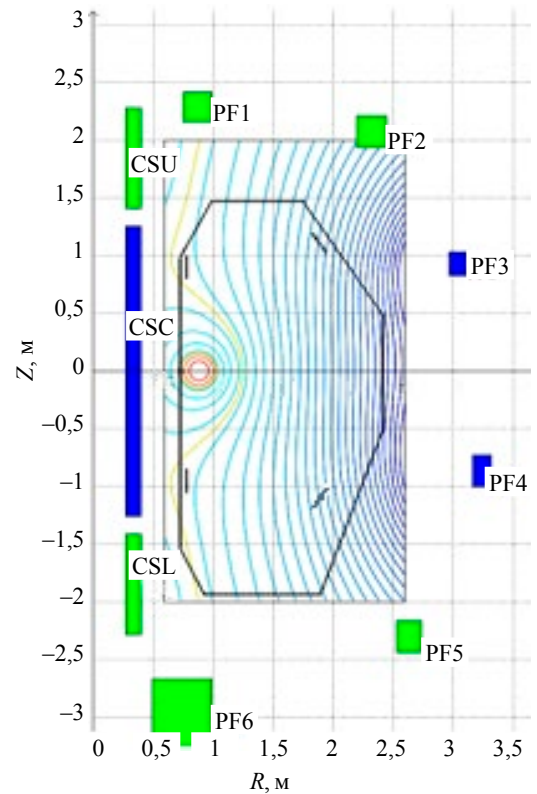


Рис. 3. Результат расчёта равновесия в импульсе 451 перед срывом. Равновесие получено с использованием двух полоидальных витков PF3, PF4 и центральной секции соленоида CS2 (■), токи в остальных витках равны нулю (■). На этом и следующих рисунках точкой на границе плазмы обозначено место контакта с первой стенкой

Таким образом, как расчёты, так и эксперименты показали, что в импульсе 451 плазма неустойчива по вертикали. Тем самым возникла задача обеспечения устойчивости плазмы за счёт коррекции внешних магнитных полей с учётом имеющихся ограничений системы питания.

СПОСОБЫ КОРРЕКЦИИ РАЗРЯДОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ

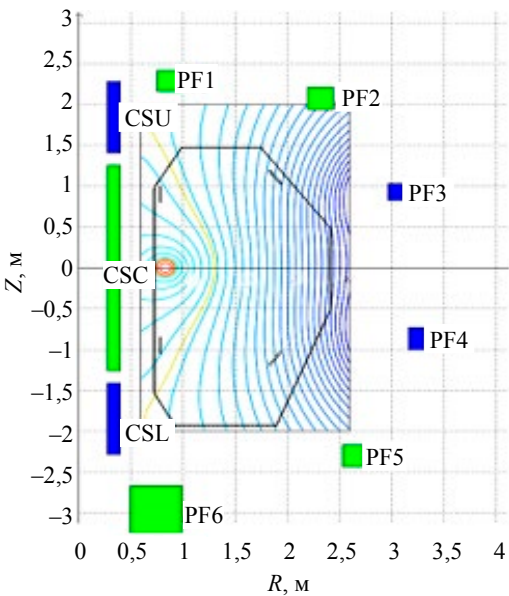


Рис. 5. Первый вариант стабилизации разряда за счёт перераспределения токов по секциям соленоида, плазма устойчива

На основании анализа вертикальной устойчивости плазменного шнура в импульсе 451 в ходе расчетов было предложено три способа коррекции разряда.

Коррекция за счёт перераспределения токов в секциях соленоида. Первый способ состоит в перераспределении величин тока в секциях соленоида при сохранении их суммы. Исходный вариант соответствовал $I_{CS1} = I_{CS3} = 0$, $I_{CS2} = -0,094$ МА·витков. На рис. 5 показан результат расчёта скорректированного равновесия на начальной стадии разряда, при $I_{CS1} = I_{CS3} = -0,047$ МА·витков, $I_{CS2} = 0$ величины токов в PF1—PF6 не менялись. На рис. 6 показаны линии уровня внешнего поля, которое становится бочкообразным, что приводит к устойчивости плазменного шнура.

Таблица 4. Величины внешних токов (заданы в МА·витках) для первого варианта коррекции равновесия в импульсе 451

CS1	CS2	CS3	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
-0,047	0	-0,047	0	0	-0,0251	-0,0315	0	0

