

УДК 621.039.6, 533.9.08

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА НА ТОКАМАКЕ КТМ

¹⁾ Чектыбаев Б.Ж., ¹⁾ Садыков А.Д., ²⁾ Батырбеков Э.Г.,
¹⁾ Скаков М.К., ¹⁾ Кашикбаев Е.А., ¹⁾ Жаксыбаева А.А.

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
²⁾ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

В статье описаны основные результаты экспериментальных работ по получению плазменного разряда на токамаке КТМ, проведенных в 2018 году. Приведены результаты расчетов сценария начальной предпробойной конфигурации магнитного поля в токамаке КТМ, полученные с помощью расчетного кода *Plasmaless Tokscen*, и результаты измерения параметров разряда по подобранному сценарию с помощью диагностического комплекса КТМ. В ходе экспериментов на токамаке КТМ использовался полный набор штатных источников питания электромагнитной системы КТМ. Однако, источники питания обмоток центрального соленоида и тороидального магнитного поля были задействованы только на половину их проектной мощности, в связи с незавершенностью пусконаладочных работ в полном объеме.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках работ по развитию будущей термоядерной энергетики и в поддержку проекта ИТЭР в Республике Казахстан создается материаловедческий токамак КТМ [1]. Запуск подобных установок и выход их на номинальные проектные параметры требует проведения научно-исследовательской работы (НИР) по настройке сценария разряда и режимов работы отдельных подсистем, таких как система управления источниками питания, система управления плазмой и др. Проведение подобной НИР требует достаточно длительного времени (несколько лет) от момента получения первой плазмы, осуществления физического пуска, до момента выхода на номинальные параметры. Проект токамака КТМ предусматривает получение плазмы диверторной конфигурации с током 750 кА, средней плотностью электронов $\langle n_e \rangle = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, средней температурой электронов $\langle T_e \rangle = 1 \text{ кэВ}$ с длительностью разряда 5 секунд и использованием дополнительного высокочастотного нагрева плазмы.

Выход установки на номинальные параметры проводится в несколько этапов. Сначала проводятся работы по получению плазмы в омическом режиме с круглым сечением, далее по мере повышения параметров плазмы переходят от круглого сечения к плазме с вытянутым сечением и, затем, к плазме с диверторной конфигурацией. После достижения максимальных параметров плазменного шнура в омическом режиме переходят к использованию дополнительных методов нагрева плазмы.

На начальном этапе работы установки решается ряд проблем по реализации сценария плазменного разряда. К ним относятся: создание условий, необходимых для обеспечения пробоя, получение самого пробоя, роста тока и удержание плазменного шнура.

Также на данном этапе уточняются параметры электромагнитной системы установки, отрабатываются и настраиваются системы электропитания и уп-

равления для реализации задаваемых диаграмм токового сценария разряда.

В рамках НИР было проведено исследование процесса формирования плазменного шнура токамака КТМ и выполнены следующие работы:

- оптимизация токового сценария в полоидальных катушках для создания начальной предпробойной конфигурации магнитных полей в вакуумной камере КТМ;
- эксперименты по уточнению модели электромагнитной системы (ЭМС) токамака КТМ;
- настройка режимов работы источников питания (ИП) при их совместной работе;
- эксперименты по получению плазменного разряда и исследованию процесса формирования плазменного шнура круглого сечения.

Во время проведения экспериментов параметры плазменного шнура определялись с помощью магнитных и физических диагностик токамака КТМ.

При проведении НИР приобретен уникальный опыт экспериментальных работ на современной высокотехнологичной научно-исследовательской установке для получения высокотемпературной плазмы. Полученные данные и достигнутые параметры плазменного разряда позволят перейти к следующему этапу получения плазменного разряда на повышенных параметрах и, в дальнейшем, к экспериментам по достижению проектных значений плазменного разряда токамака КТМ.

