

Раздел I. Математическое моделирование

Д.Ю. Сычугов^{1,2}, *А.С. Жилкин*, *В.Ф. Андреев*²,
А.В. Мельников^{2, 3, 4}

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ПОДЪЕМА ТОКА НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

Введение

Термоядерная установка токамак Т-15МД (Россия, НИЦ «Курчатовский институт») [1-3] позволяет решать широкий спектр задач современной физики горячей плазмы, таких как свойства удержания плазмы в крутом токамаке с сильным полем, эффективное использование методов дополнительного нагрева плазмы с помощью ВЧ- и СВЧ-волн [4] и горячих нейтральных атомов, исследование свойств альфвеновских собственных мод, возбуждаемых в плазме высокоэнергетичными частицами, возникающими при дополнительном нагреве [5], исследовании роли электрического поля в процессах формирования турбулентности [6], развитие современных методов диагностики плазмы [7-11].

К настоящему времени установка построена и весной-летом 2023 г. на ней была проведена первая серия экспериментов в рамках энергетического пуска. На этом этапе проходило освоение базовых систем установки. При этом основные сценарии разряда, просчитанные заранее, например [12-18], оказались преждевременными ввиду ограничения по энергетике и отсутствия АОС. Такая ситуация потребовала перерасчета начальной стадии разряда и адаптации сценариев второй серии экспериментов к существующим реалиям.

Настоящая работа посвящена решению этих задач методами численного моделирования и состоит из четырех частей. В первой части описана единая программная среда SIEMNED [19-20], при помощи которой проводились расчеты. Во второй части обсуждаются результаты моделирования одного из вариантов начальной стадии разряда. Показано, что в этом случае возможны срывы разряда. В третьей части обсуждается, как можно скорректировать внешние магнитные поля, чтобы избежать

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
e-mail: sychugov@cs.msu.ru, nrcki@nrcki.ru

²Национальный исследовательский центр "Курчатовский Институт",
e-mail: Andreev_VF@nrcki.ru, nrcki@nrcki.ru

³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
e-mail: Melnikov_AV@nrcki.ru, nrcki@nrcki.ru

⁴Московский физико-технический институт

срывов. В четвертой части приводятся результаты расчета равновесия и устойчивости опорных кадров сценария разряда, который мог бы лечь в основу следующей серии экспериментов. Показано, что при имеющихся ограничениях на энергопитание установки все же возможно получение устойчивых разрядов с током в плазме вплоть до 500 кА.

Описание программной среды SIEMNED

SIEMNED (Software and Information Environment for Modelling and Numerical support of Experiments on complex Devices) – программно-информационная среда для разработки виртуальных аналогов сложных технических устройств. Данная среда, разработанная на факультете ВМК МГУ, апробируется, в первую очередь, на установках токамак, однако в дальнейшем спектр применимых устройств планируется расширить. К настоящему времени SIEMNED представляет собой веб-систему, включающую средства запуска вычислительных кодов и автоматического обмена данными, а также базу данных для хранения информации об устройствах, экспериментах и результатах вычислений.

Среда SIEMNED состоит из браузерного клиента и серверной части, которая отвечает за проведение вычислений, хранение данных и обмен между модулями. Серверная часть отвечает за преобразование действий пользователя в браузер в команды для вычислительных кодов и за обмен данными между кодами, базой данных и пользователями - чтение и запись в базу данных, сохранение расчетных или пользовательских данных. В основе системы обмена данными лежит следующая идея. Для каждого численного кода заранее прописывается шаблон данных, необходимых для его запуска. При считывании данных из базы файл данных для запуска кода формируется по этому шаблону путем сличения идентификаторов шаблона и идентификаторов файлов, содержащихся в базе. Такой подход делает единую программную среду гибкой, так как для включения в систему обмена данными нового кода достаточно прописать присущий ему шаблон данных.

Приведем описание тех модулей среды SIEMNED, которые применялись в настоящей работе.

PLASMALESS –модуль для расчета наведенных магнитных полей и токов внутри вакуумной камеры и на конструктивных элементах установки от токов в элементах электромагнитной системы установки при условии отсутствия плазмы [20]. С его помощью проводится детальный расчет магнитных полей и токов, наведенных в элементах конструкции установки перед началом плазменного разряда, необходимых для осуществления пробоя.

Код основан на численном решении системы уравнений Кирхгофа для катушек полоидального поля и элементов конструкции установки:

$$L \frac{dI}{dt} + RI = - \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1)$$

Здесь L – матрица индуктивностей, I – вектор наведенных токов на пассивных элементах конструкции, R – вектор сопротивлений, Ψ – суммарный полоидальный магнитный поток, создаваемый катушками магнитного поля и пассивными витками.

ТОКАМЕQ – модуль для расчета МГД-равновесия плазмы в токамаке [21]. Для потока полоидального магнитного поля $\psi(r, z)$ решается задача расчета стационарной равновесной магнитной конфигурации в неограниченной области пространства, с условиями регулярности на главной оси тора и на бесконечности

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

$$\psi(0, z) = 0; \quad (3)$$

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

Здесь: (r, φ, z) — система цилиндрических координат с осью z , направленной вдоль главной оси тора;

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

$\gamma = 0.8\pi^2$ — 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.

