УДК 533.9

ОСОБЕННОСТИ СРЫВА ТОКА В ТОКАМАКЕ Т-10 ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЕ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ НА ГРАНИЦЕ ПЛАЗМЫ

Д.В. Рыжаков, Ю.Д. Павлов, А.М. Какурин, С.Г. Мальцев, С.В. Ахтырский

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

На токамаке Т-10 было обнаружено, что при срывах разряда по предельной плотности наблюдается зависимость длительности спада тока плазмы от величины запаса устойчивости на границе плазмы q_a . Так, если q_a до начала срыва имеет целое или полуцелое значение, то длительность спада тока плазмы составляет величину ~ 100 — 115 мс, тогда как при нецелых значениях q_a длительность спада тока не превышает 15 мс. Медленный спад тока плазмы характеризуется большим количеством вспышек МГД-активности, которые, по-видимому, предотвращают развитие пучков ускоренных электронов. В работе приводится экспериментальное описание наблюдаемого явления.

Ключевые слова: токамак, плазма, срыв, ускоренные электроны.

PECULIAR PROPERTIES OF DISRUPTIONS ON THE T-10 TOKAMAK AT DIFFERENT EDGE SAFETY FACTOR VALUES

D.V. Ryzhakov, Yu.D. Pavlov, A.M. Kakurin, S.G. Malzev, S.V. Akhtyrskiy

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The dependence of the current quench duration on the edge safety factor value q_a is observed in the T-10 tokamak discharges with the density limit disruption. So if q_a has an integer or half-integer value before the start of a disruption, then the duration of the plasma current decay is ~ 100 — 115 ms, while for non-integer values of q_a the duration of the current decay does not exceed 15 ms. A disruption with slow current quench is characterized by a large number of bursting MHD activity, which it seems prevent runaway electrons beam. The paper gives an experimental description of the observed phenomenon.

Key words: tokamak, plasmas, disruption, runaway electron.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-4-68-73

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач исследований глобального срыва плазмы является поиск способа предотвращения развития пучка ускоренных электронов, образующихся после срыва тока плазмы. Интерес к этой задаче вызван тем, что если пучок перехватывает значительную часть тока плазмы [1—3], то это уже становится весьма серьезной опасностью для элементов конструкции вакуумной камеры токамака. Одним из возможных способов решения данной задачи является создание сильных МГД-возмущений во время спада тока плазмы [4].

Во время проведения на токамаке Т-10 экспериментов по изучению глобальных срывов, возникающих в результате достижения предельной плотности плазмы, была обнаружена особенность развития срывов, а именно если обычно длительность спада тока плазмы t_{95} 100% до 5% от значения тока плазмы до срыва составляет ~ 7 — 15 мс, то в случаях, когда величина запаса устойчивости на границе плазмы

$$q_a = \frac{5a^2 B_T}{I_p R} \quad (a \text{ — малый радиус, м; } R \text{ — большой радиус, м; } B_T \text{ — тороидальное магнитное поле, Тл; } I_p \text{ — ток плазмы, МА)}$$

находится в области целых или полуцелых значений, время спада тока t_{95} резко возрастает, достигая 100 — 115 мс.

ЭКСПЕРИМЕНТ С ИЗМЕНЕНИЕМ q_a

Токамак Т-10 — лимитерный токамак круглого сечения, большой радиус $1,5$ м, малый радиус $0,3$ м, тороидальное магнитное поле в рассматриваемых экспериментах $B_T \leq 2,5$ Тл. Для изучения особенности развития срыва на токамаке Т-10 были проведены эксперименты по изучению зависимости длительности спада тока плазмы t_{95} во время глобальных срывов (при достижении предельной плотности плазмы) от величины q_a . Для того чтобы система обратной связи по поддержанию заданного значения тока плазмы не вносила искажения в процесс развития срыва (спада тока плазмы) сразу после момента глобаль-

ного срыва, происходило зануление задаваемого программой обратной связи значения тока. Момент времени, когда происходит срыв тока плазмы, определялся по сигналу напряжения обхода, на котором в момент срыва появляется пик напряжения. Тороидальное магнитное поле и поля управления, обеспечивающие равновесие плазмы, в этот момент времени не отключаются. Типичные осциллограммы разряда представлены на рис. 1. На рис. 1, б, в сплошными красными линиями отложены программы тока плазмы и средней плотности плазмы соответственно, вертикальной пунктирной линией отмечен момент срыва тока плазмы. На рис. 2 показаны осциллограммы нескольких разрядов с разными величинами тока плазмы, т.е. с разными значениями q_a , но при одном и том же значении тороидального поля.