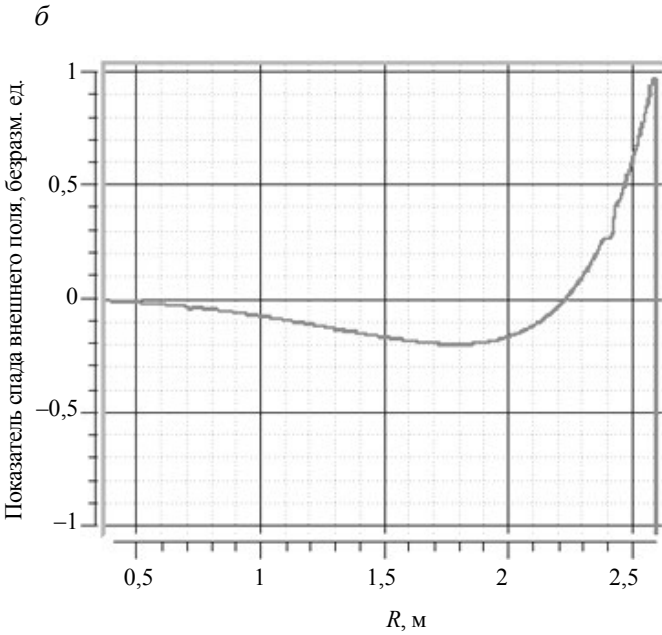
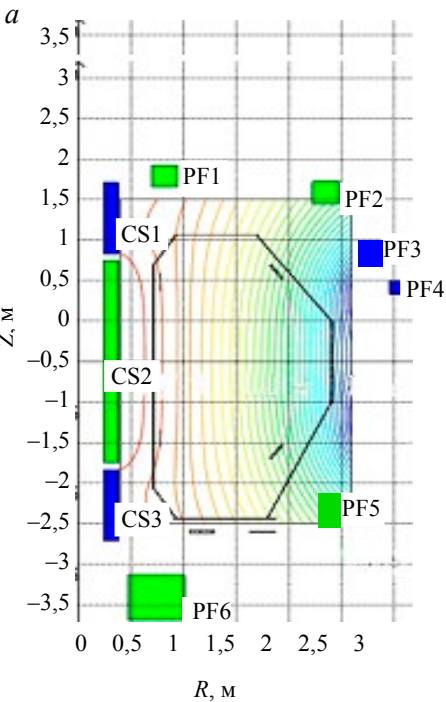


Рис. 6. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля (а) и показатель спада $n(r, 0)$ внешнего поля (б) для первого варианта коррекции

В случае использования всех трёх секций соленоида граница устойчивости находится при $I_{CS1} = I_{CS3} \approx -0,037$ МА·витков, $I_{CS2} \approx -0,020$ МА·витков.

Коррекция за счёт включения катушек PF1, PF6. Включение катушек PF1, PF6 приводит к созданию полей, препятствующих смещению шнура по вертикали. Примером такого способа коррекции

является устойчивое равновесие, магнитные поверхности которого показаны на рис. 7. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля и показатель спада $n(r, 0)$ внешнего поля для второго варианта коррекции показаны на рис. 8, а, б, величины внешних токов даны в табл. 5.

Таблица 5. Величины внешних токов (заданы в МА·витках) для второго варианта коррекции равновесия в импульсе 451

CS1	CS2	CS3	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
0	-0,09434	0	-0,07	0	-0,02706	-0,0315	0	-0,07

Этот способ стабилизации разряда пока ещё не был опробован экспериментально, однако он может пригодиться при поиске вертикально устойчивых равновесных состояний с некруглым сечением плазменного шнура.

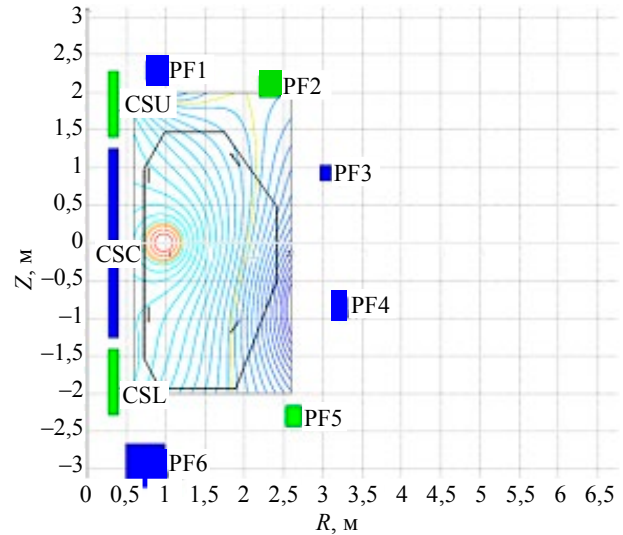


Рис. 7. Стабилизация разряда за счёт включения «запирающих» полей с помощью токов в катушках PF1, PF6, плазма устойчива (второй вариант коррекции)

