

УДК 533.9.03; 551-73

## РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ОМИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ВОДОРОДА В ТОКАМАКЕ КТМ

<sup>1)</sup> Жаксыбаева А.А., <sup>1)</sup> Садыков А.Д., <sup>1)</sup> Чектыбаев Б.Ж., <sup>1, 2)</sup> Оспанова Ж.Н.<sup>1)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан<sup>2)</sup> Восточно-Казахстанский Государственный университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: zhaksybaeva@nnc.kz

В статье представлены расчетные варианты токовых сценариев для осуществления омического пробоя газа водород в токамаке КТМ. Приведена магнитная конфигурация полей в момент пробоя и основные параметры пробоя в вакуумной камере, с учетом основных условий и ограничений для токамака КТМ. Токовые сценарии подготовлены с помощью расчетного кода Plasmaless Tokscen. На основе проведенных расчетных оценок по реализуемости пробоя были подобраны оптимальные значения необходимых параметров для проведения пусковых работ на токамаке КТМ.

## ВВЕДЕНИЕ

Казахстанский материаловедческий токамак КТМ – установка плазменного разряда тороидального типа для исследований взаимодействия высокотемпературной плазмы с материалами первой стенки для будущих экспериментальных и промышленных установок термоядерного синтеза. Установка КТМ является одним из значительных звеньев в кооперации передовых стран мира по созданию экологически чистой термоядерной энергетики будущего. На данный момент ведутся завершающие подготовительные работы над вводом в эксплуатацию токамака КТМ, в связи с чем первостепенной задачей является разработка оптимального сценария омического пробоя газа.

Начальной фазой получения плазменного разряда на токамаке КТМ, как и на других токамаках [1], в основном является омический пробой. Он обеспечивается рядом условий в вакуумной камере токамака, включающих необходимые вакуум и давление рабочего газа, предионизацию, тороидальное электрическое поле, тороидальное магнитное поле и минимум рассеянных полоидальных магнитных полей в месте ожидаемого пробоя. Необходимое для осуществления пробоя тороидальное электрическое поле в вакуумной камере токамака создается за счет большой производной тока в центральном соленоиде. В тороидальном электрическом поле образуется лавина электронов, которая ионизирует рабочий газ. При достаточной ионизации рабочего газа происходит фазовый переход «газ-плазма», внутри плазменной области происходит превращение разомкнутых магнитных поверхностей в замкнутые, начиная с некоторого тока плазмы, и дальнейшее формирование плазменного разряда. Также для пробоя в вакуумной камере формируется область минимальных магнитных полей, в которой развитие пробоя наиболее эффективно, так как малые магнитные поля этой области незначительно отклоняют электроны от траектории развития лавинного пробоя. Область малых магнитных полей рассеяния в полоидальном сечении вакуумной камеры называют ноль полем. Для компенса-

ции рассеянных магнитных полей от тока в центральном соленоиде и удержания необходимого нуля поля применяются магнитные поля от токов в катушках полоидального поля. В условиях значительной динамики магнитных полей от токов в катушках токамака необходимо обеспечить стабильность положения нуля поля на время пробоя (10–20 мс). Кроме того, в этот период времени от изменяющихся во времени магнитных полей индуцируются существенные токи на конструктивных элементах вакуумной камеры токамака и их магнитные поля влияют сложным образом на положение и характеристики нуля поля. Особенно это сказывается на токамаках, чьи вакуумные камеры имеют несимметричную по вертикали конструкцию со множеством внутренних элементов, дивертором и патрубками. К таким установкам относится и токамак КТМ. Как видно, расчет токового сценария начальной предпробойной конфигурации является многопараметрической задачей, поэтому начальную стадию разряда плазмы выделяют в отдельную задачу на этапе подготовки к физическому пуску.

В ходе подготовки к пуску были рассчитаны несколько вариантов сценария получения пробоя газа. В настоящей работе представлены основные данные подготовленных токовых сценариев, результаты проведенных расчетных оценок реализуемости пробоя водорода на их основе, проведен соответствующий анализ полученных результатов.

Следует отметить, что для разных газов условия достижения пробоя могут сильно отличаться. Например, на аргоне достичь пробоя легче, чем на водороде. В связи с этим первые экспериментальные пуски на токамаке КТМ были проведены с применением в качестве рабочего газа – аргона, что, в свою очередь, позволило отработать режимы и опробовать совместную работу всех систем, необходимых для получения плазменного разряда. Дальнейший переход от аргона к водороду в качестве рабочего газа требует расчета новых вариантов сценария для осуществления пробоя, что и является основной целью данной работы.