ТОКСТАВ – модуль для расчета вертикальной устойчивости плазмы с учетом конечной проводимости пассивных проводящих элементов конструкции [22]. В его основе лежит модель пассивной обратной связи как с бесконечной, так и с конечной проводимостью элементов и модель «твёрдого сдвига» идеально проводящей плазмы. Модель предполагает, что плазменный шнур движется по вертикали без изменения формы, как твёрдое тело, а смещение шнура от положения равновесия $\xi(t)$, предполагается малым по сравнению с поперечными размерами плазмы. Постановка задачи состоит в нахождении функции $\xi(t)$ из уравнения движения для плазмы и уравнений Кирхгофа для пассивных витков:

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

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

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 их взаимной (само-) индукции; R_i – их 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 стандартной для современных токамаков системе единиц: расстояние — метр [м], время — секунда [с], масса — килограмм [кг], сила тока — МегаАмпер[МА], электрическое сопротивление — Ом [Ом], магнитный поток — Вебер [В·с], индукция магнитного поля — Тесла [Тл], коэффициенты само- и взаимной индукции — микроГенри [мкГн].

Подробный вывод формул для входящих систему (6) – (7) коэффициентов приведен в работе [22].

С помощью подстановок

$$\xi(t) = \xi_0 e^{\nu t}, \nu(t) = \zeta'(t) = \xi_0 \gamma e^{\nu t} = \nu_0 e^{\nu t}, I_k(t) = I_{k,0} e^{\nu t}, k = 1, \dots, N$$

система (6) – (7) преобразуется 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

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

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

TOKSCEN – модуль для расчета эволюции равновесной плазменной конфигурации в токамаке [23]. 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 путем решения задачи (8).

Оценка времени затухания токов Фуко в камере и пассивных стабилизирующих витках

Система подавления вертикальной неустойчивости плазмы обычно имеет пассивную и активную компоненты. Пассивная компонента состоит из вакуумной камеры и специальных стабилизирующих витков, сделанных из хорошо проводящего материала (медь или сплавы на ее основе). Назначение пассивной компоненты состоит в снижении характерной скорости развития неустойчивости с МГД-времен, $\sim 10^{-6}$ с, до характерных времен затухания токов Фуко в витках, $\sim 10^{-2}$ с. В этом случае уже становится возможным подхват плазменного шнура системой активной обратной связи (АОС).

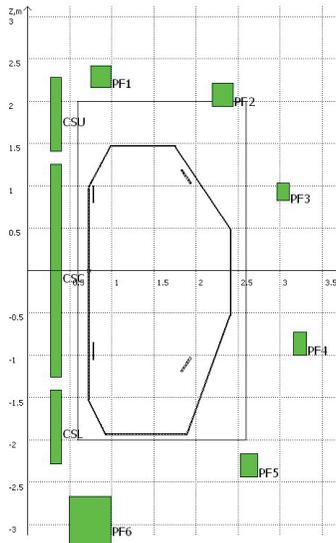


Рис 1. Взаимное расположение секций соленоида и катушек (зеленый цвет), камеры (многоугольник) и пассивных витков (отрезки внутри камеры) в установке Т-15 МД.

В настоящее время в установке Т-15 МД система АОС полностью не реализована, и, при наличии вертикальной неустойчивости плазмы, время жизни разряда определяется характерным временем затухания токов в камере и стабилизирующих витках. Их расположение приведено на рис. 1. Цель первой серии расчетов, выполненных с помощью кода PLASMALESS, было определение такого времени. Для этого численно

решались уравнения Кирхгофа (1), дополненных начальными условиями, имитирующих наличие тока на верхней части камеры.

Результаты расчетов приведены на рис. 2. Видно, что токи на камере (изображены зелеными линиями) практически полностью затухают за время ~ 10 мс, но при этом они успевают индуцировать токи в пассивных витках (розовый цвет). В свою очередь, характерное время затухания токов в витках составляют ~ 100 мс для пары внутренних витков и ~ 200 мс для внешних.

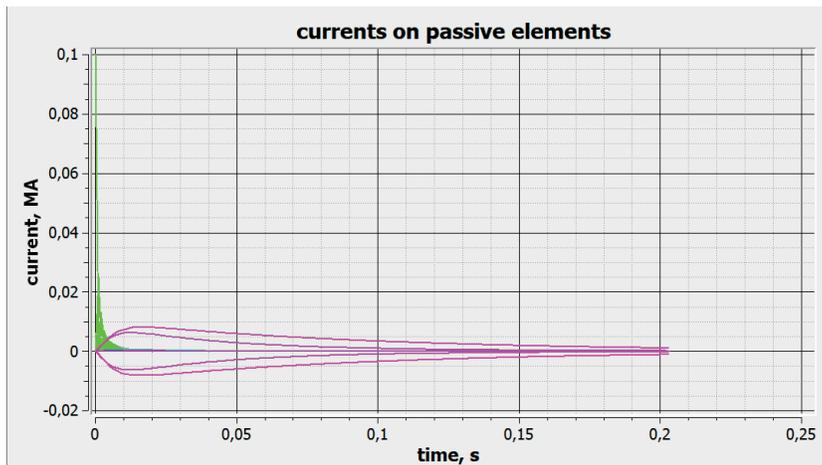


Рис 2. Динамика затухания наведенных токов в элементах камеры (зеленый цвет) и в пассивных витках (розовый).