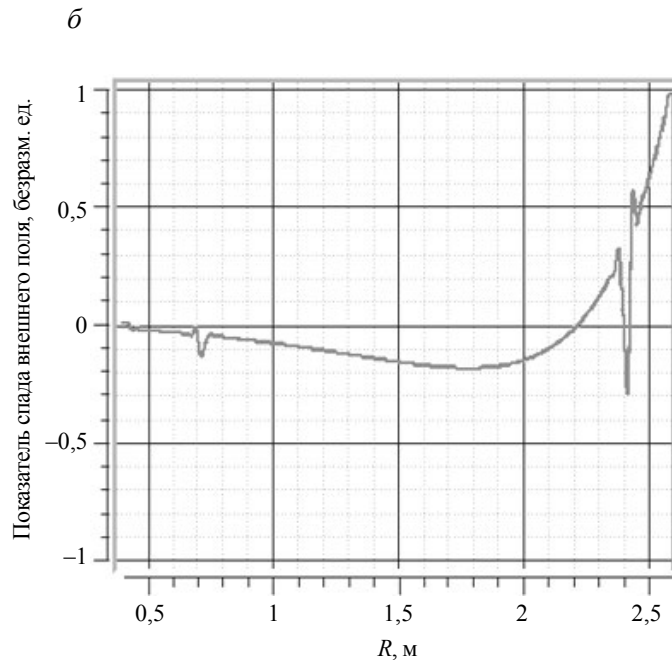
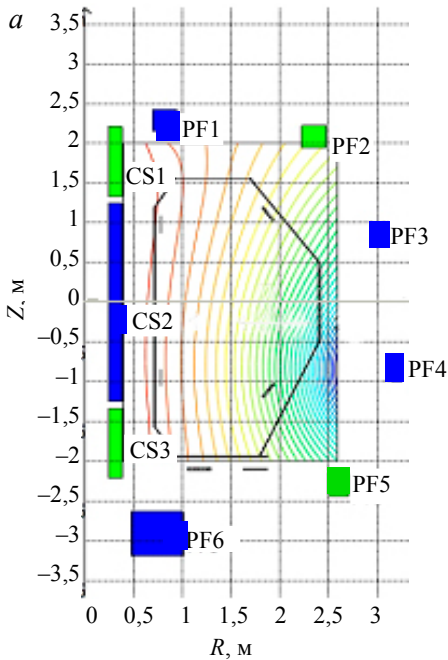


Рис. 8. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля (а) и показатель спада $n(r, 0)$ внешнего поля (б) для второго варианта коррекции

Коррекция за счёт включения катушек PF2, PF5. Третьим вариантом коррекции является включение катушек PF2, PF5. На рис. 9 показано устойчивое равновесие, полученное путём добавления токов $I_{PF2} \approx I_{PF5} \approx -0,03$ МА·витков. Для сохранения геометрических размеров шнура пришлось уменьшить величины токов в PF3, PF4. Величины внешних токов даны в табл. 6.

Таблица 6. Величины внешних токов (заданы в МА·витках) для третьего варианта коррекции равновесия в импульсе 451

CS1	CS2	CS3	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
0	-0,09434	0	0	-0,03	-0,02088	-0,0115	-0,03	0

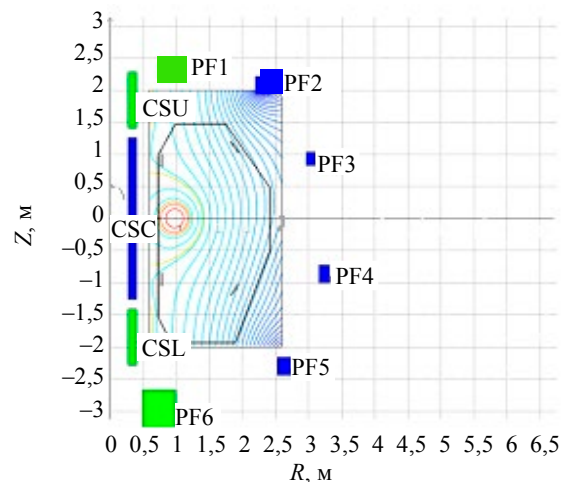


Рис. 9. Стабилизация разряда при перераспределении токов в PF2—PF5 (третий вариант коррекции)

Отметим, что для этого варианта кривизна линий внешнего поля также благоприятна (рис. 10). В экспериментах осенней кампании 2023 г. была реализована комбинация первого и третьего способов.

