

УДК 621.039.616, 621.039.619

СРАВНЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ТОКАМАКА КТМ С ОПЕРАЦИОННЫМИ ПРЕДЕЛАМИ УСТАНОВКИ

Н.А. Кирнева^{1,2}, А.М. Белов¹, Д.А. Ольховик³, Д.В. Рыжаков¹, Д.С. Сергеев¹, М.Л. Субботин¹,
И.Л. Тажибаева³, П.П. Хвостенко¹, Б.Ж. Чектыбаев³

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Республика Казахстан

В статье приведены оценки рабочей области токамака КТМ по плотности и току плазмы для омических режимов, исходя из проектных параметров машины. На диаграмму (n_e, I_p) нанесены параметры разрядов, полученных в экспериментах 2021 г. Отмечено увеличение рабочих значений тока плазмы и достижение граничных значений фактора запаса устойчивости $q \sim 4$. Показано, что продвижение в область более высоких токов плазмы в реализованном диапазоне плотностей ведёт к достижению предела по развитию пучков ускоренных электронов. В соответствии с этим увеличение рабочих значений плотности плазмы является одной из целей следующей экспериментальной кампании на токамаке КТМ.

Ключевые слова: область операционных параметров, ток плазмы, длительность импульса.

COMPARISON OF KTM TOKAMAK WORKING PARAMETERS WITH THE OPERATION LIMITS OF THE MACHINE

N.A. Kirneva^{1,2}, A.M. Belov¹, D.A. Olkhovik³, D.V. Ryzhakov¹, D.S. Sergeev¹, M.L. Subbotin¹,
I.L. Tazhibayeva³, P.P. Khvostenko¹, B.Zh. Chektybayev³

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe Sh., Moscow, Russia

³Institute of Atomic Energy of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

Estimation of the KTM tokamak working area in terms of the plasma density and plasma current is presented for ohmic discharges basing on the design parameters of the machine. The (n_e, I_p) diagram contains the discharges obtained in the autumn campaign of 2021. Increase of the operating values of the plasma current and achieving the value of the edge safety factor $q \sim 4$ are marked. It has been shown that the transition to the region of higher plasma currents in the realized density range leads to the approaching the limit on the development of the beams of runaway electrons. Accordingly, increase of the plasma density operating values is one of the objectives of the next experimental campaign on the KTM tokamak.

Key words: operation area, plasma current, pulse duration.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-2-50-54

ВВЕДЕНИЕ

Токамак КТМ — Казахстанский токамак материаловедческий — установка среднего размера, основными задачами которой являются [1] исследования взаимодействия плазмы с первой стенкой:

- тестирование различных материалов первой стенки;
- анализ влияния плазменных потоков на разрушение поверхности;
- изучение физики дивертора, тестирование различных видов диверторных пластин в условиях реальных потоков тепла и частиц из плазмы токамака.

Кроме того, в [1] отмечается, что конструктивной особенностью токамака КТМ является малое аспектное отношение $A = 2$. Установка занимает промежуточное положение между традиционными ($A > 2$) и сферическими ($A < 2$) токамаками. В таблице приведены проектные параметры токамака КТМ вместе с

Параметры токамака КТМ в сравнении с параметрами традиционных и сферических токамаков

Параметр	TCV [2]	T-11M [3]	KTM [1]	NSTX-U [4, 5]	MAST-U [6, 7]
Ток плазмы I_p , МА	0,8	0,12	0,75	2,0	2,0
Большой радиус R_0 , м	0,88	0,7	0,90	0,93	0,85
Малый радиус a , м	0,25	0,2	0,45	0,62	0,65
Аспектное отношение	3,5	3,5	2	1,5	1,31
Вытянутость k	$\leq 2,05$	1	1,7	2,1—2,9	2
Треугольность δ	-0,7—+0,7	0	0,1—0,2	0,2—0,7	0,45
Тороидальное магнитное поле B_T , Тл	1,0—1,46	1,5	1	1	0,92

параметрами традиционных токамаков TCV (Швейцария) и T-11M (Россия) и сферических токамаков MAST-U (Великобритания) и NSTX-U (США). Выбор этих установок для сравнения связан с тем, что они имеют очень близкие геометрические размеры и возможность получения режимов с одинаковым значением тороидального магнитного поля, основное отличие заключается в величине аспектного отношения. Таким образом, при задании идентичных параметров разряда на этих установках можно выделять эффекты, зависящие именно от аспектного отношения. В связи с этим изучение различных режимов удержания плазмы в КТМ также представляет специальный интерес.