В данной статье описаны результаты работ по оптимизации сценария в полоидальных катушках для создания начальной предпробойной конфигурации магнитных полей в вакуумной камере КТМ и по получению плазменного разряда и исследованию процесса формирования плазменного шнура, с учетом ограничений на мощность источников питания ЭМС КТМ в половину номинала.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКОВОГО СЦЕНАРИЯ В ПОЛОИДАЛЬНЫХ КАТУШКАХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ПРЕДПРОБОЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ КТМ

Под формированием плазменного шнура понимается получение лавинного пробоя, в результате чего и происходит образование плазмы в объеме вакуумной камеры. Для организации пробоя необходимо соблюсти несколько условий [2]: 1) создание области с минимумом магнитного полоидального поля в вакуумной камере, так называемого нуля поля, и поддержание его в течение заданного времени; 2) создание вихревого электрического поля (напряжения на обходе); 3) наличие продольного тороидального магнитного поля. Первые два условия взаимосвязаны, так значение напряжения на обходе, в основном, задается производной тока в центральном соленоиде (CS), который, в свою очередь, магнитно связан с полоидальными обмотками (PF). Таким образом, изменение тока в центральном соленоиде влияет на токи в полоидальных обмотках. С другой стороны, с помощью токов в полоидальных обмотках достигается компенсация вертикального рассеянного магнитного поля от CS и от токов, наведенных в проводящих элементах вакуумной камеры. Как видно, расчет токового сценария начальной предпробойной конфигурации является многопараметрической задачей.

Третьим условием является наличие тороидального магнитного поля, необходимого для удержания заряженных частиц. Значение тороидального магнитного поля влияет на длительность стадии пробоя. Следует отметить, что для разных газов условия достижения пробоя могут сильно отличаться. Так, например, на аргоне достичь пробоя намного легче, чем на водороде. В связи с этим на многих токамаках первые эксперименты начинают с использованием рабочего газа аргона, что позволяет отработать режимы и опробовать совместную работу всех систем необходимых для получения плазменного разряда.

На данном этапе работ был проведен расчет токового сценария разряда с формированием необходимых условий для организации пробоя на токамаке КТМ. Была проведена серия экспериментов, целью которых была разработка оптимального сценария с формированием нуля магнитного поля на внутреннем обводе вакуумной камеры КТМ с длительностью его удержания не менее 10 мс и максимально возможным напряжением на обходе для организации лавинного пробоя.

На рисунке 1 показаны диаграммы токов с наилучшим оптимизированным токовым сценарием в обмотках ЭМС КТМ, позволяющим получать и удерживать ноль полоидального магнитного поля на внутреннем обводе вакуумной камеры в течение 30 мс.

Также на рисунке 1 показаны диаграммы напряжений необходимые для достижения необходимых токов в обмотках ЭМС КТМ. При этом достигалось максимальное значение напряжения на обходе с учетом имеющихся ограничений и возможностей источников питания на момент проведения экспериментов.

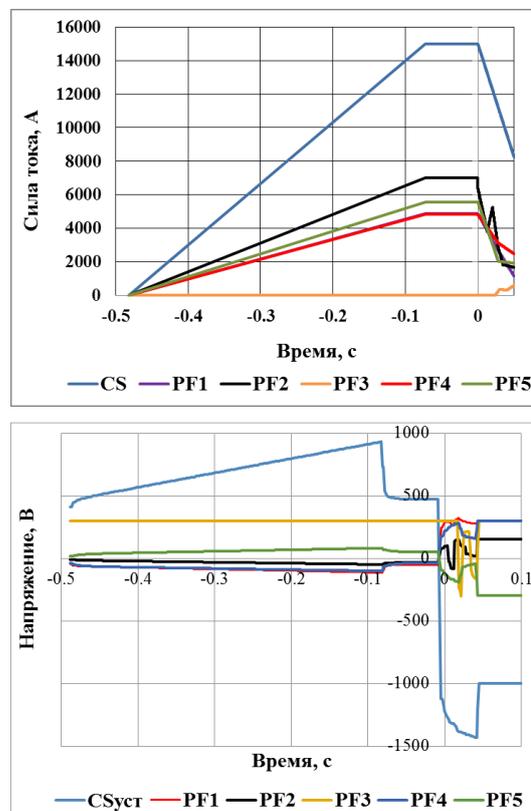


Рисунок 1. Задаваемые токи и напряжение в обмотках токамака КТМ при их совместной работе

Стартом разряда по получению плазмы считается время 0, указанное на рисунке 1, с последующим спадом (выводом) тока по заданной кривой. Перед разрядом осуществляется заведение токов в обмотки с заданной динамикой в течение 400 мс с последующим удержанием тока на заданном значении (полке) в течение 73 мс. Удержание тока на полке осуществляется с целью снижения наведенных токов на вакуумной камере до нуля. Это обеспечивает наилучшие условия для формирования последующей нулевой магнитной конфигурации на стадии разряда. Длительность диаграммы непосредственно на стадии ожидаемого пробоя и формирования плазмы составляет 50 мс.