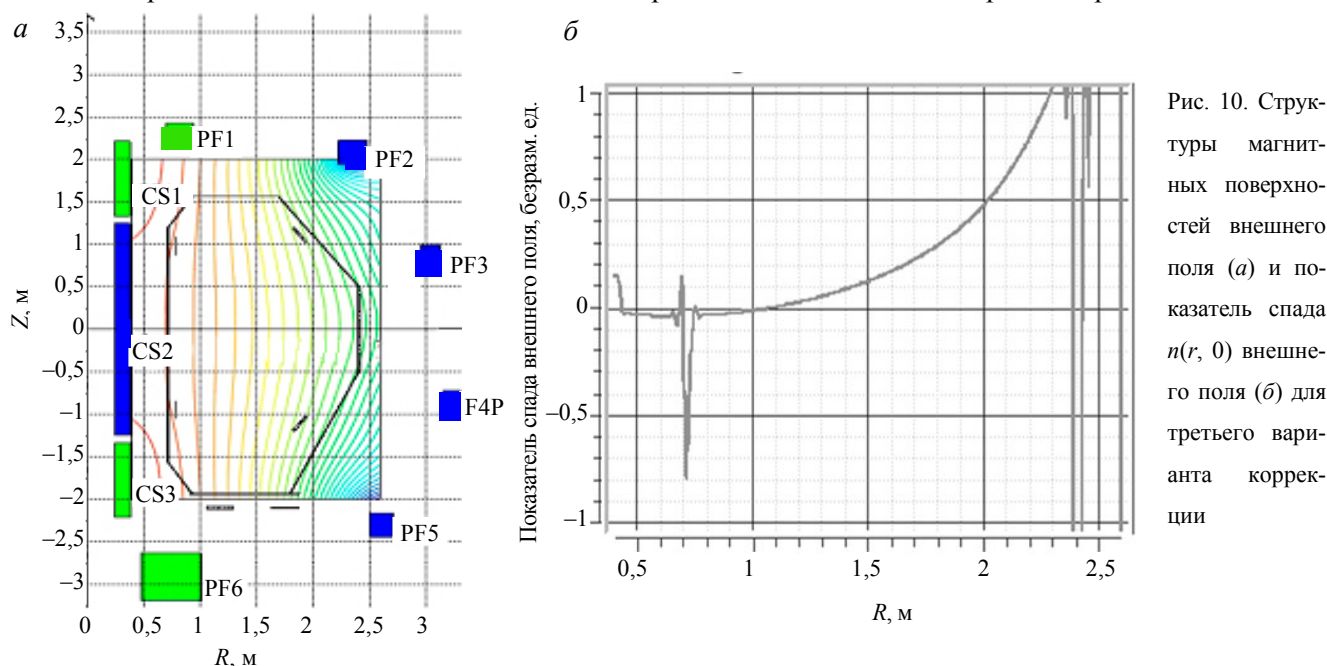


Рис. 10. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля (а) и показатель спада $n(r, 0)$ внешнего поля (б) для третьего варианта коррекции

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗРЯДА

В основном сценарии разряда ток в плазме обеспечивался ростом тока в центральном соленоиде CS2. При этом катушки полоидального поля PF2—PF5 обеспечивали равновесие и вертикальную устойчивость шнура.

Было принципиально важным найти стартовое равновесие, обеспечивающее вертикальную устойчивость плазмы с самого начала разряда. При моделировании за начало отсчёта принимался момент достижения тока плазмы $I_p = 10$ кА. Были проведены расчёты последовательных равновесий с увеличивающимся током плазмы. Анализ вертикальной устойчивости данных равновесий, проведённый с помощью кода TOKSTAB, показал, что для обеспечения устойчивости плазмы по вертикали в течение всего импульса необходимо соблюдать соотношения величин токов в обмотках PF2—PF5:

$$K = (I_{PF2} + I_{PF5}) / (I_{PF3} + I_{PF4}) > 2, \quad (10)$$

где I_{PF2} — I_{PF5} — токи в соответствующих обмотках управления.

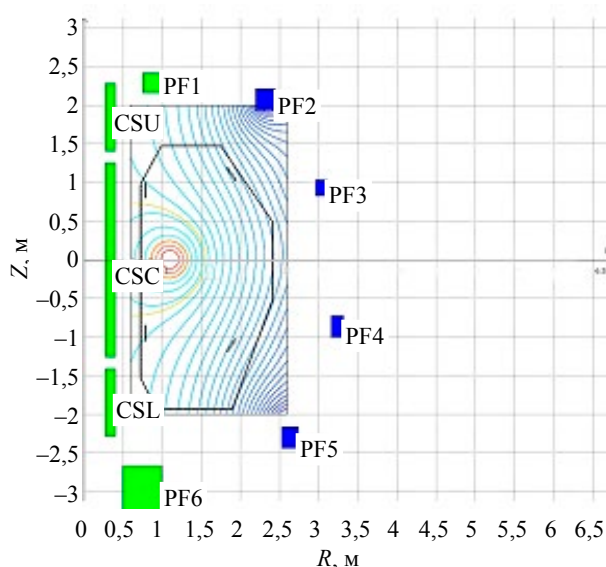


Рис. 11. Скорректированное по соотношению токов в управляющих витках стартовое равновесие, плазма устойчива

Был проведён анализ чувствительности результатов численных расчётов к внутренней индуктивности плазмы l_i . Показано, что изменение l_i в диапазоне от $l_i = 0,8$ до $l_i = 1,5$ слабо влияет на значение K , при котором возникает неустойчивость плазмы по вертикали.

На рис. 11 показаны результаты расчёта одного из вариантов начального равновесия с отношением $K \approx 4$, на рис. 12 — силовые линии внешнего магнитного поля. Видно, что по сравнению с импульсом 451 их кривизна изменилась на противоположную. Величины внешних токов, формирующих данное равновесие, приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7. Величины внешних токов (в МА·витках) для стартового равновесия

I_p , МА	CS1	CS2	CS3	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
0,01	0	0	0	0	-0,00809	-0,0020	-0,0025	-0,01	0