Таким образом, при наличии вертикальной неустойчивости плазменные разряды могут существовать максимум ~ 100 - 200 мс. Поскольку такое малое время не позволяет провести полноценные эксперименты с плазмой и всеобъемлющую проверку систем установки, в экспериментах следует работать с равновесиями, устойчивыми сами по себе без обратных связей.

Численный анализ первоначального варианта сценария

Нами был проведен численный анализ первоначального варианта сценария разряда, который должен обеспечиваться за счет токов в центральном соленоиде CS и катушками полоидального поля PF3,4. Для этого была выбрана 200-я мс сценария разряда, в этот момент величина плазменного тока должна была достигать примерно 30 кА. Результат расчета показан на рис 3. Плазменный шнур находится в экваториальной плоскости токамака, он прижат к внутренней стенке вакуумной камеры, играющей для него роль лимитера. Анализ устойчивости, проведенный с

помощью расчетов по коду TOKSTAB, показал, что в этом случае шнур неустойчив по вертикали с характерным временем развития неустойчивости ≈ 18 мс (инкремент неустойчивости ≈ 57 с⁻¹).

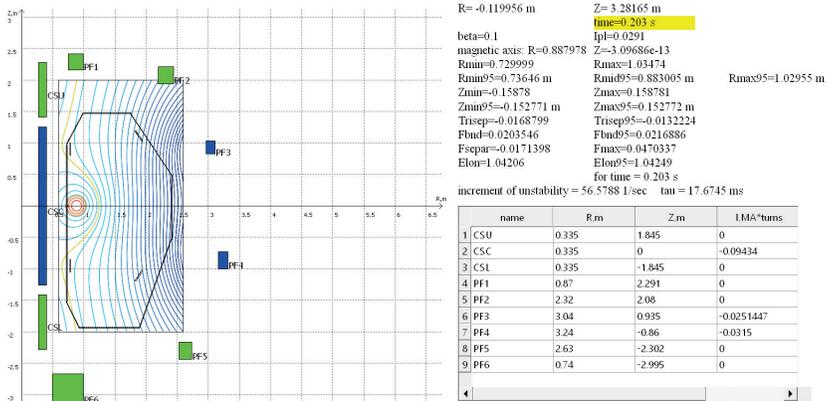


Рис 3. Результат расчета равновесия для первоначального варианта начала подъема тока. Слева – магнитные поверхности в вертикальном сечении токамака T-15МД, справа – интегральные характеристики равновесной конфигурации. Равновесие получено с использованием двух полоидальных витков PF3, PF4 и центральной секции соленоида CSC (обозначены синим цветом), токи в остальных витках равны нулю (обозначены зеленым цветом).

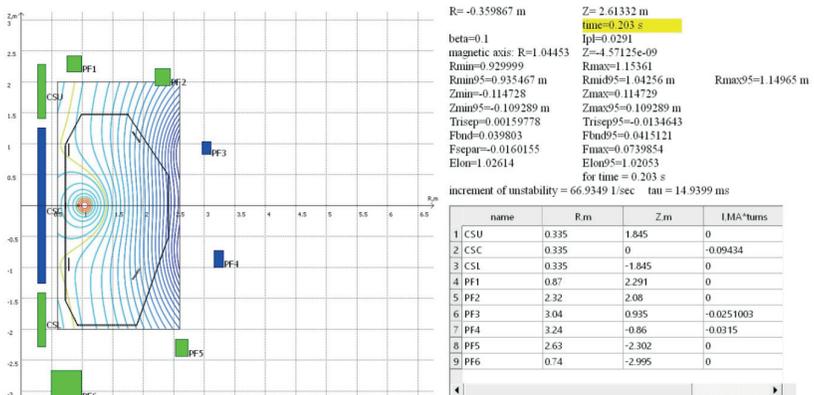


Рис 4. Смещение плазменного шнура ближе к центральной области камеры приводит к посту скорости его вертикальной неустойчивости.

Не улучшает дело и смещение разряда по горизонтали в область, расположенную примерно в 20 см от внутренней стенки камеры, см. рис. 4. Плазма по-прежнему остается неустойчивой, инкремент ее развития даже увеличивается и составляет величину $\approx 67 \text{ с}^{-1}$.