На рисунке 2 приведена расчетная конфигурация магнитного поля внутри вакуумной камеры КТМ на стадии ожидаемого пробоя и формирования плазмы.

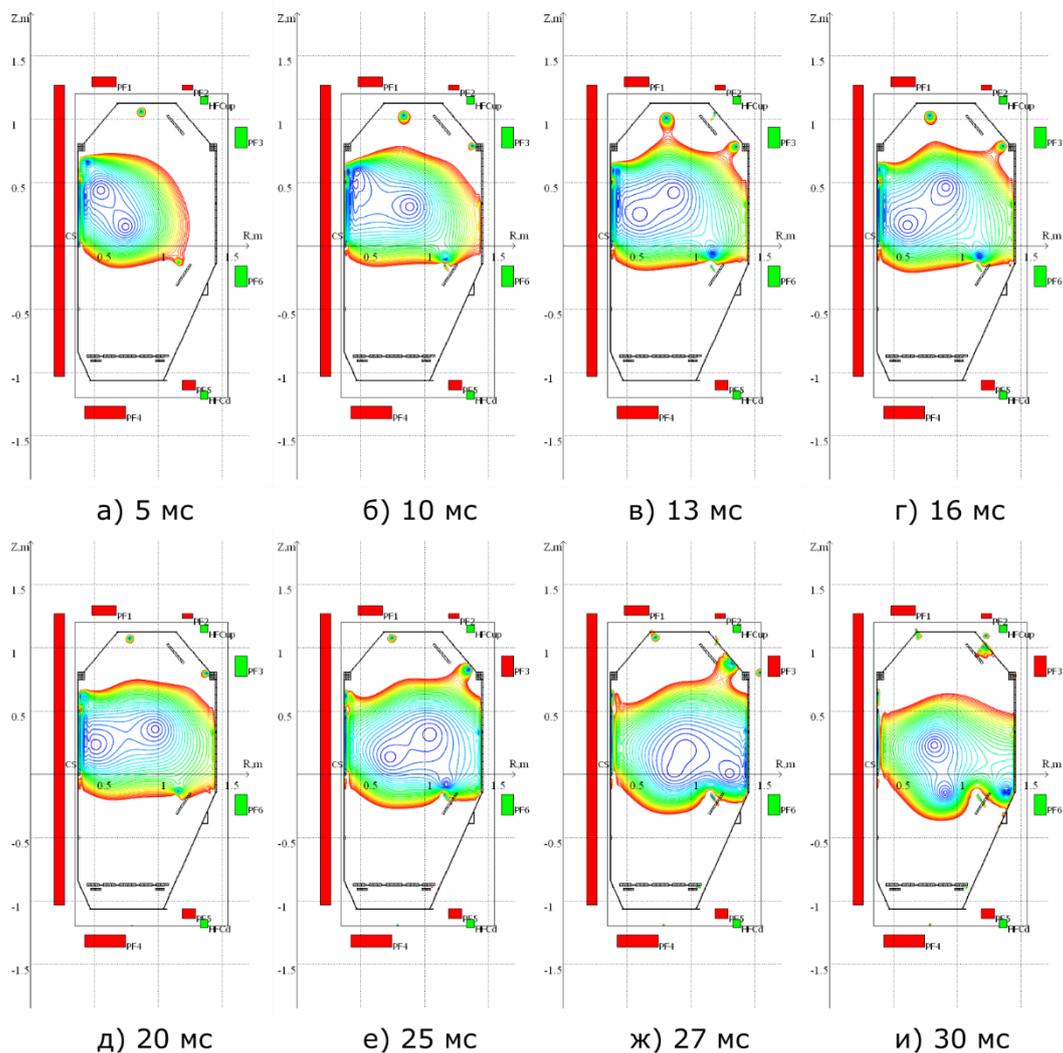


Рисунок 2. Расчетная магнитная конфигурация внутри вакуумной камеры токамака КТМ

Расчет проведен с использованием кода *Plasmaless Tokscen* [3]. Как видно из рисунка 2, имеется квазистационарная конфигурация нуля поля. Ноль поля формируется ближе к внутреннему обводу и постепенно смещается к центру ВК и далее уходит к внешнему обводу вниз. С точки зрения получения пробоя оптимальным вариантом было бы удержание конфигурации нуля поля в заданном месте, без смещения и изменения формы. Это создает наилучшие условия для пробоя рабочего газа. Однако, в силу конструктивных особенностей ВК и наличия массивных токопроводящих элементов, таких как диверторный стол, фланцы вакуумной камеры и других элементов, а также несимметричной конструкции, усложняется и без того сложный расчет подобного токового сценария, что требует длительного времени, а, возможно, и использования специального оптимизационного расчетного кода, например *TRANSMAX* [4].

На рисунке 3 показаны кривые напряжения на внутреннем цилиндре ВК КТМ, измеренные с помощью датчиков напряжения обхода DNO_1, DNO_2,

DNO_12, расположенных на разных отметках по оси Z: $-0,085$ м, $-0,565$ м, $0,695$ м, соответственно.

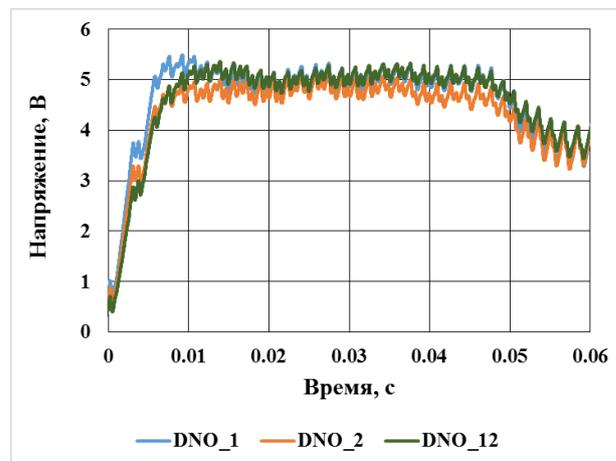


