УДК 621.039.616

РАСЧЁТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРЯДОВ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ КТМ В ОСЕННЮЮ КАМПАНИЮ 2019 Г.

В.Н. Докука, Р.Р. Хайрутдинов

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В статье представлены некоторые результаты моделирования сценариев разрядов на установке КТМ во время осенней кампании 2019 г. Дана оценка параметров для обеспечения фазы пробоя плазмы в токамаке. Экспериментальные данные плазменных разрядов в КТМ подтверждаются результатами численных расчётов. Моделирование разряда 3669 проведено в режиме заданных токов в обмотках полоидального поля. Данные моделирования показывают, что величина тока плазмы в разряде превышает 100 кА. Дан ряд рекомендаций по возможности достижения более высоких параметров плазменного разряда.

Ключевые слова: токамак, сценарий, плазма, ток, равновесие, восстановление.

NUMERICAL RESEARCHES OF PLASMA DISCHARGES IN KTM TOKAMAK IN AUTUMN CAMPAIGN 2019

V.N. Dokuka, R.R. Khayrutdinov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The work presents some simulation results of discharge scenarios at the KTM during the 2019 autumn campaign. The parameters estimation is given for providing plasma breakdown phase of tokamak start-up. Obtained experimental data of plasma discharges in KTM are confirmed with its correspondent simulation results. The simulation of discharge 3669 is carried in mode with given currents in poloidal coils. Simulation data show that obtained plasma current exceeds 100 kA. Some recommendations are proposed for achievement of higher plasma discharge parameters.

Key words: tokamak, scenario, plasma, current, equilibrium, reconstruction.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-57-66

ВВЕДЕНИЕ

Цель осенней кампании 2019 г. на установке КТМ — получение омического режима с номинальными параметрами плазменного разряда: ток плазмы 60—100 кА, длительность разряда 100 мс при величине тороидального поля 0,5—1 Тл.

Сценарий включает две стадии:

— на первой (начальной) стадии — создание за определённое время условий для пробоя (заданное напряжение на обходе и низкий уровень рассеянных магнитных полей в выделенной области пробоя, имеющей круглую форму) и, начиная с некоторого тока, формирование замкнутых магнитных поверхностей;

— на второй стадии — подъём тока с заданной средней скоростью при соблюдении условия равновесия плазмы в соответствии с уравнением Грэда—Шафранова и устойчивости шнура.

Ограничения по напряжениям источников питания (ИП) и токам в обмотках полоидального поля электромагнитной системы (ЭМС) КТМ, связанные с предельными возможностями трансформаторов ИП, техническими ограничениями и предельными уровнями напряжений, приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены данные обмоток полоидального поля: положение обмоток, их размеры, количество витков, сопротивления и коэффициенты индуктивности. Система магнитной диагностики (СМД) включает два пояса Роговского, расположенных внутри и снаружи вакуумной камеры (ВК), 12 датчиков напряжения обхода (ДНО), 36 пар датчиков формы магнитной поверхности (ДФМП).

Т а б л и ц а 1. Ограничения по напряжениям ИП и токам в обмотках ЭМС КТМ

Источник питания	Предельный ток, кА	Предельное выпрямленное напряжение, В
ИП CS		±1500
ИП PF1	±15	±(400—500)
ИП PF2		
ИП PF3		
ИП PF6		
ИП PF4	±30	
ИП PF5		

Т а б л и ц а 2. Параметры обмоток полоидального поля

Обмотка	R , м	Z , м	ΔR , м	ΔZ , м	Количество витков	L , мГн	R , мОм
CS	0,225	0,12	0,09	2,2	423	11,4	30,5
PF1	0,575	1,295	0,19	0,08	40	2,6	8,89
PF2	1,23	1,25	0,08	0,04	8	0,37	3,8
PF3	1,65	0,855	0,095	0,165	40	11	25,8
PF6	1,65	-0,24	0,095	0,165	40	11,1	25,7
PF5	1,24	-1,1	0,1	0,08	16	1,4	7,61
PF4	0,585	-1,315	0,32	0,1	48	3,1	6,7