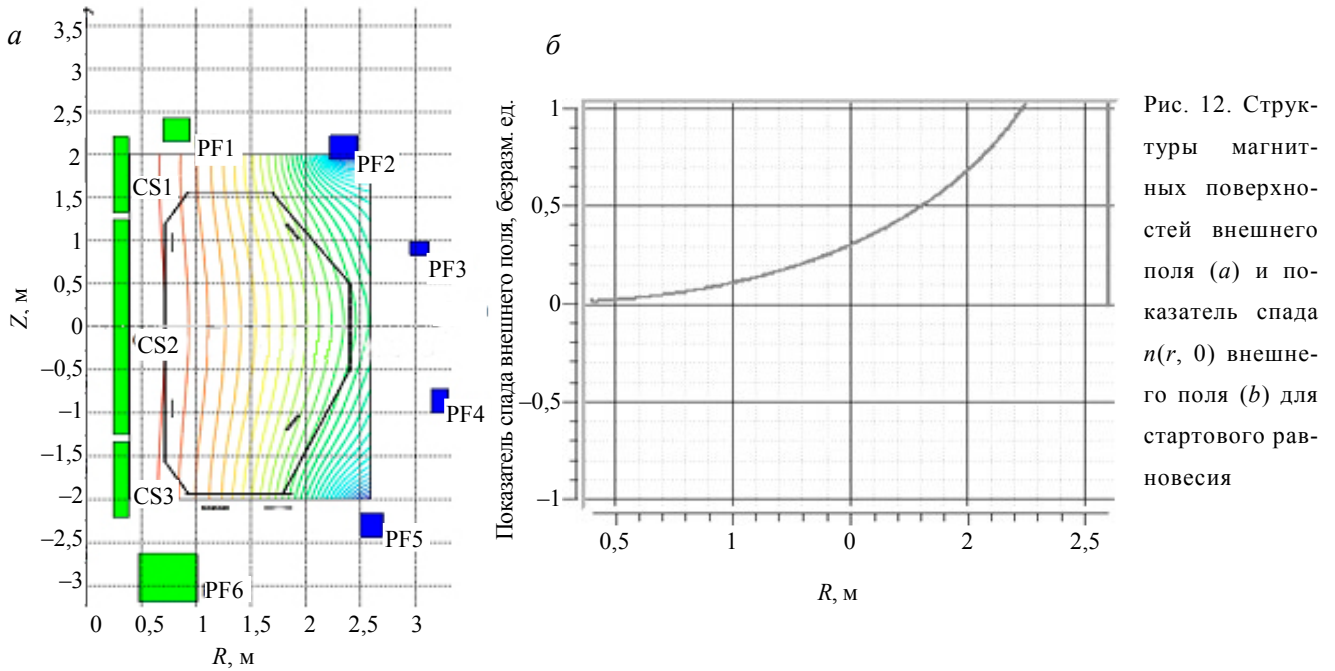


Рис. 12. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля (а) и показатель спада $n(r, 0)$ внешнего поля (б) для начального равновесия

Выбранные в результате расчётов условия вертикальной устойчивости были реализованы в экспериментах, что позволило увеличить длительность и ток разрядов [1, 10]. Найденное соотношение токов K оставалось справедливым для всех последующих импульсов кампании, включая разряды с $I_p > 100$ кА.

КОНТРОЛЬ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ ПО БОЛЬШОМУ РАДИУСУ

При получении разрядов с током плазмы $I_p > 100$ кА и длительностью > 600 мс возникла необходимость корректировки сценария разряда для смещения шнура по большому радиусу с целью уменьшения его взаимодействия с внутрикамерными элементами на внутреннем обводе.

На рис. 13 показаны изображения плазменного шнура в импульсе 733, полученные в видимом свете на 544-й, 558-й и 562-й мс разряда. Отчетливо видно, что контакт плазмы с внутренней стенкой вакуумной камеры приводит к разрушению разряда.