Рисунок 3. Напряжение на внутреннем обходе токамака КТМ

Напряжение на обходе в момент времени планируемого пробы составляет около 5 В.

Таким образом, по результатам проведенных расчетов и экспериментов были достигнуты условия для проведения экспериментов по получению и измерению параметров плазмы на токамаке КТМ.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

После проведенных расчетов и выбора оптимального токового сценария были проведены эксперименты по получению плазменного разряда. Для исследования плазменного разряда применены следующие диагностики: электромагнитные датчики, пироэлектрический болометр, АХUV-монитор, быстродействующая видеокамера с частотой регистрации 500 кадр/с, бесбойный монитор среднечордовой плотности (БМСП), перестраиваемый импульсный рефлектометр (ПИР).

Во время проведения экспериментов тороидальное магнитное поле достигало 0,5 Тл, что соответствует половине номинального значения поля при токе в тороидальной обмотке, равном 30 кА. В качестве рабочей среды использовался газ – аргон. Использование аргона было обусловлено невозможностью достижения пробы при данных условиях на водороде.

При проведении экспериментов был получен чисто омический пробой рабочего газа аргон без использования дополнительных методов предьонизации. При этом длительность разряда составила 40–50 мс с током плазмы 5–6 кА. На рисунке 4 показана измеренная кривая тока плазмы.