Согласно сценарию стадии пробоя должна начинаться с уровня тока в обмотке центрального соленоида, равного 15 кА. Реверсирование тока в обмотке центрального соленоида (CS) не допускается. Пробой организуется вблизи внутренней стенки вакуумной камеры. В рамках указанных требований в НИИЭФА разработан сценарий программных токов в обмотках полоидального поля для формирования нуля-поля и организации пробоя в установке КТМ. В качестве рабочего газа используется водород. В процессе развития сценария разряда должно быть обеспечено получение устойчивой в течение 20 мс конфигурации магнитного поля в месте пробоя с последующей инициацией плазменного разряда с лавинным пробоем и формирование начальной конфигурации плазмы с замкнутыми магнитными поверхностями и током плазмы ~ 15 —20 кА. На момент пробоя токовый сценарий должен обеспечить величину полоидального потока $\sim 0,6$ Вб в зоне пробоя. При этом ток в обмотках тороидального поля ~ 50 кА, величина тороидального поля равна 0,86 Тл на радиусе $R_0 = 0,9$ м.

На второй стадии развития разряда требуется обеспечить ввод плазменного тока с уровня ~ 10 кА до примерно 60—100 кА при соблюдении условия равновесия плазмы в соответствии с формулой Шафранова для вертикального поля. При этом в расчёте сценария ввода плазменного тока до заданного уровня необходимо учесть данные токов в полоидальных обмотках, полученные в расчётах первой стадии разряда.

Особенностью установки КТМ является расположенное внутри вакуумной камеры подвижное диверторное устройство, внутренние и внешние кольца которого вместе с верхним диверторным столом электрически замкнуты в тороидальном направлении. При разработке и расчёте второй стадии сценария разряда был использован полуторамерный эволюционный код ДИНА [1]. Код рассчитывает двумерное равновесие плазмы в соответствии с уравнением Грэда—Шафранова в каждый момент времени и решает самосогласованно систему одномерных, усреднённых по магнитным поверхностям уравнений переноса: электронной и ионной энергии, плотности плазмы, а также полоидального магнитного потока.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ РАЗРЯДА

На основе разработанного сценария проведено численное моделирование начальной стадии развития разряда. На рис. 1 показано, что токовый сценарий для первой стадии разряда обеспечивает форми-

рование устойчивой в течение ~ 10 мс области нуля-поля внутри вакуумной камеры. Размер области ~ 20 см при величине магнитных полей рассеяния $\sim 10\text{--}20$ Гс. Эффективная длина магнитных силовых линий $L_{\text{эф}}$ согласно проведённому расчёту составляет ~ 270 м. Напряжение по тороидальному обходу составляет ~ 7 В, средняя напряжённость электрического поля по тороидальному обходу E оказывается $\sim 1,2$ В/м. При начальном давлении нейтрального газа $6 \cdot 10^{-5}$ торр согласно работе [2] длительность пробоя займёт примерно 5 мс, и по оценке снизу требуемый для создания замкнутых магнитных поверхностей ток плазмы составит $\sim 10\text{--}15$ кА.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА СЦЕНАРИЯ ВВОДА ТОКА В КТМ

При проведении расчётов токового сценария для второй стадии разряда (ввода тока плазмы до момента полного расходования запаса полоидального потока индуктора) принято решение об использовании уже отработанных токовых сценариев с целью увеличения продолжительности разряда и повышения максимальной величины тока плазмы. По разнице токов во внутреннем поясе Роговского в экспериментальных разрядах 3575 (с плазмой) и 3576 (пустой) был сделан вывод, что в разряде 3575 достигнута величина тока плазмы ~ 20 кА при длительности разряда ~ 40 мс. На основе экспериментальных данных токов в обмотках, полученных в процессе разряда 3575, был выполнен расчёт «улучшенного» сценария разряда с заданием сценариев для средней плотности и положения плазмы. Программа токов в обмотках соответствовала данным эксперимента и корректировалась с учётом заданного сценария для положения магнитной оси плазменного шнура.