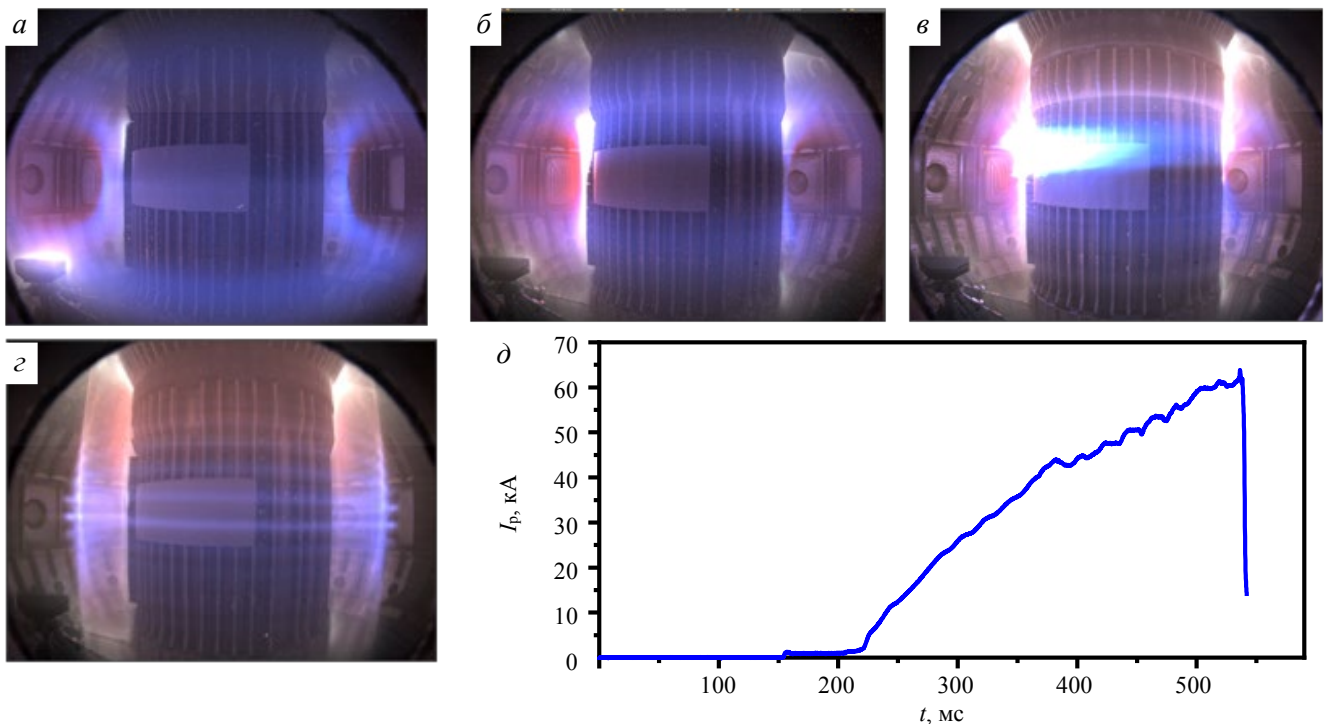


Рис 13. Импульс 733: $t = 376$ мс (а); $t = 524$ мс (б); $t = 538$ мс (в); $t = 542$ мс (г); осциллограмма тока плазмы (д)

Результаты расчёта равновесия для 524-й мс (начало резкого падения тока в плазме) импульса 733 приведены на рис. 14, *а*. Величины внешних токов, формирующих данное равновесие, приведены в табл. 8. Расчёт не противоречит экспериментальным наблюдениям: при нарастании тока плазмы наблюдается касание первой стенки на внутреннем обводе тора. Следовательно, требуется сместить шнур к центру камеры.

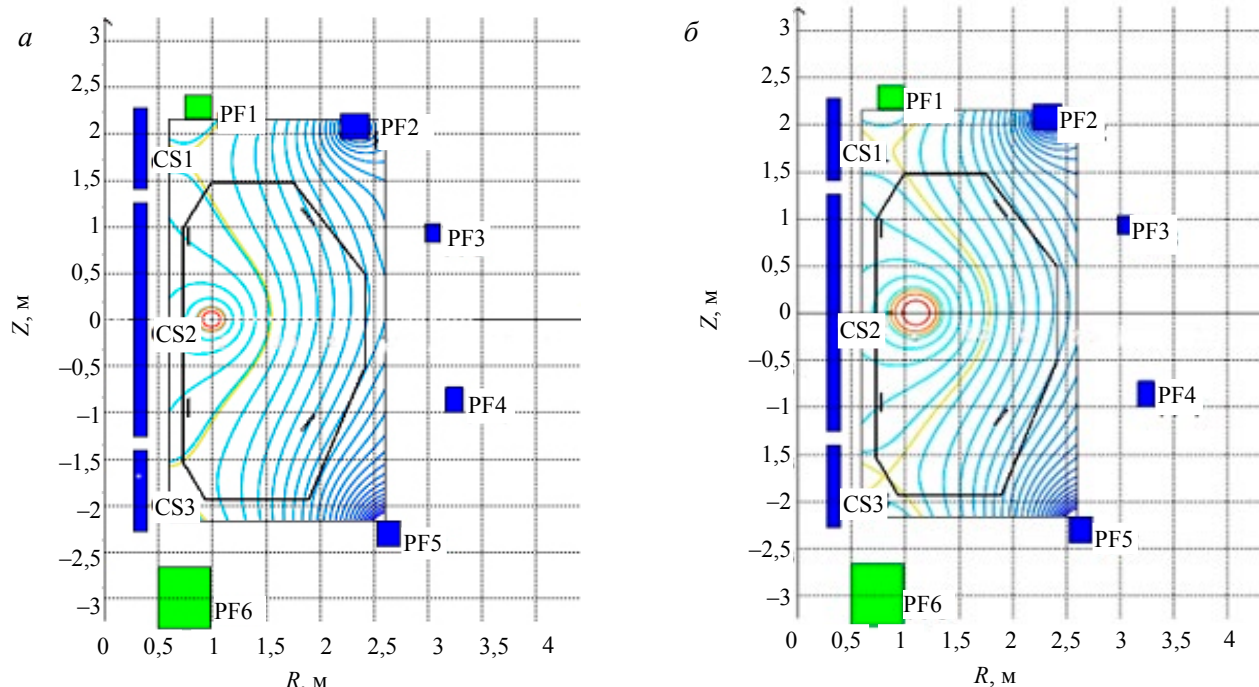


Рис. 14. Импульс 733, $t = 524$ мс (*а*) и его коррекция: пропорциональное увеличение всех CS на 10% и одновременное пропорциональное уменьшение PF2—PF5 на те же 10% (*б*)

Т а б л и ц а 8. Величины внешних токов (в МА-витках) импульса 733, время 524 мс

I_p , MA	CS1	CS2	CS3	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
0,065	-0,5	-0,8	-0,5	0	-0,064	-0,015	-0,0022	-0,0104	0

Для смещения плазмы по большому радиусу в расчётах были изменены соотношения между величинами токов в секциях центрального соленоида CS1—CS3 и токами PF2—PF5. Показано, что сдвиг шнура от внутренней стенки к центру вакуумной камеры обеспечивается одновременным увеличением всех I_{CS} на 10% и уменьшением токов в PF2—PF5 на те же 10% (рис. 14, *б*).