## 1 РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ОМИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ВОДОРОДА В ТОКАМАКЕ КТМ

Рассмотрим основные условия и ограничения организации пробоя газа в токамаке КТМ [0]:

- выбор координат области пробоя и создание в этой области минимального значения полоидального магнитного поля  $B_{str}$ , т.е. требуется очень низкий уровень полей рассеяния в вакуумной камере в области пробоя газа, создание так называемой области с «нулевой» конфигурацией магнитного поля, по-другому «нуль поля», равным менее 10 Гс.

- поддержание созданной нулевой конфигурации, по возможности, в течение длительного времени:  $\tau_{bd} \approx 10$  мс и более;

- радиус области пробоя:  $a > 0,1$  м;

- к моменту пробоя необходимо заведение внутрь камеры в область пробоя вихревого электрического поля (напряжения пробоя или напряжения на обходе). Для токамака КТМ запланировано на этот год достижение напряжения на обходе в 7,0 В, что соответствует напряженности электрического поля  $E \approx 1,3926$  В/м.

- наличие продольного тороидального магнитного поля:  $B_{tmax} \approx 1$  Тл.

Для проведения пусков было рассчитано три варианта сценария пробоя газа. Предлагаемые сценарии отличаются значениями напряжения на обходе (6 В; 6,5 В; 7 В), условиями длительности устойчивой конфигурации нуля поля, соответственно и радиусом области пробоя.

Расчетные оценки реализуемости пробоя газа водород проведены на основании эмпирических и полумпирических формул [2–4].

### 1.1 Расчет сценария пуска в программном коде Plasmaless Tokscen

В качестве расчетного кода была использована программа Plasmaless Tokscen, разработанная на базе токамака КТМ и предназначенная для осуществления прямых расчетов токовых сценариев в полоидальных обмотках [5]. Все перечисленные ранее условия, необходимые для создания благоприятной начальной предпробойной конфигурации, были учтены в ходе расчета всех трех вариантов токового сценария.

В ходе подбора токовых сценариев также проводилась оценка их реализуемости с технической точки зрения на токамаке КТМ. Был проведен расчет программных траекторий напряжения для источников питания обмоток тороидального и полоидального поля токамака КТМ, по заданным трем сценариям разряда, с учетом наведенных токов в пассивных проводящих структурах. Полученные значения напряжения не превышают допустимых технических норм.

На рисунке 1 представлена структура магнитных полей в момент пробоя в вакуумной камере токамака КТМ, смоделированная в программе Plasmaless TokScen. Как видно, уровень рассеянных магнитных

полей в области пробоя с радиусом  $\sim 0,2$  м и более не превышает  $B_{str} \sim 5$  Гс во всех трех вариантах.

### 1.2 Оценочные расчеты по обоснованию реализуемости пробоя водорода на основе рассчитанных вариантов сценария

В соответствии с рассчитанными сценариями предпробойной конфигурации магнитных полей, для проведения оценки реализуемости пробоя были определены исходные данные, приведенные ниже.

Рабочий газ – водород. Инициализация пробоя осуществляется ближе к внутренней стенке вакуумной камеры с координатами области пробоя (0,8; 0,2).

Сценарий 1:  $U_{об.} = 6$  В  $\rightarrow E = 1,1937$ ,  $B_{str} = 5$  Гс  $\rightarrow a_{min} \approx 0,2$ . В рассматриваемом сценарии длительность устойчивой конфигурации нуля поля с центром в точке (0,8; 0,2) и перечисленными выше данными около 11 мс.

Сценарий 2:  $U_{об.} = 6,5$  В  $\rightarrow E = 1,2932$ ,  $B_{str} = 5$  Гс  $\rightarrow a_{min} \approx 0,2$ . Длительность устойчивой конфигурации нуля поля около 9 мс.

Сценарий 3:  $U_{об.} = 7$  В  $\rightarrow E = 1,3926$ ,  $B_{str} = 5$  Гс  $\rightarrow a_{min} \approx 0,22$ . Длительность устойчивой конфигурации нуля поля около 6,5 мс.

С учетом неустойчивости нуля поля и возможных погрешностей в расчетном коде для проведения оценки осуществимости пробоя во всех трех сценариях рассматриваются наиболее пессимистичные значения параметров для пробоя газа. Выбраны следующие значения тока в тороидальной обмотке: 30 кА, 40 кА, 50 кА, 58 кА.