В этой статье очерчена область рабочих параметров установки КТМ в омических режимах для разной формы плазменного шнура и продемонстрировано достигнутое расширение рабочей области токамака КТМ в ходе совместных экспериментов с участием сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» в осенней экспериментальной кампании 2021 г. Отметим здесь, что увеличение параметров разряда связано как с проведением работ по оптимизации сценария плазменного разряда, так и с проведением комплексных технических работ на токамаке КТМ по повышению точности измерения и управления, а также по внедрению и использованию системы управления плазмой.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ

В обсуждаемых разрядах осенней кампании 2021 г. сценарий формы разряда предполагал получение плазменного шнура с круглым поперечным сечением. Однако жёсткий контроль соответствия формы плазмы заданному сценарию не был реализован. Поскольку установка КТМ — токамак с низким аспектным отношением, то в соответствии с [8] форма поперечного сечения плазменного шнура должна стремиться к естественной вытянутости $k_{\text{nat}} \sim 1+A^{-2}$ [9]. Для установки с аспектным отношением $A = 2$ получаем $k_{\text{nat}} = 1,25$. Это не противоречит результатам видеонаблюдения в процессе разряда (рис. 1).

Величина тороидального магнитного поля в разрядах составляла $B_T = 0,9$ Тл.

Границы рабочей области установки определялись аналогично тому, как это делалось в [10, 11]. В области низких плотностей граница рабочей области определялась пределом Разумовой по развитию пучков убегающих электронов n_{Raz} . В области высоких плотностей диапазон рабочих параметров ограничивался меньшим из двух значений — пределом Гринвальда n_{Gw} или пределом Мураками n_M . Рабочий диапазон токов разряда ограничивался сверху достижением $q = 2$ на границе плазменного шнура, если соответствующий $q = 2$ ток не превосходит проектного значения. Для определения величины q исполь-

зовалась формула $q = \frac{5a^2 B_T}{I_p R_0} f_1(k) f_2(A)$, где

$$f_1(k) = \frac{1+k^2}{2}; f_2(A) = \frac{1,17 - 0,65/A}{(1-A^{-2})^2} = 1,5; a — ма-$$

лый радиус плазменного шнура, м; B_T — тороидальное магнитное поле, Тл; I_p — ток плазмы, МА; R_0 — большой радиус тора, м; k — вытянутость плазмы. Подстановка геометрических параметров, приведённых в таблице для установки КТМ, и $B_T = 0,9$ Тл позволяют получить величины тока плазмы, соответствующие граничному значению $q = 2$. Для плазмы с $k = 1,25$ $I_p(q = 2) = 970$ кА, для плазмы с вытянутостью $k = 1,7$ $I_p(q = 2) = 1,4$ МА. Поскольку максимальное проектное значение тока составляет 750 кА (см. таблицу), то ток плазмы будет ограничиваться этим значением, что соответствует $q \approx 2,1$ на границе для плазмы круглого сечения, $q \approx 2,5$ на границе для $k = 1,25$ и $q \approx 4$ для $k = 1,7$.