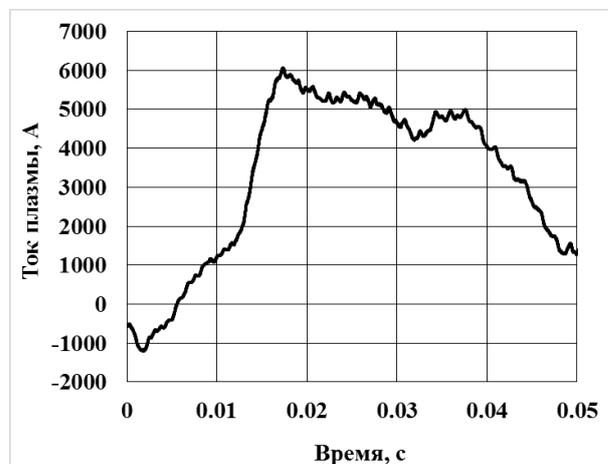


Рисунок 4. Ток плазмы

На рисунке 5 приведены видеокадры формирования плазменного шнура.

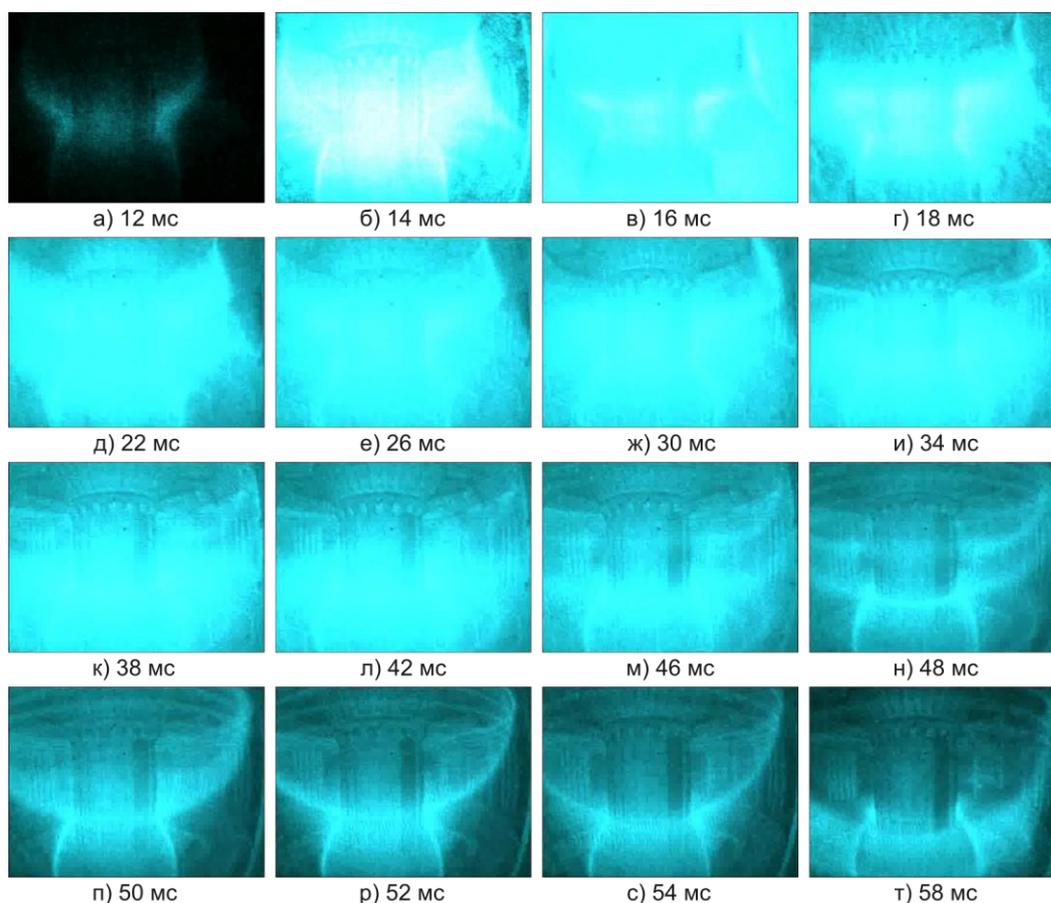


Рисунок 5. Видеокадры формирования плазменного разряда

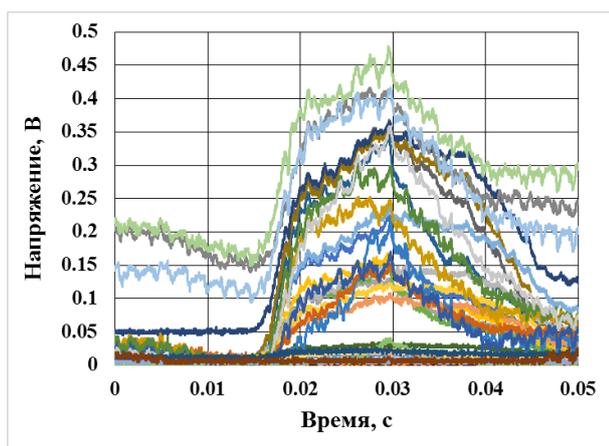


Рисунок 6. Данные с AXUV монитора

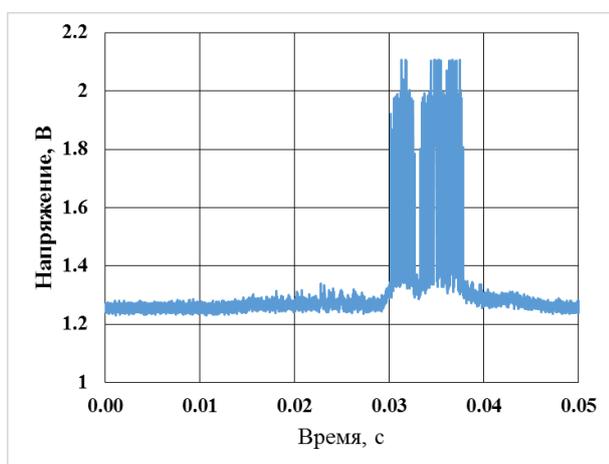


Рисунок 7. Данные с диагностики БМСП

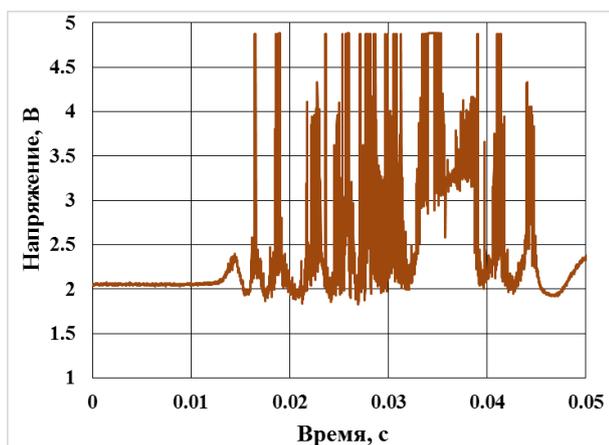


Рисунок 8. Данные с диагностики ПИР

Как видно из рисунка 5, плазменный шнур формируется на внутреннем обводе вакуумной камеры. На двенадцатой миллисекунде происходит ионизация рабочего газа под действием вихревого электрического поля (рисунок 5-а), после чего происходит быстрая объемная ионизация газа (лавинный пробой) с ростом тока плазмы. В первые 10 мс после пробоя

наблюдается яркое свечение газа за счет его интенсивной ионизации с последующей рекомбинацией и рост тока плазмы, после чего, вследствие спада тока, наблюдается уменьшение свечения газа и постепенный уход плазменного шнура вниз и к внешнему обводу.

На рисунках 6–8 показаны сигналы с диагностик: AXUV монитор, бессбойный монитор среднечордовой плотности плазмы (БМСП) и перестраиваемый импульсный рефлектометр (ПИР), соответственно.

Данные с диагностики AXUV монитор хорошо коррелируются по времени с током плазмы. Данные с СВЧ диагностик (рисунки 7, 8) также свидетельствуют о наличии плазмы. Следует отметить, что диагностика ПИР работала в режиме рефрактометра из-за относительно небольшой плотности плазмы. Разница в длительности сигналов с диагностик ПИР и БМСП связана с их разной чувствительностью, вследствие работы на разных частотах 30 ГГц и 130 ГГц, соответственно. При этом, как показал анализ данных, максимальная электронная плотность плазмы не превышала $2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Диагностические данные на рисунках 4–8 хорошо коррелируются по времени и подтверждают наличие плазменного шнура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2018 году на токамаке КТМ была проведена оптимизация и настройка начальной предпробойной фазы сценария плазменного разряда. На основе полученных сценариев предпробойной фазы проведены эксперименты по получению плазменного разряда и измерение его параметров. По результатам экспериментов был получен плазменный разряд токамака КТМ с круглым сечением плазменного шнура в режиме омического нагрева. В качестве рабочего газа использовался аргон. Величина тока плазмы составила 6 кА с длительностью разряда около 40–50 мс. Пробой газа был получен без использования дополнительных способов предыонизации.