Условие пробоя газа в токамаке на основе теории Таусенда:

$$\alpha \cdot L_{eff} > 1, \quad (1)$$

где  $L_{eff}$  – характерная длина силовых линий вдоль магнитного поля (от стенки вакуумной камеры через область пробоя до стенки),  $a$  – первый коэффициент Таусенда  $\alpha = \alpha(p, E)$ .

Для определения оптимальных параметров пробоя газа расчеты проводились для широкого диапазона значений давления:  $p = 1 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-4}$  торр.

Эффективная длина силовых линий рассчитана по формуле

$$L_{eff} = C_L \cdot a \cdot \frac{B_t}{B_{str}}, \quad (2)$$

где  $C_L$  – подгоночный параметр,  $a$  – малый радиус области пробоя.

Из формулы (2) мы можем получить довольно грубую оценку эффективной длины силовых линий. Подгоночный параметр  $C_L$  берем равным 0,25.

На рисунке 2 представлены результаты расчетов условия реализуемости пробоя водорода по теории пробоя Таусенда. Значения ниже красной пунктирной линии не учитываются при дальнейшем проведении расчетов.

На рисунке 3 представлены результаты расчетов изменения давления пробоя в зависимости от ограни-

чения по длительности устойчивой конфигурации нуля поля для каждого из вариантов. Можно вновь

заметить значительное сужение диапазона значений по давлению.