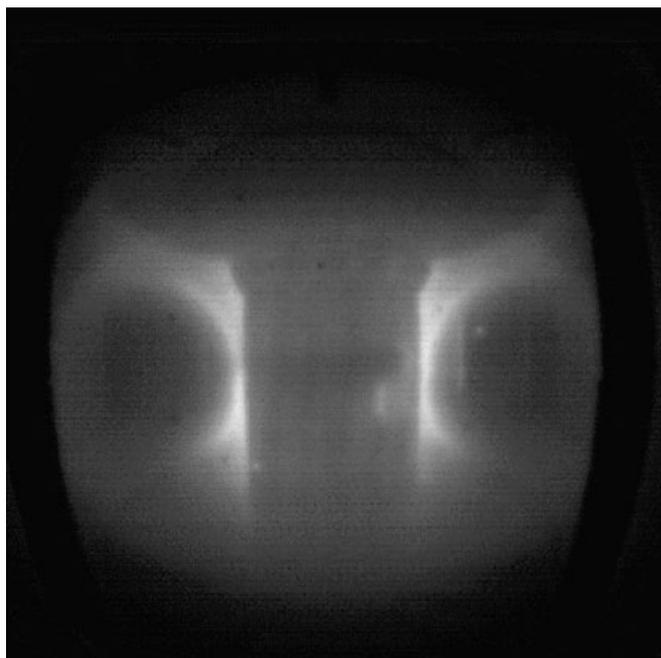


Рис. 1. Свечение плазмы в импульсе 4442, $t = 269,7$ мс

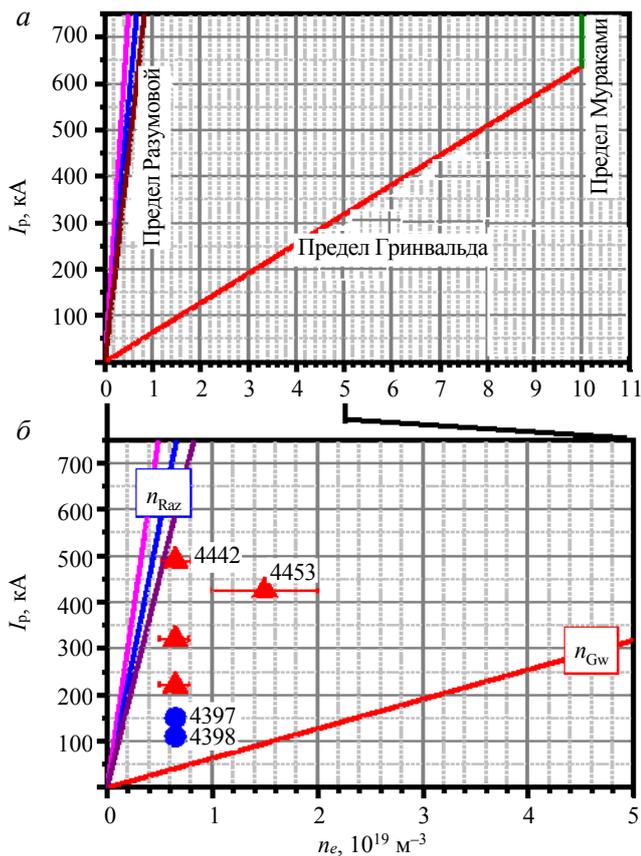


Рис. 2. Расчётная область операционных параметров токамака КТМ при $B_T = 0,9$ Тл и разных значениях вытянутости плазмы: $k = 1,0$ (—), $k = 1,25$ (—), $k = 1,7$ (—) (а), и опорные импульсы: ● — данные из летней экспериментальной кампании 2021 г.; ▲ — осенняя кампания 2021 г. (номера опорных импульсов подписаны в поле рисунка) (б)

близило рабочие точки КТМ к границе по убегающим электронам (к пределу Разумовой). Имеющиеся данные не дают оснований ожидать существенной доли тока пучка в измеренном значении тока плазмы: свечение плазмы, регистрируемое видеокамерами (пример показан на рис. 1), показывает, что плазменный шнур занимает широкую область и нет светящихся образований на внешнем обводе тора, которые могли бы свидетельствовать о выходе пучка убегающих электронов. Тем не менее для дальнейших экспериментов одной из приоритетных задач следует рассматривать увеличение плотности плазмы в разряде.