Для объяснения причины возникновения неустойчивости был проведен анализ внешнего магнитного поля. Расчеты поля проводились в динамике, в предположении, что величины токов во всех катушках линейно зависят от времени. На рис. 5 показана структура внешних магнитных поверхностей, она имеет "антибочкообразную" форму. В результате плазменный шнур, смещаясь по вертикали, попадает в область более слабого магнитного поля, что способствует возникновению неустойчивости. График нормализованной кривизны силовых линий $n(r,0)$ (так называемого показателя спада)

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

приведен на рис. 6. 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 наведенных на нее токов и не существенны для ее внутренней рабочей части.

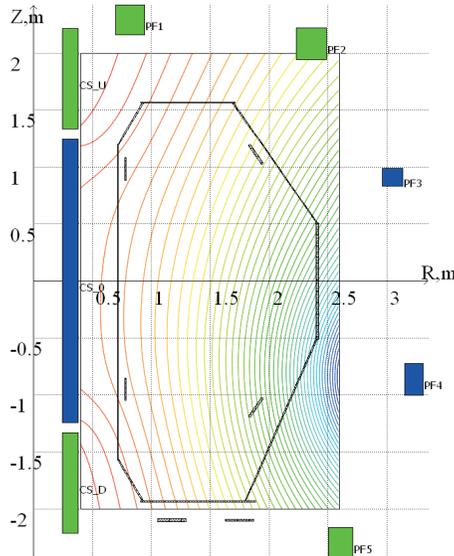


Рис 5. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля в исходном варианте.

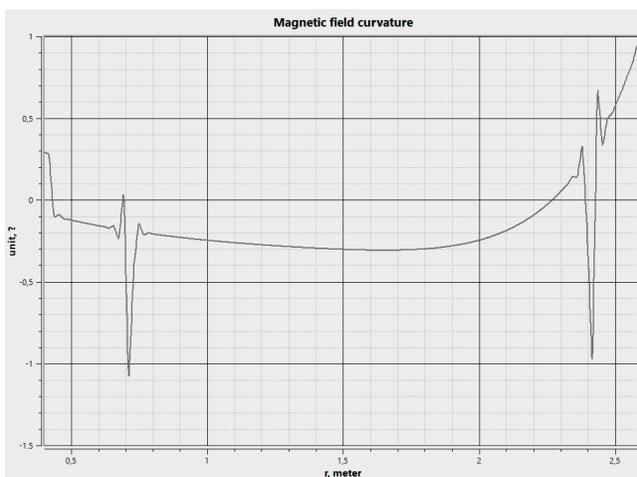


Рис 6. Показатель спада $n(r,0)$ внешнего поля в исходном варианте

Таким образом, следует признать, что, работая только с центральным соленоидом CS0 и катушками PF3,4, мы не можем создать структуру внешних магнитных полей, обеспечивающих вертикальную устойчивость плазмы, даже несмотря на то, что сечение плазменного шнура при этом оказывается близким к круглому. Тем самым возникает задача проведения коррекции внешних магнитных полей, которая, с одной стороны, в силу энергетических ограничений должна быть минимальной, а с другой – гарантировать устойчивость разряда в ходе его эволюции.

Способы коррекции начальной стадии разряда

Первый способ состоит в перераспределении величин тока в секциях соленоида при сохранении их суммы. Исходный вариант соответствовал $ICSU = ICSD = 0$, $ICS0 = -94$ кА. На рис. 7 приведен результат расчета начальной стадии разряда, при значениях $ICSU = ICSD = -47$ кА, $ICS0 = 0$. В этом случае магнитные силовые линии внешнего поля приобретают более благоприятную кривизну (рис. 8, 9) и плазма становится устойчивой. Неустойчивость начинает проявляться при $ICSU = ICSD \approx -37$ кА, $ICS0 \approx -20$ кА.

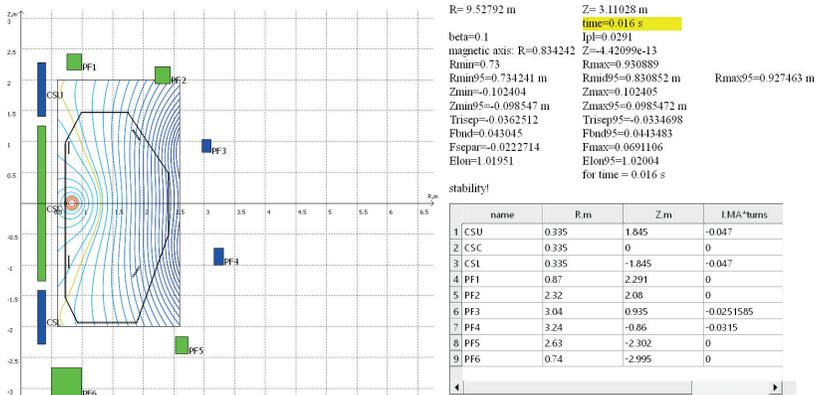


Рис 7. Первый вариант стабилизации разряда за счет перераспределения токов по секциям соленоида, плазма устойчива.