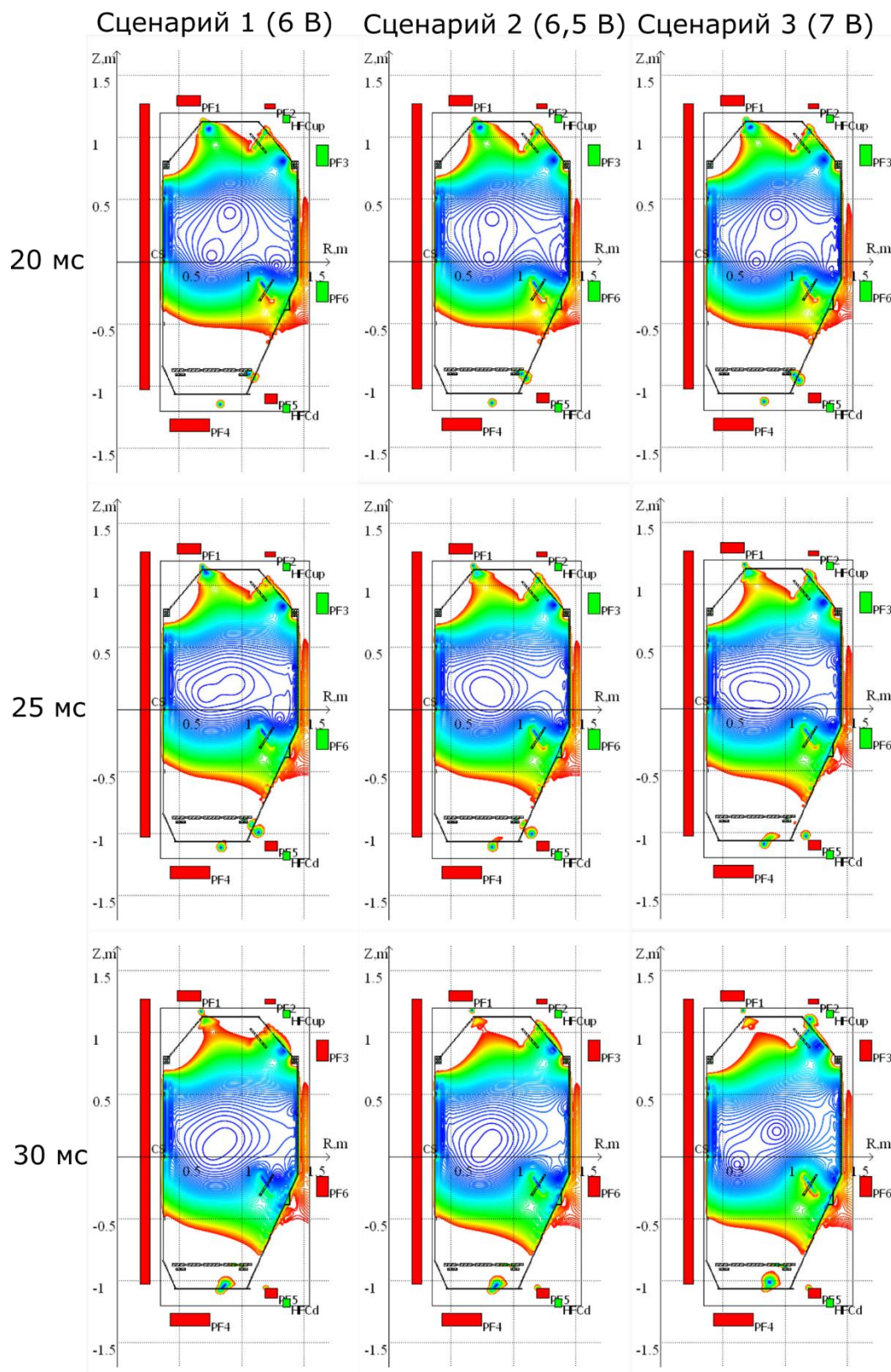
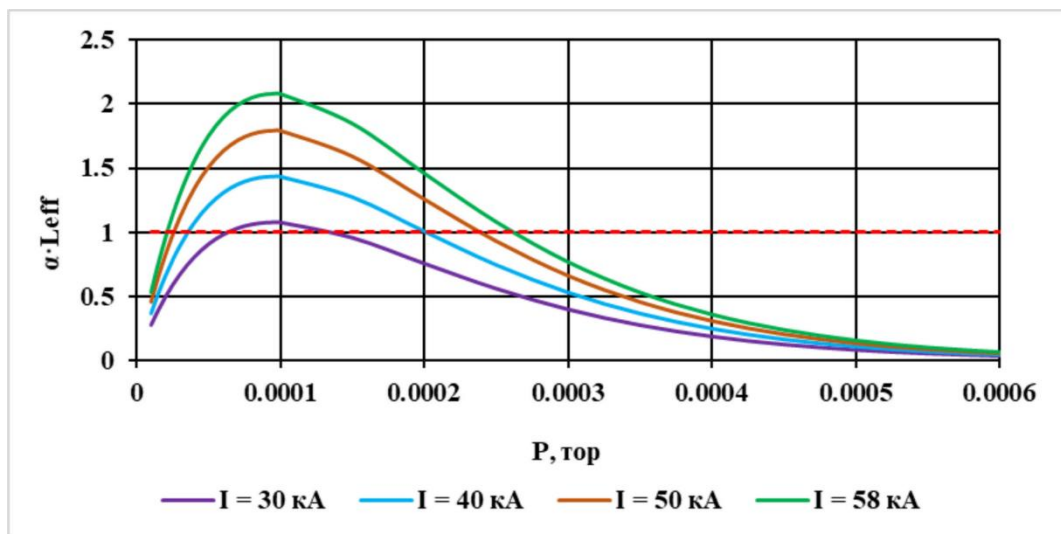
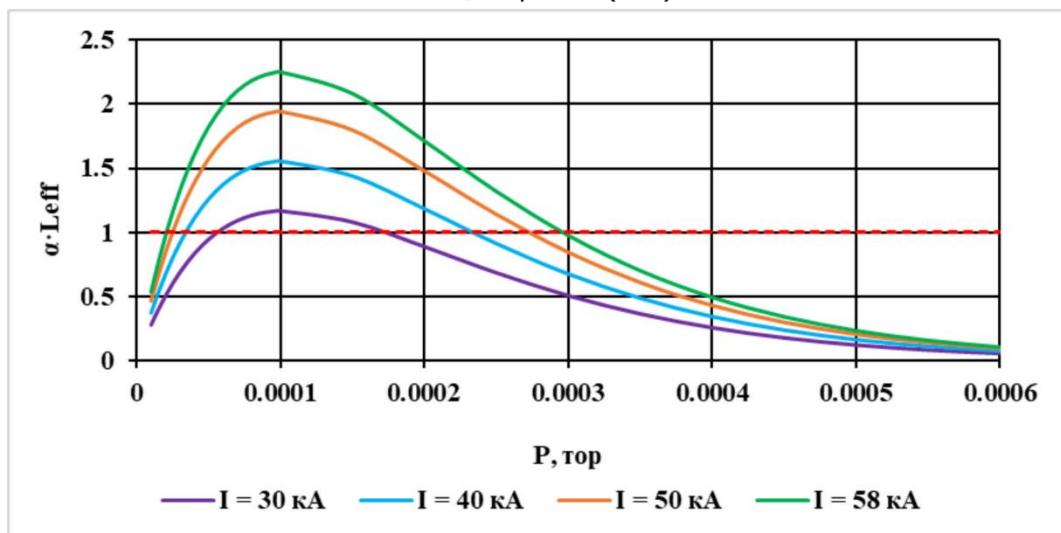