Экспериментальная реализация указанного алгоритма показана на рис. 15 и 16. Приведено сравнение импульса 898 (рис. 15, *а, б*), в котором было скорректировано соотношение токов в CS и PF2—PF5

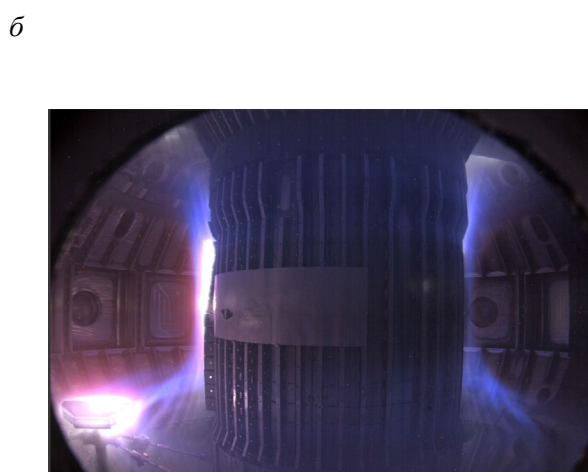
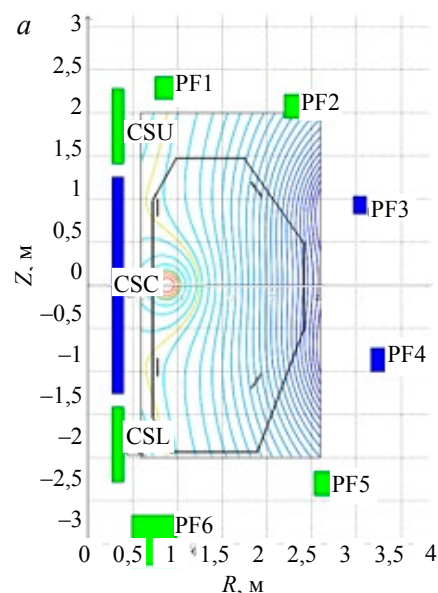
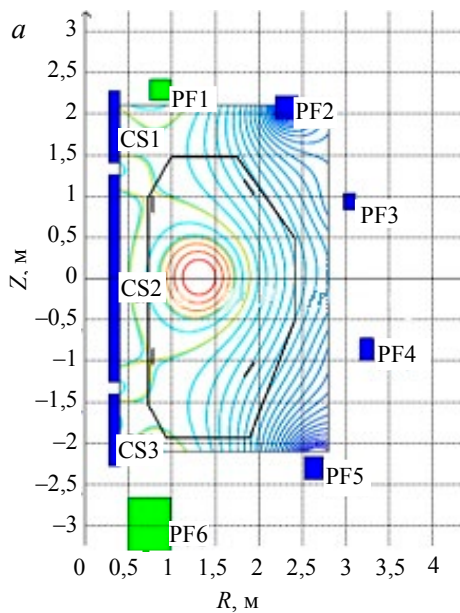


Рис 15. Результат расчёта (*а*) и фотография импульса № 898 (*б*), время 1416 мс. Видно, что в результате коррекции удалось переместить плазменный шнур в центр камеры

по сравнению с импульсом 893 (рис. 16, а, б). В импульсе 893 видно более сильное свечение, которое является следствием взаимодействия плазмы с внутренней стенкой камеры из-за смещения плазменного шнура по горизонтали. Величины внешних токов, формирующих равновесие в импульсе 898, приведены в табл. 9.



б

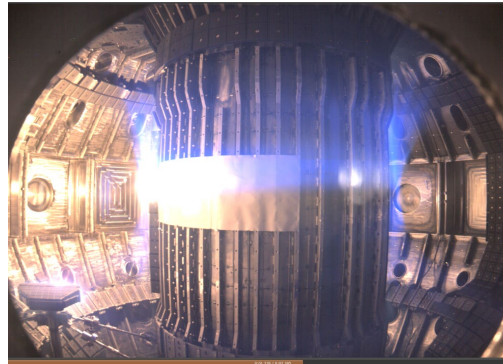


Рис 16. Результат расчёта (а) и фотография импульса 893, $t = 1416$ мс (б). Здесь по сравнению с импульсом 898 в расчётах основная часть плазменного тока ближе к внутренней стенке. В эксперименте видно более сильное свечение, которое является следствием взаимодействия плазмы с внутренней стенкой камеры

Т а б л и ц а 9. Величины тока в плазме (МА) и внешних токов (в МА-витках) импульса 898, время 1416 мс

I_p , МА	CS1	CS2	CS3	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
0,21	-1,65	-4,088	-1,65	0	-0,168	-0,04	-0,05	-0,2045	0

Таким образом, показано, что введённые поправки к токам отодвигают шнур от центрального столба.