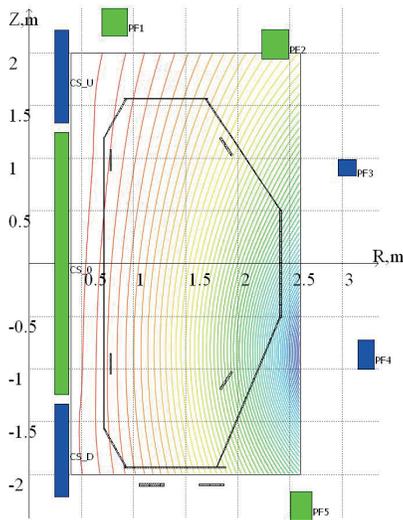


Рис 8. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля для первого варианта коррекции.

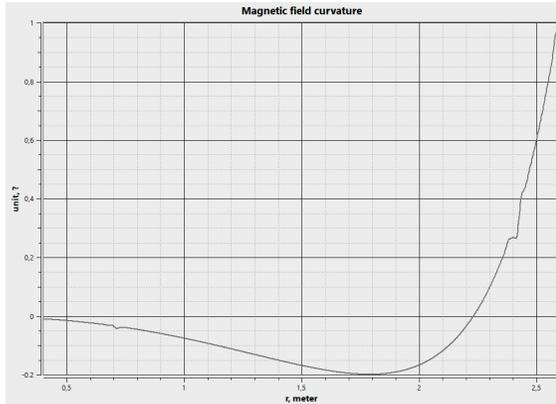


Рис 9. Показатель спада $n(r,0)$ внешнего поля для первого варианта коррекции.

Вторым способом коррекцию можно провести путем включения катушек PF1, PF6 с целью создания полей, препятствующих смещению шнура по вертикали. Примером такого способа коррекции является устойчивое равновесие, магнитные поверхности которого показаны на рис. 10. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля и показатель спада $n(r,0)$ внешнего поля для второго варианта коррекции приведены на рис. 11 и рис. 12.

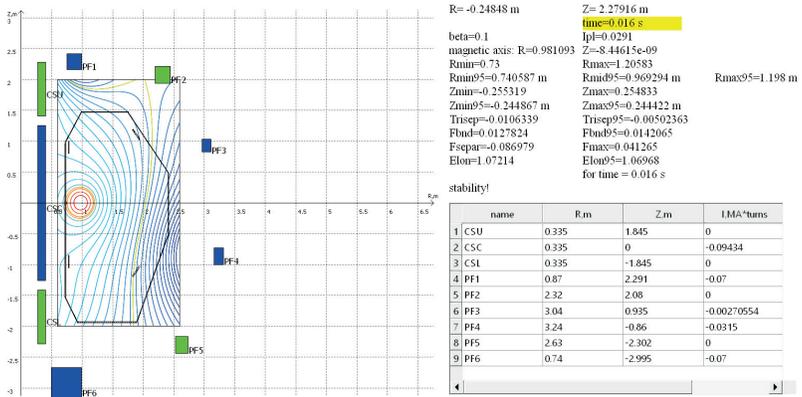


Рис 10. Стабилизация разряда за счет включения "запирающих" полей с помощью токов в катушках PF1, PF6, плазма устойчива.

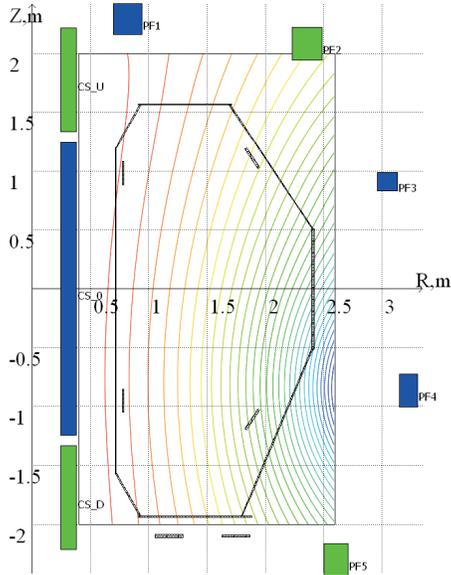


Рис 11. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля для второго варианта коррекции.

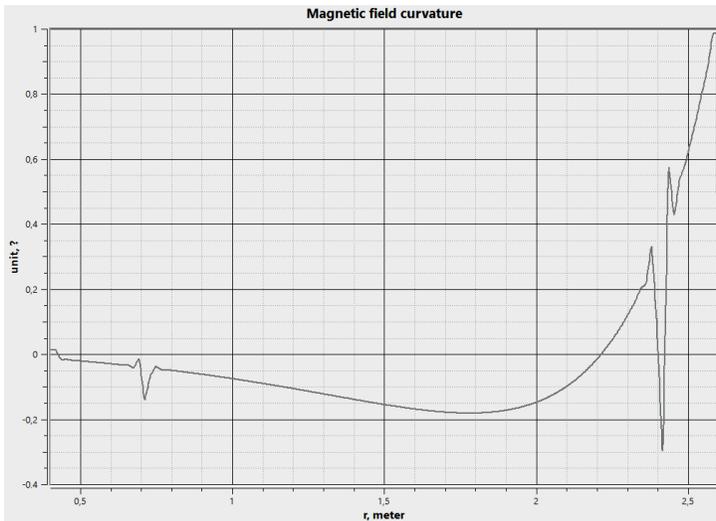


Рис 12. Показатель спада $\kappa(r,0)$ внешнего поля для второго варианта коррекции.