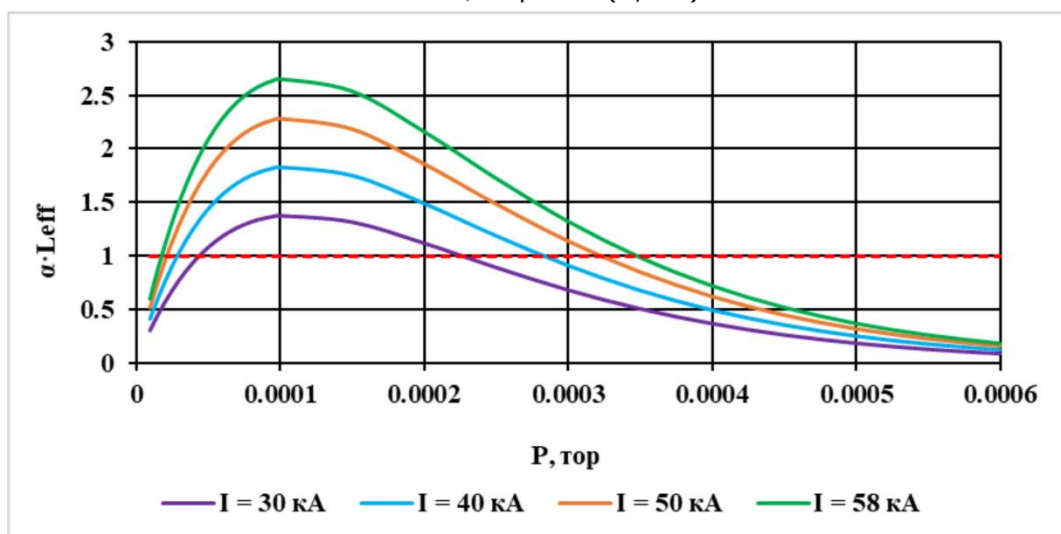
Рисунок 1. Структура магнитных полей в момент пробоя в токамаке КТМ



Сценарий 1 (6 В)

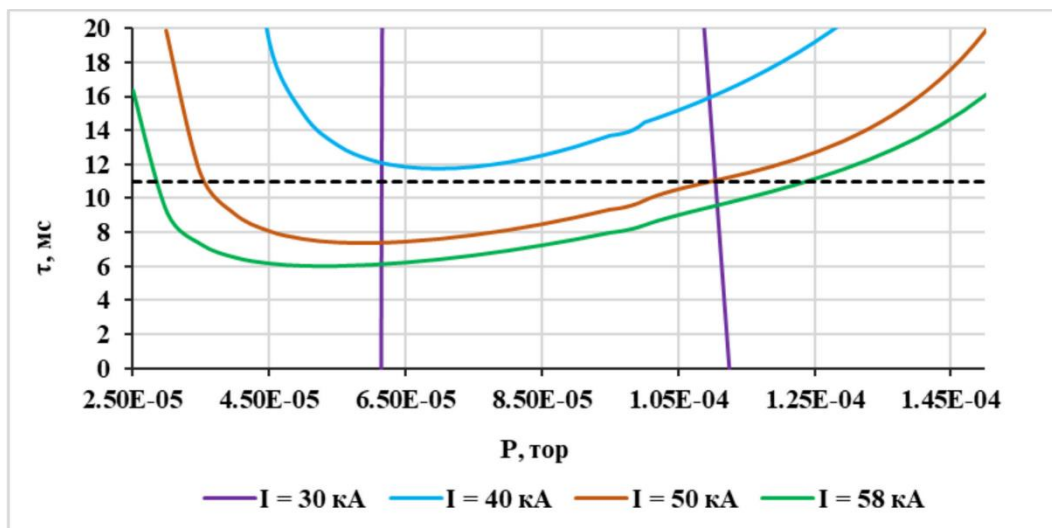


Сценарий 2 (6,5 В)