Полученные результаты работ будут использоваться для проведения дальнейших экспериментов по получению плазмы и повышению ее параметров.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках тем НТП КТМ: «Исследование процесса формирования плазменного шнура токамака КТМ в режиме омического нагрева», «Определение параметров плазмы с использованием физических диагностик и расчетных методов».

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении работ персоналу токамака КТМ – технологическому отделу, отделу автоматизации экспериментов и отделу термоядерных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 I. L. Tazhibayeva, et al., “КТМ Experimental Complex Project Status”, Fusion Science and Technology, vol.47, April 2005, p. 746–750.
- 2 Беляков, В.А. ТОКАМАК: начальная стадия разряда / В.А. Беляков, А.А. Кавин, С.А. Лепихов, А.Б. Минеев, А.Д. Овсянников // СПб.: Издательство «Лань». – 2014. – 180 с.
- 3 Расчетный код моделирования динамики магнитных полей с учетом наведенных вихревых токов в установках типа токамак / А.Д. Садыков, М.К. Скаков, Г.В. Шаповалов, М.С. Садыкова // Вестник НЯЦ РК.– 2015.– № 3.– С. 55–58.
- 4 M. Lobanova, L. P. Makarova, A. B. Mineeva, V. I. Vasilieva. Plasma initiation stage analysis in tokamaks with TRANSMAC code. Plasma Devices and Operations. Volume 11, Issue 3, 2003.

КТМ ТОКАМАҒЫНДАҒЫ ПЛАЗМАЛЫҚ РАЗРЯД
АЛУ БОЙЫНША ЭКСПЕРИМЕНТТІК НӘТИЖЕЛЕРІ

¹⁾ Б.Ж. Чектыбаев, ¹⁾ А.Д. Садыков, ²⁾ Э.Г. Батырбеков,
¹⁾ М.К. Скаков, ¹⁾ Е.А. Кашикбаев, ¹⁾ А.А. Жаксыбаева

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
²⁾ «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан

Мақалада 2018 жылы өткізілген ҚТМ токамағындағы плазмалық разрядты алу бойынша тәжірибелік жұмыстардың негізгі нәтижелері сипатталған. *Plasmaless Tokscen* есептік кодының көмегімен алынған ҚТМ токамақтағы магнит өрісінің бастапқы сыналды конфигурациясының сценарийін есептеу нәтижелері және ҚТМ диагностикалық кешенінің көмегімен таңдалған сценарий бойынша разряд параметрлерін өлшеу нәтижелері келтірілген. Эксперимент барысында ҚТМ токамағында электромагниттік жүйесінің штаттық тоқ көздерінің толық жиынтығы қолданылды. Алайда, индуктормен тороидалды магнит өрісінің орамаларын тоқ көзіне іске қосу барысында, жұмыстар толық көлемде расталмауына байланысты жобалық қуаттың жартысына ғана іске қосылды.

RESULTS OF PLASMA DISCHARGE OBTAINING EXPERIMENTS
AT KTM TOKAMAK

¹⁾ B.Zh. Chektybayev, ¹⁾ A.D. Sadykov, ²⁾ E.G. Bатыrbekov,
¹⁾ M.K. Skakov, ¹⁾ E.A. Kashikbayev, ¹⁾ A.A. Zhaksybayeva

¹⁾ Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
²⁾ RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan

Main experimental work results of obtaining plasma discharge at KTM tokamak are outlined in the paper. Results of initial prebreakdown magnetic field configuration scenario calculations by *Plasmaless Tokscen* numerical code and results of measuring parameters of selected scenario by diagnostic set of KTM are shown. All KTM electromagnetic system power supplies have been used during experiments on KTM tokamak. However, power supplies of central solenoid and toroidal magnetic field coils have been used only on its half project power, because of incompleteness of commissioning works.