ВЫВОДЫ

Проведены расчёты равновесных конфигураций, устойчивых по вертикали и по большому радиусу.

Показано, что для реализации устойчивых равновесий по вертикали соотношение токов в обмотках полоидального поля должно удовлетворять условию $(I_{PF2} + I_{PF5}) / (I_{PF3} + I_{PF4}) > 2$.

Продемонстрирована возможность изменения положения плазменного шнура по большому радиусу для снижения взаимодействия плазмы с внутрикамерными элементами на внутреннем обводе тора.

Экспериментальное использование результатов проведённого моделирования позволило существенно увеличить длительность разряда и величину тока плазмы 220 кА [1].

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Анашкин И.О. и др. Первые экспериментальные результаты на токамаке Т-15М. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, вып. 2, с. 5.
2. Хвостенко П.П.. Подготовка к физическому пуску токамака Т-15МД вышла на завершающую стадию. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 1, с. 8.
3. Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н., Инютин Н.В., Крылов В.А., Левин И.В., Минеев А.Б., Соколов М.М. Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15—38.
4. Сычуглов Д.Ю., Жилкин А.С., Андреев В.Ф., Мельников А.В. Численный анализ различных вариантов подъема тока на токамаке Т-15МД. — В сб.: Труды факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова. — М.: Изд-во МАКС Пресс, 2024, т. 75, с. 4—21.
5. Sychugov D.Yu., Soloviev S.Yu., Zhilkin A.S., Melnikov A.V., Krat S.A. Application of integrated simulation environment SIEMNED to the analysis of the MEPHIST-0 tokamak operation. — Plasma Science and Technology, 2023, vol. 25, № 3, p. 035602; <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac9f05>.

6. **Zhilkin A.S., Sychugov D.Yu., Sadykov A.D., Melnikov A.V., Andreev V.F., Sushkov A.V.** Comparison of the results of numerical simulation of magnetic fields in the T-15MD installation with the experiment using the upgraded Plasmaless computational code. — In: 47th EPS Conference on Plasma Physics, Sitges, Spain, June 21—25, 2021. Europhysics Conference Abstracts (ECA), vol. 45A, P1. 1014.
7. **Сычугов Д.Ю.** Код для расчёта МГД-равновесия токамака (модуль библиотеки программ «виртуальный токамак»). — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 85.
8. **Сычугов Д.Ю., Амелин В.В., Гасилов Н.А.** Модуль TOKSTAB (модуль библиотеки программ «виртуальный токамак»). — Там же, 2010, вып. 3, с. 46.
9. **Sadykov A.D., Sychugov D.Yu., Shapovalov G.V., Chektybaev B.Zh., Skakov M.K., Gasilov N.A.** The numerical code TOKSCEN for modelling plasma evolution in tokamaks. — Nuclear Fusion, 2015, vol. 55, № 6, 4063007 (8 p.); doi:10.1088/0029-5515/55/6/063007.
10. **Сычугов Д.Ю., Рыжаков Д.В., Андреев В.Ф., Балашов А.Ю., Горбунов А.В., Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Ноткин Г.Е., Сушков А.В., Тарасян К.Н., Шелухин Д.А., Хайрутдинов Э.Н.** Расчёт устойчивых равновесных конфигураций и сценария для первых экспериментов на токамаке Т-15МД с помощью кода TOKSCEN. — В сб.: Сборник тезисов докладов (ICPAF-2024 LI) Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. 18—22 марта 2024 г. — Звенигород, АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2024 г. ISBN 978-5-6042115-1-9, PACS 52.20-52.75, с. 289.



sychugov@cs.msu.ru

Дмитрий Юрьевич Сычугов, д.ф.-м.н., профессор; МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы 1, Россия; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

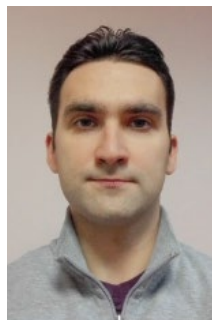


Дмитрий Владимирович Рыжаков, с.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
ryjkovdv@gmail.com



Andreev_VF@nrcki.ru

Валерий Филиппович Андреев, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Алексей Викторович Горбунов, начальник отдела, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Kirneva_NA@nrcki.ru

Наталья Александровна Кирнева, руководитель отделения, к.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; доцент; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия



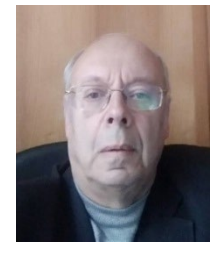
Дмитрий Александрович Кислов, заместитель начальника отдела, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Kislov_DA@nrcki.ru



Геннадий Евсеевич Ноткин, заместитель начальника отдела; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Алексей Васильевич Сушков, заместитель начальника лаборатории; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Карен Надерович Тарасян, ведущий эксперт, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Дмитрий Александрович Шелухин, с.н.с., к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Shelukhin_DA@nrcki.ru



Эдуард Наилевич Хайрутдинов, инженер 2-й категории; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию
15 января 2024 г.

После доработки 16 марта 2024 г.
Принята к публикации 5 июля 2024 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез,
2024, т. 47, вып. 3, с. 5—16.