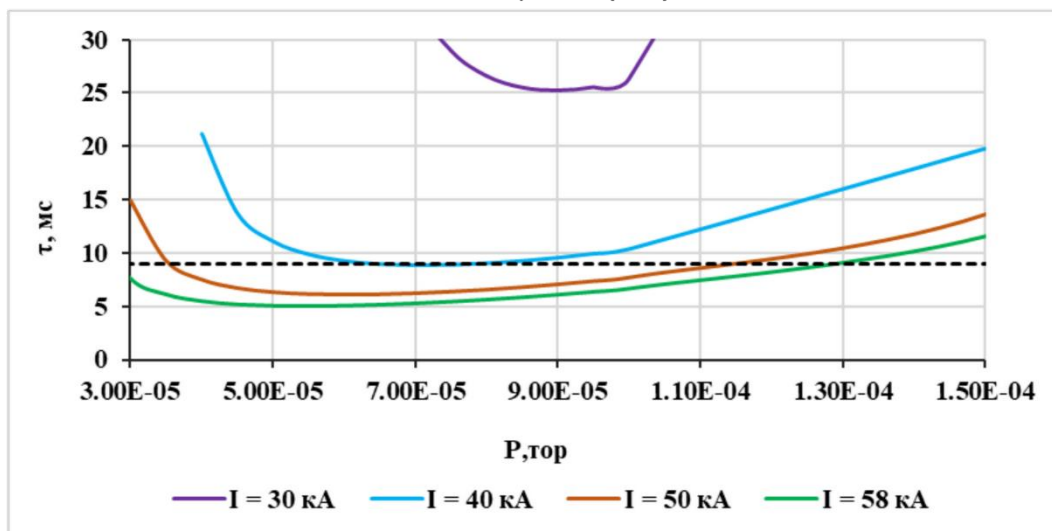


Сценарий 3 (7 В)

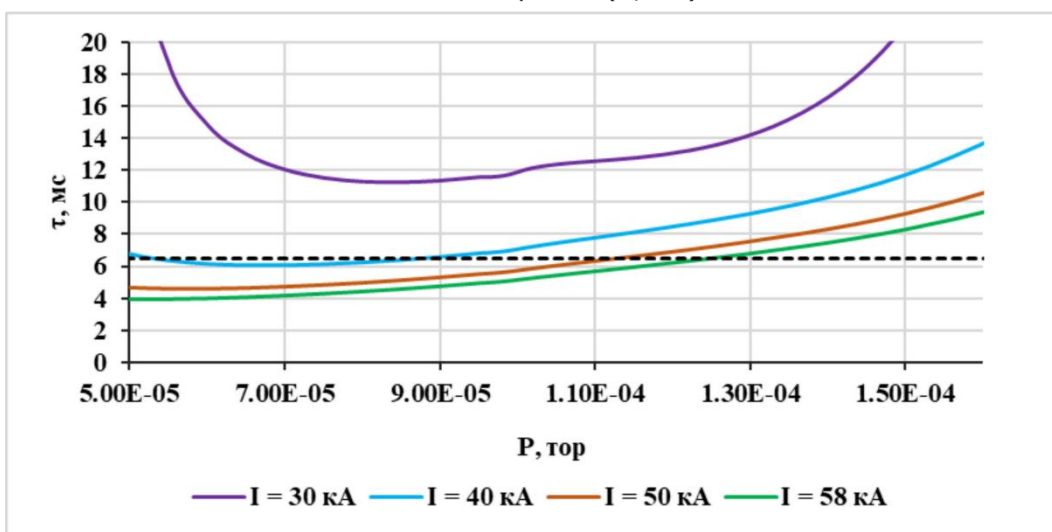
Рисунок 2. Зависимость условия реализуемости пробоя газа от давления ( $B_{\text{стр}} = 5 \text{ Гс}$ )



Сценарий 1 (6 В)



Сценарий 2 (6,5 В)



Сценарий 3 (7 В)

Рисунок 3. Зависимость длительности пробы газа от давления ( $B_{str} = 5$  Гс)

## 2 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

На основе вариантов сценария с напряжением на обходе в 6 В, 6,5 В, 7 В проведен оценочный расчет реализуемости омического пробога газа водород. По рисункам, представленным ранее можно заметить, что пробой газа водород осуществим на основе всех рассчитанных токовых сценариев. Результаты представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1. Значения оценочного расчета омического пробога водорода.  $U = 6 \text{ В}$

| $I$ (кА) | $B_t$ (Тл) | $a$ (м) | $L_{eff}$ (м) | $P$ (тор)                                                                                                                                       |
|----------|------------|---------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 30       | 0,6        | 0,2     | 60            | Пробой газа водород неосуществим                                                                                                                |
| 40       | 0,8        |         | 80            | Пробой газа водород неосуществим                                                                                                                |
| 50       | 1          |         | 100           | Наиболее благоприятные значения давления пробога (по длительности $\approx 7,5 \pm 5 \text{ мс}$ ): от $5 \cdot 10^{-5}$ до $7,5 \cdot 10^{-5}$ |
| 58       | 1,16       |         | 116           | Наиболее благоприятные значения давления пробога (по длительности $\approx 6,5 \pm 5 \text{ мс}$ ): от $5 \cdot 10^{-5}$ до $7,5 \cdot 10^{-5}$ |