На рис. 2 показана динамика тока плазмы I_p , большого R_p и малого a радиусов плазмы и средней плотности электронов n_e в процессе развития разряда. Ток плазмы превышает 60 кА. Полученные данные эво-

Рис. 2. Динамика тока плазмы I_p (а), большого R_p (б) и малого a (в) радиусов плазмы и средней плотности электронов n_e (г) в процессе развития разряда

люции электронной T_e и ионной T_i температуры плазмы, энергетического времени жизни τ_E , вертикальной вытянутости шнура к показаны на рис. 3. На рис. 4, а показаны баланс мощности по электронному каналу омического нагрева плазмы P_{Ohm} , потери на перенос тепла P_{tr} , мощность обмена энергии между электронами и ионами P_{e-i} , мощность потерь на ионизацию и излучение $P_{\text{ion} + \text{rad}}$, включая примеси. На рис. 4, б показан баланс мощности по ионному каналу: мощность обмена энергии между электронами и ионами P_{e-i} , потери на перенос тепла P_{tr} и мощность потерь на перезарядку P_{cx} . Расчёты потерь на ионизацию, перезарядку и излучение примесей приведены в соответствии с данными работы [3].

Рис. 3. Электронная T_e (а), ионная T_i (б) температура плазмы, энергетическое время жизни τ_E (в), вертикальная вытянутость шнура κ (г)

Рис. 4. Мощность омического нагрева плазмы P_{Ohm} , мощности потерь на перенос тепла по электронному каналу P_{tr} , на обмен энергии между электронами и ионами P_{e-i} , на ионизацию и излучение $P_{\text{ion} + \text{rad}}$: — Ohm, — tr, - - - $e-i$, — $\text{ion} + \text{rad}$ (а); мощность обмена энергии между электронами и ионами P_{e-i} , потерь на перенос тепла по ионному каналу P_{tr} и потерь на перезарядку P_{cx} : - - - $e-i$, — tr, — cx (б)

Конфигурация плазмы на момент достижения максимального тока плазмы I_p показана на рис. 5.

На основе сценария токов, полученных при расчёте, был проведён разряд 3627. На рис. 6, 7 показаны сценарные и экспериментальные токи в обмотках индуктора CS и управления PF1—PF6 и расчётный ток в ВК. Наблюдается хорошее совпадение сценарных и экспериментальных токов в индукторе и обмотках управления PF1, PF2 и PF4. Отличия токов наблюдаются в наружных обмотках PF3 и PF6 и обмотке PF5. Отмечены относительно большие отклонения токов в этих обмотках, что, возможно, связано с управлением тиристорами при малых токах.

Динамика токов в плазме, диверторном устройстве и тока в вакуумной камере в процессе развития разряда, рассчитанные по

Рис. 5. Конфигурация плазмы на момент максимальной величины тока плазмы $I_p = 61,2$ кА

Рис. 6. Сценарные и экспериментальные токи в обмотках индуктора CS (а) и управления PF1 (б), PF2 (в), PF3 (г) разряда 3627: — сценарий, --- 3627

Рис. 7. Сценарные и экспериментальные токи в обмотках управления PF4 (а), PF5 (б), PF6 (в), ток в ВК (г) разряда 3627: — сценарий, --- 3627

экспериментальным сигналам внутреннего и внешнего поясов Роговского показаны на рис. 8. Расчёты, проведённые восстановительным модулем кода ДИНА [4], показали, что в разряде 3627 ток плазмы достигал ~ 60 кА при длительности разряда ~ 40 мс. На рис. 9 показана реконструкция формы плазмы для

Рис. 8. Токи в плазме (о), диверторном устройстве (---) (а) и ток в вакуумной камере (б)

Рис. 9. Реконструкция формы плазменного шнура разряда 3627: а — $I_p = 62,5$ кА, $t = 2,005$ с; б — $I_p = 42,9$ кА, $t = 2,025$ с

разряда 3627 для двух моментов времени. Расчёты показывают, что на восстановление формы существенно влияют токи в элементах диверторного устройства, а в данных экспериментов отсутствует прямое измерение величины тока плазмы. Сравнение расчётных и экспериментальных данных показывает, что, несмотря на то, что ток плазмы достигает требуемой величины 60 кА, продолжительность самого плазменного разряда оказывается значительно меньше, составляя $\sim 25\text{--}30$ мс.

После проведения ряда технических мероприятий по улучшению состояния стенок вакуумной камеры удалось увеличить продолжительность разряда и поднять ток плазмы до 80—90 кА.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ФОРМЫ ПЛАЗМЫ РАЗРЯДА 3669

Рекордные значения тока плазмы были получены в разряде 3669. На рис. 10 показана динамика тока в плазме, диверторном устройстве и вакуумной камере, на рис. 11 — последовательность конфигурации плазменного шнура в процессе развития разряда. Можно отметить, что форма плазмы указывает на наличие неустойчивости шнура по горизонтали.