Третьим вариантом коррекции является включение катушек PF2, PF5. На рис. 13 приведено устойчивое равновесие, полученное путем добавления в токов, текущих по $IPF2 = IPF5 = -30$ кА. Для формирования шнура примерно такого же сечения пришлось уменьшить величины токов в PF3, PF4. Отметим, что для третьего варианта кривизна линий внешнего поля наиболее благоприятна (рис. 14, 15).

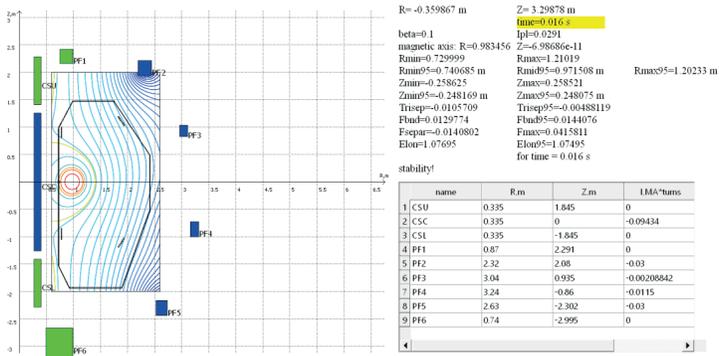


Рис 13. Вариант стабилизации начала разряда за счет перераспределения токов в катушках PF2-PF5.

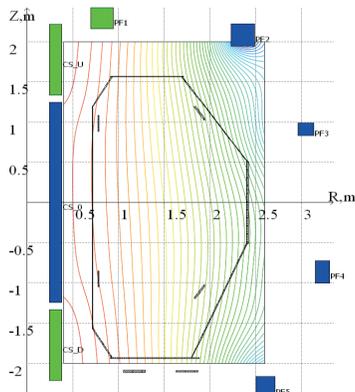


Рис 14. Структуры магнитных поверхностей внешнего поля для третьего варианта коррекции.

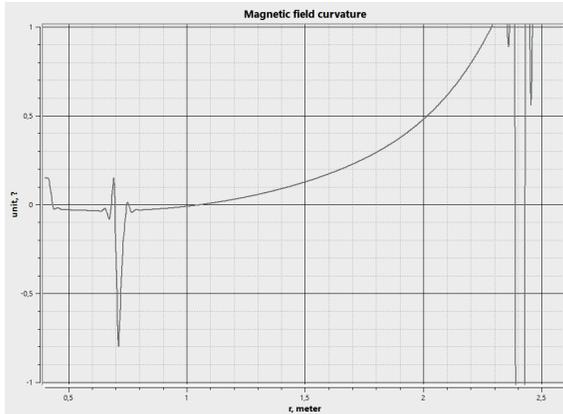


Рис 15. Показатель спада $n(r,0)$ внешнего поля для третьего варианта коррекции.

Возможные способы подъема тока в разряде

Для второй серии экспериментов рассмотрены сценарии, построенные на основе подъема плазменного тока в геометрии внешних полей, близких к рассмотренным выше скорректированным вариантам.

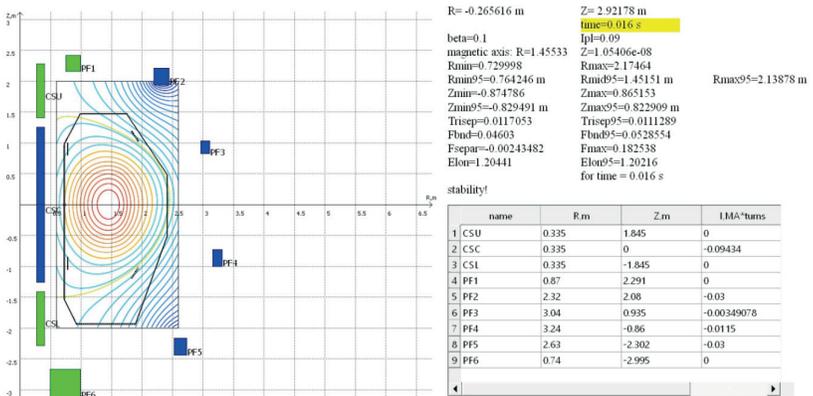


Рис 16. Расчет устойчивого равновесия для скорректированного импульса 451 с увеличенным током в плазме $I_p = 90 \text{ KA}$. $CSC = 0.09 \text{ MA}$ ВИТКОВ

Прежде всего, было бы интересно знать, до какой величины можно увеличивать ток в плазме, оставляя практически неизменными величины токов в катушках PF3, PF4? Отметим, что небольшая коррекция все-таки нужна для сохранения положения магнитной оси по z.