Таблица 2. Значения оценочного расчета омического пробога водорода.  $U = 6,5 \text{ В}$

| $I$ (кА) | $B_t$ (Тл) | $a$ (м) | $L_{eff}$ (м) | $P$ (тор)                                                                                                                                 |
|----------|------------|---------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 30       | 0,6        | 0,2     | 60            | Пробой газа водород неосуществим                                                                                                          |
| 40       | 0,8        |         | 80            | Пробой осуществим при давлении от $7 \cdot 10^{-5}$ до $7,5 \cdot 10^{-5}$ ( $\tau_{bd} \sim 8,9 \text{ мс}$ )                            |
| 50       | 1          |         | 100           | Наиболее благоприятные значения давления пробога (по длительности $\approx 6 \text{ мс}$ ): от $5,5 \cdot 10^{-5}$ до $7 \cdot 10^{-5}$   |
| 58       | 1,16       |         | 116           | Наиболее благоприятные значения давления пробога (по длительности $\approx 5 \text{ мс}$ ): от $5,5 \cdot 10^{-5}$ до $6,5 \cdot 10^{-5}$ |

Таблица 3. Значения оценочного расчета омического пробога водорода.  $U = 7 \text{ В}$

| $I$ (кА) | $B_t$ (Тл) | $a$ (м) | $L_{eff}$ (м) | $P$ (тор)                                                                                                                                 |
|----------|------------|---------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 30       | 0,6        | 0,22    | 66            | Пробой газа водород неосуществим                                                                                                          |
| 40       | 0,8        |         | 88            | Наиболее благоприятные значения давления пробога (по длительности $\approx 6 \text{ мс}$ ): от $7 \cdot 10^{-5}$ до $7,5 \cdot 10^{-5}$   |
| 50       | 1          |         | 110           | Наиболее благоприятные значения давления пробога (по длительности $\approx 4,5 \text{ мс}$ ): от $6 \cdot 10^{-5}$ до $7 \cdot 10^{-5}$   |
| 58       | 1,16       |         | 127,6         | Наиболее благоприятные значения давления пробога (по длительности $\approx 3,9 \text{ мс}$ ): от $5,5 \cdot 10^{-5}$ до $6 \cdot 10^{-5}$ |

## ЛИТЕРАТУРА

1. The physics of tokamak start-up / D. Mueller // Physics of Plasmas. – May 2013. – Vol. 20, Iss. 5. – P. 058101.
2. Беляков В.А., Кавин А.А., Лепихов С.А., Минсев А.Б., Овсянников А.Д. Токамак: начальная стадия разряда. – СПб.: «Лань». – 2014. – 180 с.
3. Ткачев А.Н., Феденев А.А., Яковленко С.И. Коэффициент Таунсенда, кривая ухода и эффективность формирования пучка убегающих электронов в аргоне // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, Вып. 6. – С. 22–27.
4. Lloyd B., Jackson G.L., Taylor T.S., et al., Low voltage ohmic and electron cyclotron heating assisted startup in DIII-D, Nuclear Fusion, 1991, V.31, P. 2031.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе подготовки ко второму физическому пуску токамака КТМ были рассчитаны три наиболее оптимальных варианта сценария омического пробога газа водород. Сценарии отличаются значениями напряжения на обходе: сценарий 1 – 6 В, сценарий 2 – 6,5 В, сценарий 3 – 7 В. Длительность устойчивой конфигурации нуля поля составляет около 11 мс, 9 мс и 6,5 мс соответственно. Значение напряженности электрического поля:

- сценарий 1:  $U_{об}=6 \text{ В} \rightarrow E \approx 1,1937 \text{ В/м}$ ;
- сценарий 2:  $U_{об}=6,5 \text{ В} \rightarrow E \approx 1,2932 \text{ В/м}$ ;
- сценарий 3:  $U_{об}=7 \text{ В} \rightarrow E \approx 1,3926 \text{ В/м}$ ;