Рис. 10. Токи в плазме (○), диверторном устройстве (---) (а), в вакуумной камере (б)

Рис. 11. Восстановленная конфигурация плазмы в процессе развития разряда 3669: а — $I_p = 49,3$ кА, $t = 2,01$ с; б — $I_p = 68,4$ кА, $t = 2,02$ с; в — $I_p = 106,2$ кА, $t = 2,035$ с; г — $I_p = 64,5$ кА, $t = 2,05$ с

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРЯДА 3669

В режиме заданных токов в обмотках полоидального поля проведён расчёт развития сценария разряда 3669. Положение плазмы по вертикали фиксировано. Положение по горизонтали берётся из «восстановленных» данных разряда. На рис. 12 показана эволюция расчётного и экспериментального тока плазмы I_p , большого R_p и малого a радиусов плазмы и средней плотности электронов n_e . С целью снижения расчётного тока плазмы после 2,040 мс разряда была несколько увеличена средняя плотность основной плазмы до $1,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Предварительные оценки плотности в данном эксперименте дают примерно $(5-7)10^{18} \text{ м}^{-3}$. На рис. 13 показаны электронная T_e и ионная T_i температура плазмы, энергетическое вре-

Рис. 12. Динамика тока плазмы I_p (— расчёт, $\circ$ — эксперимент) (а), большого R_p (б) и малого радиусов (в) плазмы и средней плотности электронов (г)

Рис. 13. Электронная T_e (а), ионная T_i (б) температура плазмы, энергетическое время жизни τ_e (в), вертикальная вытянутость шнура κ (г)

мя жизни τ_E и вертикальная вытянутость шнура k , на рис. 14 — конфигурация плазмы в начале стадии ввода тока плазмы и на момент достижения максимальной величины тока плазмы. Величина вытянутости плазмы сохраняется ниже единицы, что указывает на неустойчивость шнура по горизонтали.

Рис. 14. Конфигурация плазмы в процессе развития разряда 3669: *a* — $I_p = 20,4$ кА, $t = 2,003$ с; *б* — $I_p = 104,7$ кА, $t = 2,038$ с

ВЫВОДЫ

В итоге проведения осенней сессии на установке КТМ в омическом режиме достигнуты величины тока плазмы ~ 60 — 100 кА с длительностью разряда более 60 мс при тороидальном поле 0,9 Тл. Для достижения более высоких параметров разряда на установке КТМ потребуется выполнить ряд мероприятий:

- провести калибровку ЭМС и ЭМД;
- обеспечить прямое измерение тока плазмы;
- разработать надёжные регуляторы токов в обмотках полоидального поля;
- разработать систему магнитного управления плазмой, для начала хотя бы на уровне управления положением плазмы по вертикали и горизонтали.

Необходимо улучшить процедуру работы с базой данных разрядов, согласовать с пользователями и создать удобный интерфейс для оперативного получения данных с сигналами ЭМД, обеспечить возможность удалённого доступа к базе данных разрядов.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2019-1456 от 2 октября 2019 г., уникальный идентификатор соглашения RFMEFI61319X0089 в рамках международной программы Атом-СНГ.

REFERENCES

1. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak. Fusion device with the Inverse-variable technique. — J. Comput. Physics, 1993, vol. 109, pp. 193—201.
2. **Belyakov V.A., Kavin A.A., Lepikhov S.A., Mineev A.B., Ovsyannikov A.D.** TOKAMAK: initial stage of discharge. Tutorial. — StPb. Pub.house «Lan' (Deer)», 2014 (in Russian).
3. **Zhogolev V.E.** Impurity Radiation from Peripheral Plasma: Preprint IAE-5494/1. — M, 1992.

4. **Lukash V.E., Khayrutdinov R.R.** DINA-FIT module (module of programs library «Virtual tokamak»). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2011, issue 3, p. 93 (in Russian).

AUTHORS

Dokuka V.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; v.dokuka@mail.ru

Khayrutdinov R.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; khayrutd@mail.ru

Received 17 March 2020

Revised 24 March 2020

Accepted 15 May 2020

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2020, vol. 43, issue 2, pp. 57—66