Рис. 1. Типичные осциллограммы разряда: а — напряжение обхода; б — ток плазмы; в — средняя плотность плазмы, измеренная по центральной хорде интерферометра; — — — — — сценарии поведения тока и плотности плазмы, задаваемые программой обратной связи

Рис. 2. Спад тока плазмы при срыве в разрядах с $q_a \sim 3,6$ (—), $\sim 3,5$ (—), $\sim 3,3$ (—)

В проведённой серии разрядов наблюдается резонансная зависимость от q_a длительности спада тока плазмы t_{95} после глобального срыва (рис. 3). Ширина области значений q_a , в которой наблюдается медленный спад тока плазмы, составляет $\leq 10\%$ от величины q_a . Связь увеличенного времени спада тока плазмы именно с целыми (или полужелыми) значениями q_a , а не с значением тороидального поля или тока плазмы, также достаточно хорошо видна в экспериментах при фиксированном значении q_a (рис. 4). На рис. 4 показаны осциллограммы тока плазмы для двух разрядов с разными значениями тока плазмы I_p и тороидального поля B_T , но одинаковым значением $q_a \sim 4$. Видно, что, несмотря на существенное изменение величин как тока плазмы, так и тороидального поля, при сохранении величины q_a характер спада тока плазмы сохраняется. На этом рисунке за начало отсчёта по оси времени взят момент начала срыва тока плазмы.

Рис. 3. Зависимость времени спада тока плазмы t_{95} от величины q_a

Рис. 4. Срыв тока плазмы при $q_a \sim 4$ для разных значений тока плазмы и тороидального поля: 1 — $B_z = 2,4$ Тл, $I_p = 177$ кА; 2 — $B_z = 2,1$ Тл, $I_p = 155$ кА

Необходимо отметить, что во всех экспериментах (как в случаях с быстрым спадом тока плазмы, так и в случаях с медленным спадом) внешний источник питания вихревой обмотки программным образом отключался в момент начала спада тока плазмы, тороидальное же поле B_T и поля управления, обеспечи-

Рис. 5. Поведение МГД-активности I_{mhd} (а), напряжения обхода U_0 (б) и тока плазмы I_p (в) в разряде с медленным спадом тока, z — пики на токе плазмы в увеличенном масштабе

Рис. 6. Интенсивность жёсткого рентгеновского излучения и ток плазмы при быстром (а) и медленном (б) спаде тока

новского излучения в конце спада тока плазмы (рис. 6, а), что свидетельствует об образовании пучка ускоренных электронов. На рис. 7 показаны осциллограммы напряжения обхода во время быстрого и медленного спада тока плазмы. При этом во время медленного спада тока возникают всплески МГД-активности преимущественно моды $m = 2$ при любом целом или полуцелом значении q_a (рис. 8). На рис. 8 показано типичное мгновенное пространственное распределение возмущения полоидального магнитного поля, измеренное с помощью 22 магнитных зондов, расположенных по периметру полоидального сечения, во время медленного спада тока.

Рис. 7. Напряжение обхода U_0 для разрядов с быстрым и медленным спадом тока плазмы: — — № 71 045, $t_{95} = 14$ мс; — — № 71 046, $t_{95} = 90$ мс

вающие равновесие плазмы, не отключались. Таким образом внешний источник питания вихревой обмотки не вносил искажения как в длительность спада тока плазмы, так и в величину напряжения обхода U_0 после глобального срыва. На рис. 5 показаны осциллограмма амплитуды МГД-активности с полоидальным волновым числом $m = 2I_{\text{mhd}}$ (см. рис. 5, а), напряжения обхода U_0 (см. рис. 5, б) и осциллограмма тока плазмы I_p (см. рис. 5, в). Отрицательные пики на напряжении обхода U_0 и пики на токе плазмы I_p (см. рис. 5, в), хорошо коррелируют со всплесками МГД-активности I_{mhd} (см. рис. 5, а). Эти пики, по-видимому, свидетельствуют о возникновении срывов во время спада тока плазмы.

Отличительной особенностью медленного спада тока является наличие большого количества всплесков МГД-активности на сигнале I_{mhd} , что свидетельствует об изменении профилей плазмы, в результате чего пучок ускоренных электронов, по-видимому, не успевает набрать большую энергию. Об отсутствии пучков ускоренных электронов, образующихся непосредственно во время медленного спада тока плазмы, можно судить по сигналу интенсивности жёсткого рентгеновского излучения (рис. 6, б), тогда как при быстром спаде тока плазмы наблюдаются всплески рентгеновского излучения в конце спада тока плазмы (рис. 6, а), что свидетельствует об образовании пучка ускоренных электронов.

Рис. 8. Мгновенное пространственное распределение возмущения полоидального магнитного поля во время медленного спада тока

На рис. 9 показаны осциллограммы поведения интенсивности электронно-циклотронного излучения в разрядах с медленным (рис. 9, а) и быстрым (рис. 9, б) спадами тока плазмы. Из сравнения поведения электронно-циклотронного излучения при медленном спаде тока плазмы на симметричных радиусах плазменного шнура следует, что шнур смещается внутрь с одновременным уменьшением своего радиуса. При быстром спаде тока этого не происходит.