На рис. 16 приведен вариант расчета такого равновесия, для тока в плазме 90 кА. При этом плазменный шнур заполняет практически всю камеру, оставаясь устойчивым по вертикали.

Достижение подобных характеристик вполне приемлемо для начала экспериментов 2-й серии. Однако при этом остается открытым вопрос о способе подъема тока. Если применять индукционный способ, то следует выяснить, при каких значениях величин тока в центральном соленоиде CSC плазма сохраняет устойчивость? Результаты такого расчета приведены на рис. 17. Видно, что увеличение тока в центральном соленоиде выводит нас на границу устойчивости. Данные конфигурации различаются тем, что вторая получена путем более медленного подъема тока в центральном соленоиде.

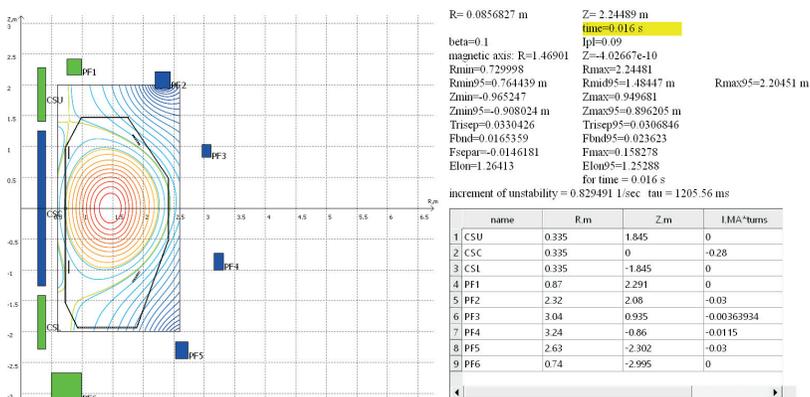


Рис 17. Выход на границу устойчивости по величине тока в центральном соленоиде CSC = 0.28MA витков для импульса с увеличенным током в плазме $I_p = 90 \text{ KA}$.

Наиболее интересным представляется осуществление подъема тока путем пропорционального, или почти пропорционального по времени роста величин тока во всех управляющих катушках. В качестве опорного варианта предлагается взять один из модифицированных вариантов начала разряда. На рисунке 18 приведен один из вариантов равновесного положения плазмы, полученного таким образом. Отметим, что полный ток в плазме здесь равен 500 кА, что соответствует целям второй серии экспериментов.

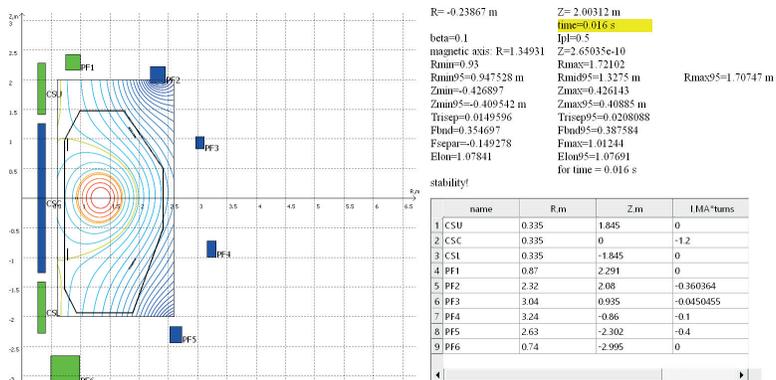


Рис 18. Один из вариантов равновесия с током в плазме $I_p = 500 \text{ кА}$.

Выводы

С помощью расчетов показано, что в первоначальном варианте сценария возможна вертикальная неустойчивость плазмы в начале разряда. Предложены три варианта корректировки начала разряда, позволяющих избежать ее развития. Получены варианты квазистационарного равновесия плазмы и сценарий разряда для второй серии экспериментов, позволяющие достичь величин тока плазмы, в интервале 90 – 500 кА.

Благодарности

Авторы благодарят коллектив токамака Т-15МД за плодотворные дискуссии.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. 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.
2. Khvostenko P.P. et al. Current status of tokamak T-15MD //Fusion Engineering and Design. – 2021. – Т. 164. – С . 112211.
3. Khvostenko P.P. et al. Tokamak T-15MD—two years before the physical start-up //Fusion Engineering and Design. – 2019. – Т. 146. – С . 1108-1112.