На основе подготовленных сценариев проведен оценочный расчет реализуемости пробога. По полученным результатам оценочного расчета можно сказать о реализуемости пробога водорода на основе всех трех рассчитанных вариантов. На основе проведенной работы получены следующие основные данные:

- определен диапазон необходимого давления пробога с учетом особенностей и ограничений каждого из вариантов сценария (см. таблицу 1);
- определено минимальное значение тороидального магнитного поля:

- сценарий 1:  $B_{t,min} = 1 \text{ Тл}$ ,  $I_{TF} = 50 \text{ кА}$ ;
- сценарий 2, 3:  $B_{t,min} = 0,8 \text{ Тл}$ ,  $I_{TF} = 40 \text{ кА}$ ;

- минимальное значение эффективной длины силовых линий:

- сценарий 1, 2:  $L_{eff} = 80 \text{ м}$  ( $a_{min} = 0,2 \text{ м}$ );
- сценарий 3:  $L_{eff} = 88 \text{ м}$  ( $a_{min} = 0,22 \text{ м}$ ).

Расчетные оценки были проведены на основании эмпирических и полуэмпирических формул и нуждаются в уточнении определенных параметров, учитывая конструкционные особенности токамака КТМ. Экспериментальные пуски на основе данных сценариев запланированы на лето 2019 года. По данной методике уже были рассчитаны токовые сценарии для токамака КТМ, на основе которых был получен пробой газа аргон в экспериментах в 2018 году [6]. Данный факт свидетельствует о том, что эта методика применима для подготовки сценария начального пробога плазмы на токамаках.

Работа выполнена в рамках темы «Исследование процесса формирования плазменного шнура токамака КТМ в режиме омического нагрева» НТП «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ».

5. Садыков А.Д., Скаков М.К., Шаповалов Г.В., Садыкова М.С. Расчетный код моделирования динамики магнитных полей с учетом наведенных вихревых токов в установках типа токамак // Вестник НЯЦ РК – 2015. – № 3. – С. 55–58.
6. Чектыбаев Б.Ж., Садыков А.Д., Батырбеков Э.Г., Скаков М.К., Кашикбаев Е.А., Жаксыбаева А.А. Результаты экспериментов по получению плазменного разряда на токамаке КТМ в 2018 году // Вестник НЯЦ РК – 2019 – № 1 – С. 60–65.

### ҚТМ ТОКАМАҚТАҒЫ СУТЕГІНІҢ ОМИКАЛЫҚ БҰЗЫЛУЫН БАҒАЛАУ

<sup>1)</sup> А.А. Жаксыбаева, <sup>1)</sup> А.Д. Садыков, <sup>1)</sup> Б.Ж. Чектыбаев, <sup>1, 2)</sup> Ж.Н. Оспанова

<sup>1)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

<sup>2)</sup> С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университеті, Өскемен, Қазақстан

Мақалада ҚТМ токамақтағы сутектік газдың омикалық бұзылуын жүзеге асыру үшін тоқ сценарийлердің есептелген нұсқалары ұсынылған. КТМ токамак үшін негізгі шарттар мен шектеулерді ескере отырып, вакуум камерасындағы негізгі бұзылу параметрлері және бұзылу сәттегі магнит өрісінің конфигурациясы келтірілген. Тоқ сценарийлер Plasmaless Tokscen есептеу кодын пайдалану арқылы дайындалған. Бөлінудің жүзеге асырылуының есептік бағалауларына сүйене отырып, КТМ токамак жұмысын бастау үшін қажетті параметрлердің оңтайлы мәндері таңдалды.

### SETTLEMENT ESTIMATES OF THE OMIC HYDROGEN SAMPLE IN THE KTM TOKAMAK

<sup>1)</sup> A.A. Zhaksybayeva, <sup>1)</sup> A.D. Sadykov, <sup>1)</sup> B.Zh. Chektybaev, <sup>1, 2)</sup> Zh.N. Ospanova

<sup>1)</sup> Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

<sup>2)</sup> East Kazakhstan State University S. Amanzholov, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

The article presents the calculated variants of current scenarios for the realization of ohmic breakdown of the hydrogen gas in the KTM tokamak. The magnetic configuration of the fields at the time of the breakdown and the main parameters of the breakdown in the vacuum chamber are given, taking into account the basic conditions and limitations for the KTM tokamak. Current scenarios are prepared using the Plasmaless Tokscen calculation code. Based on the calculated estimates of the feasibility of the breakdown, optimal values of the necessary parameters for starting work on the KTM tokamak were selected.