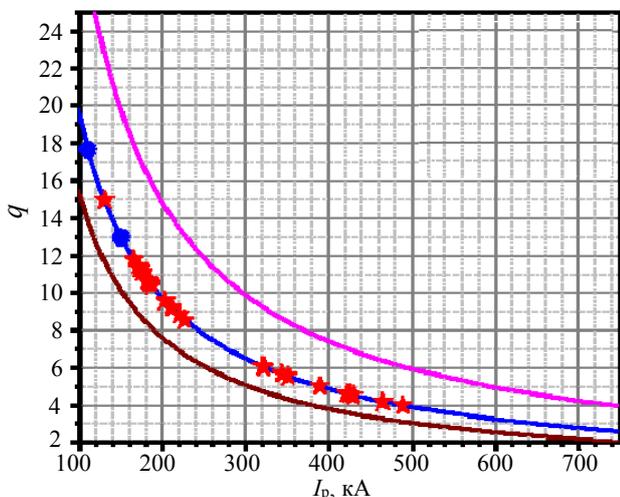


Рис. 3. Соответствие между значением фактора запаса устойчивости на границе и значением тока плазмы при разных значениях вытянутости плазменного шнура для рабочей области токамака КТМ, показанной на рис. 2: $k = 1,0$ (—), $k = 1,25$ (—), $k = 1,7$ (—)

На рис. 2, а показаны границы рабочей области установки КТМ при $B_T = 0,9$ Тл для трёх значений вытянутости плазмы: $k = 1, 1,25$ и $1,7$. Вплоть до значений плотности $n_e = 10 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, что соответствует току плазмы $I_p \approx 600$ кА, предельное значение плотности определяется пределом Гринвальда. Величина $n_e = 10 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ — предел Мураками ($n_M = B_T[T]/R[\text{M}]$) для $B_T = 0,9$ Тл — ограничивает плотность при $I_p > 600$ кА.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2, б на рабочую область установки точками нанесены результаты, полученные в осенней экспериментальной кампании 2021 г. Для более наглядного представления достигнутых экспериментальных параметров плотность на графике ограничена значением $n_e = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Для представления отобраны разряды с наибольшими достигнутыми значениями тока и плотности. Для сравнения приведены импульсы из летней кампании 2021 г. Увеличение тока плазмы от 150 кА (в летней кампании) до ~ 490 кА (в осенней кампании) соответствует уменьшению граничного значения фактора запаса устойчивости от $q \sim 13$ до $q \sim 4$ при расчёте на естественную вытянутость плазмы (рис. 3). Осциллограммы тока плазмы в опорных разрядах показаны на рис. 4.

На рис. 2, б видно, что увеличение тока приблизило рабочие точки КТМ к границе по убегающим электронам (к пределу Разумовой). Имеющиеся данные не дают оснований ожидать существенной доли тока пучка в измеренном значении тока плазмы: свечение плазмы, регистрируемое видеокамерами (пример показан на рис. 1), показывает, что плазменный шнур занимает широкую область и нет светящихся образований на внешнем обводе тора, которые могли бы свидетельствовать о выходе пучка убегающих электронов. Тем не менее для дальнейших экспериментов одной из приоритетных задач следует рассматривать увеличение плотности плазмы в разряде.