4. *J. Ongena, A.M. Messiaen, A.V. Melnikov, R. Ragona, Ye.O. Kazakov, D. Van Eester, Yu.N. Dnestrovskii, P.P. Khvostenko, I.N. Roy, A.N. Romannikov*, Conceptual study of an ICRH system for T-15MD using traveling wave antenna (TWA) sections // *Fusion Engineering and Design* Vol. 146, Part A (2019), pp. 787-791
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.080>
5. *L.G. Eliseev, A.V. Melnikov and S.E. Lysenko*, Study of Alfvén eigenmodes with heavy ion beam probing in the TJ-II stellarator, *Reviews of Modern Plasma Physics* (2022) 6:25 <https://doi.org/10.1007/s41614-022-00088-y>
6. *Melnikov A.V.* Electric Potential in Toroidal Plasmas, Springer Nature Switzerland AG 2019, 240 pp, ISBN 978-3-030-03480-1
7. *Krupin V. et al.* The development of charge exchange recombination spectroscopy diagnostics for the T-15MD tokamak // *Journal of Instrumentation*. – 2020. – Т. 15. – №. 02. – С. C02027.
8. *Drozd A., Sergeev D.* Design of a phasemeter for real-time measurements of the average plasma density with the microwave interferometer of the tokamak T-15MD // *Review of Scientific Instruments*. – 2022. – Т. 93. – №. 6.
9. *Shelukhin D.A. et al.* Analysis of Physical and Engineering Capabilities for the Implementation of the Reflectometry Diagnostics at T-15MD Installation // *Plasma Physics Reports*. – 2022. – Т. 48. – №. 7. – С. 721-739.
10. *Krivoruchko D.D. et al.* Laser-Induced Quenching Diagnostics of T-15MD Divertor Plasma // *Plasma Physics Reports*. – 2023. – Т. 49. – №. 6. – С. 687-699.
11. *Drabinskiy M.A. et al.* Conceptual design of the heavy ion beam probe diagnostic for the T-15MD tokamak // *Journal of Instrumentation*. – 2019. – Т. 14. – №. 11. – С. C11027.
12. *В.Н. Докука, А.А. Кавин, В.Э. Лукаш, М.М. Соколов, Р.Р. Хайрутдинов, В.А. Хайрутдинова.* Численное моделирование управления плазмой в модернизированном токамаке Т-15. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный Синтез*, 2014, вып. 3, с. 56—70.
13. *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. // 44rd EPS Conference on Plasma Physics, Belfast, Northern Ireland, June 26—30, 2017. *European Physics Conference Abstracts (ECA)*, series F, P1.142.
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*, Issue 907, October 2017, 012011.

15. *V.F. Andreev, A.A. Ivanov, N.V. Kas'yanova, V.E. Lukash, S.Yu. Medvedev, A.V. Mel'nikov, A.D. Saykov, A.V. Sushkov, and D.Yu. Sychugov*, "Calculations of plasma equilibrium and stability in T-15 tokamak," VANT, series Thermonuclear Fusion, No. 3, 48–55 (2014).
16. *Gorbun M.S., Mel'nikov A.V., Sychugov D.Y., Sadukov A.D.* Discharges with Reduced-Volume Plasma Filament in T-15 Upgrade Tokamak. *Computational Mathematics and Modeling*, v. 31, 421–430 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10598-021-09503-4>.
17. *Gorbun, M.S., Melnikov, A.V. & Sychugov, D.Y.* Negative-Triangularity Magnetic Configurations in T-15MD Tokamak. *Computational Mathematics and Modeling*, 32, 1–6 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10598-021-09512-3>.
18. *Горбун М.С., Мельников А.В., Сычугов Д.Ю.*, Влияние вариации управляющих токов на положение сепаратрисы в области дивертора токамака Т-15МД. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез (ВАНТ-ТС)* Т. 42 2019 N 4 с. 45-51 doi: 10.21517/0202-3822-2019-42-4-45-51
19. *D.Yu. Sychugov, S.Yu. Soloviev, A.S. Zhilkin, A.V. Melnikov, S.A. Krat*, Application of integrated simulation environment SIEMNED to the analysis of the MEPHIST-0 tokamak operation. *Plasma Science and Technology*, 2023, v.25, n.3, p. 035602, <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac9f05>
20. *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. 47th EPS Conference on Plasma Physics, Sitges, Spain, June 21-25, 2021. *Europhysics Conference Abstracts (ECA)*, Vol. 45A, P1.1014.
21. *Sychugov D.Yu.*, The code TOKAMEQ for simulation MHD-equilibrium (module of program library «Virtual Tokamak»). *Probl. Atomic Sci. Technol. Ser. Thermonuclear Fusion*, v. 31, 2008, issue 4, pp. 85-89.
22. *Sychugov D.Yu., Amelin V.V., Gasilov N.A.*, The code TOKSTAB (module of program library Virtual Tokamak). *Probl. Atomic Sci. Technol. Ser. Thermo-nuclear Fusion*, v. 33, y. 2010, No. 3, pp.46-49.
23. *A.D. Sadykov, D.Yu. Sychugov, G.V. Shapovalov, B.Zh. Chektybaev, M.K. Skakov and N.A. Gasilov*. The numerical code TOKSCEN for modelling plasma evolution in tokamaks. *Nuclear Fusion*, v. 55 (2015), Number 6, 4063007 (8pp) doi:10.1088/0029-5515/55/6/063007.