Изменение профиля хордовых излучений, измеренных датчиками AXUV (датчики, регистрирующие рентгеновское и ультрафиолетовое излучение в диапазоне энергии $1\text{--}10^4$ эВ), во время медленного спада тока плазмы также свидетельствует как о смещении внутрь плазменного шнура, так и о постепенном уменьшении его радиуса. При этом уменьшение радиуса плазменного шнура во время медленного спада тока плазмы претерпевает многократные изменения: плазменный шнур во время своего движения внутрь камеры к кольцевой диафрагме многократно как расширяется, так и сужается (рис. 10). На рис. 10 показаны неаббелиризованные профили излучения, регистрируемого датчиками AXUV, для разных моментов спада тока плазмы.

Смещение шнура внутрь и уменьшение его радиуса с многократными вариациями как расширения, так и сужения также хорошо регистрируется диагностикой «эндоскоп» [5] (рис. 11).

Рис. 9. Поведение интенсивности электронно-циклотронного излучения в разрядах с разным спадом тока плазмы: а — медленный спад: — $r = 17,3$ см, --- $r = 15,4$ см; б — быстрый спад: — $r = 17,3$ см, --- $r = 15,5$ см

Рис. 10. Изменение профиля хордовых излучений, измеренных датчиками AXUV, во время медленного спада тока плазмы

Рис. 11. Фотографии с эндоскопа в разные моменты срыва тока плазмы, № 60 946

Эндоскопическая оптическая система («эндоскоп»), установленная на токамаке Т-10, использует высокоскоростную видеокамеру для регистрации изображения в видимой области спектра.

Рис. 12. Поведение тока плазмы I_p (—), интенсивности МГД-активности I_{mhd} (—) и суммарного свечения I_{light} (—), измеренного эндоскопом, в разряде с медленным спадом тока

Расположение оптической системы «эндоскопа» обеспечивает возможность тангенциального наблюдения сечения вакуумной камеры токамака, в которой расположены кольцевая и подвижная диафрагмы. В приведённых на рис. 11 фотографиях главная ось токамака расположена слева. Во время всплеск МГД-активности происходит взаимодействие плазмы с кольцевой диафрагмой, что проявляется в виде всплеск света на изображениях с «эндоскопа». На рис. 12 показаны осциллограммы тока плазмы I_p , суммарного свечения плазмы I_{light} , регистрируемого диагностикой «эндоскоп», и амплитуда МГД-активности I_{mhd} . На этом рисунке видно, что всплески интенсивности свечения на диагностике «эндоскоп» достаточно хорошо коррелируют со всплесками МГД-активности и пиками на токе плазмы.

ВЫВОДЫ

В экспериментах на токамаке Т-10 по изучению глобальных срывов по предельной плотности плазмы наблюдалась зависимость длительности спада тока от величины запаса устойчивости q_a на границе плазменного шнура в момент перед началом срыва.

Вблизи целых и полужелых значений q_a ($\Delta q_a \sim 10\%$ от q_a) длительность спада тока t_{95} резко возрастает. Ширина областей Δq_a значений q_a , в которых наблюдается увеличение длительности спада тока плазмы, составляет $\leq 10\%$ от q_a .

Резкое увеличение длительности спада тока наблюдалось во всех случаях использования в токамаке Т-10 различных типов диафрагм, как графитовых, так и полностью металлических.

Медленный спад тока характеризуется большим количеством всплеск МГД-активности и, как результат, отсутствием пучка ускоренных электронов.

Авторы выражают благодарность коллективу Т-10 за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» (контракт № Н.4х.241.9Б.17.1011).

REFERENCES

1. **ITER** Physics Basis. — Nuclear Fusion, 1999, vol. 39, pp. 2321—2373.
2. **Stefanovskiy A.M., Igon'kina G.B.** Conditions of runaway electrons generation at discharge disruption in tokamak. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1995, vol. 21, p. 17 (in Russian).
3. **Stefanovskiy A.M., Igon'kina G.B.** Effect of dynamic plasma cooling and relativistic amplification on the current magnitude of runaway electrons at discharge disruption in tokamak. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1996, vol. 22, p. 18 (in Russian).
4. **Dremin M.M., Kapralov V.G., Kislov A.Ya. et al.** Effect of noble gas injection on discharge disruption in T-10 tokamak. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2012, issue 4, pp. 58—70 (in Russian).

5. **Kuleshin E.O., Vershkov V.A., Vukolov D.K., Medvedev A.A.** Upgrade of the endoscopic optical system installed on the T-10 tokamak. The first experimental results. — In: 39th EPS Conf. & 16th Intern. Congress on Plasma Physics. Stockholm, Sweden, 2012, P4.076; <http://ocs.ciemat.es/EPSICPP2012PAP/pdf/P4.076.pdf>.

AUTHORS

Ryzhakov D.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Ryzhakov_DV@nrcki.ru

Pavlov Yu.D. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Kakurin A.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kakurin_AM@nrcki.ru

Malzev S.G. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Akhtyrskiy S.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 3 October 2017
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol.40, issue 4, pp. 68—73.