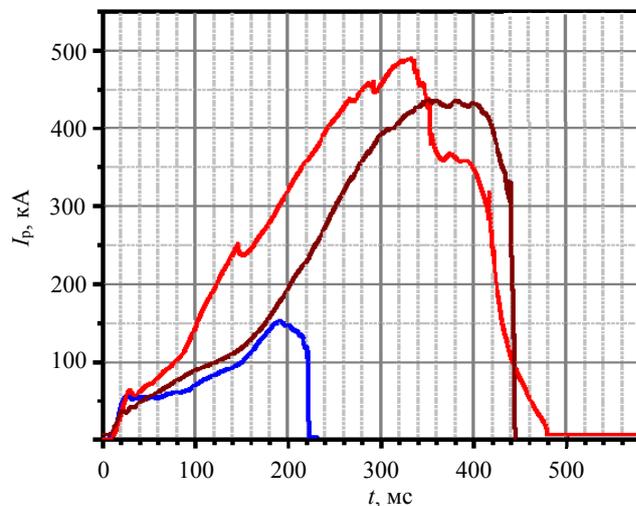


Рис. 4. Осциллограммы тока плазмы в опорных импульсах летней (№ 4397 (—)) и осенней (№ 4442 (—), № 4453 (—)) кампаний 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье приведены оценки диапазона допустимых значений плотности и тока плазмы в токамаке КТМ для проектных параметров установки. Проведено сопоставление границ рабочей области с результатами, полученными в ходе экспериментов 2021 г. Достигнутые значения разрядного тока 350 кА и выше соответствуют продвижению в область граничных значений фактора запаса устойчивости $q \sim 4-6$, что при удлинении импульса и получении выраженного плато тока позволит проводить широкий набор экспериментов в соответствии с программой, изложенной в [1], и сопоставление данных КТМ с результатами других установок. Показано, что в режимах с низкой вытянутостью плазмы ($k = 1-1,25$) экспериментальные значения плотности приближаются к пределу по убегающим электронам. Это обуславливает необходимость увеличения плотности плазмы в плазменных разрядах следующих экспериментальных кампаний. Импульс 4453 ($q \approx 4,4$) может стать опорным режимом для продвижения в область более высоких плотностей и больших длительностей импульса.

Авторы благодарят команду токамака КТМ (Институт атомной энергии НЯЦ Республики Казахстан) за подготовку и проведение экспериментов, а также сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» за участие в совместных экспериментах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2021-952) и Министерства энергетики Республики Казахстан по бюджетной программе на 2021—2023 гг. № BR09158585 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tazhibayeva I.L. et al. KTM Experimental complex project status. — Fusion Science and Technology, April 2005, vol. 47, p. 746—750.
2. Hofmann F. et al. — Plasma Phys. Control Fusion, 1994, vol. 36, B277.
3. Mirnov S.V. et al. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, 073044.
4. Menard J.E. et al. — Ibid., 2017, vol. 57, 102006.
5. Menard J.E. et al. — Ibid., 2012, vol. 52, 083015.
6. Harrison J.R. et al. — Ibid., 2019, vol. 59, 112011.
7. Cunningham G. — Fus. Eng. and Design, 2013, vol. 88, p. 3238.
8. Арцимович Л.А., Шафранов В.Д. — Письма в ЖЭТФ, 1972, т. 15, с. 72—76.
9. Глухих В.А., Беляков В.А., Минеев А.Б. Физико-технические основы управляемого термоядерного синтеза. Учебное пособие. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 347 с.
10. Кирнева Н.А. и др. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 1, с. 64—74.
11. Кирнева Н.А. и др. — Там же, вып. 3, с. 90—100.



Наталья Александровна Кирнева, начальник лаборатории, к.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; доцент кафедры «Физика плазмы»; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия
e-mail: Kineva_NA@nrcki.ru



Александр Михайлович Белов, с.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премии им. Л.А. Арцимовича РАН, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
e-mail: Belov_AM@nrcki.ru



Дмитрий Анатольевич Ольховик, начальник комплекса-главный инженер токамака КТМ; Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, Институт атомной энергии НЯЦ РК, 071100 Курчатова, ул. Бейбит атом 10, ВКО, Республика Казахстан
e-mail: Olkhovik@nnc.kz



Дмитрий Владимирович Рыжаков, с.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
e-mail: ryjakovdv@gmail.com



Дмитрий Сергеевич Сергеев, н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
e-mail: Liceist1511@yandex.ru



Михаил Леонидович Субботин, заместитель руководителя ККТЭиПТ, ветеран атомной энергетики и промышленности, награждён ведомственным знаком отличия ГК «Росатом» «Академик И.В. Курчатова» 2-й и 3-й степеней, Почётный работник науки и техники Российской Федерации; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
e-mail: Subbotin_ML@nrcki.ru



Ирина Лашкаровна Тажибаева, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор; Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, Алматы, ул. Л. Чайкиной 4, Республика Казахстан
e-mail: tazhibayeva@ntsc.kz



Петр Павлович Хвостенко, научный руководитель ККТЭиПТ, д. техн. н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, ветеран атомной энергетики и промышленности, награждён ведомственными знаками отличия ГК «Росатом»; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
e-mail: Khvostenko_PP@nrcki.ru



Бауржан Жамбулович Чектыбаев, начальник отдела термоядерных исследований, PhD; Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, 071100 Курчатова, ул. Бейбит атом 10, ВКО, Республика Казахстан
e-mail: chektybaev@nnc.kz

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2021 г.
После доработки 16 марта 2022 г.
Принята к публикации 25 марта 2022 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2, с. 50—54.