УДК 621.039.6

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ В ТОКАМАКЕ T-15MD

В.М. Леонов

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Выполнено исследование условий получения квазистационарных режимов в токамаке T-15MD. Приведены результаты моделирования и оптимизации сценариев разрядов T-15MD с полностью неиндуктивным поддержанием тока с использованием систем генерации тока с помощью нейтральной инжекции мощностью 6—8 МВт, ЭЦР-волн мощностью ~8 МВт и ВЧ-волн мощностью до 7—8 МВт. Показано, что при несколько уменьшенной по сравнению с базовой величиной тороидального магнитного поля $B_t \sim 1,5$ Тл в токамаке T-15MD можно получать разряды с полностью неиндуктивным током ~1 МА, температурой плазмы несколько кэВ, плотностью плазмы $(3—7)10^{19} \text{ м}^{-3}$ и длительностью ~20 с. Такие разряды представляют интерес для дальнейшего экспериментального изучения.

Ключевые слова: плазма, токамак, неиндукционное поддержание тока.

STUDY OF CONDITIONS FOR OBTAINING QUASI-STATIONARY REGIMES IN T-15 MD TOKAMAK

V.M. Leonov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The study of conditions for obtaining quasi-stationary scenarios in T-15MD tokamak has been performed. Results of simulation and optimization of T-15MD scenarios with a fully non-inductive current drive using NBICD systems with the power of 6—8 MW, ECCD system with the power ~8 MW and RFCD system with power up to 7—8 MW are presented. It is shown that at the somewhat reduced as compared to the basic value of the toroidal magnetic field $B_t \sim 1.5$ T in the T-15MD tokamak, discharges can be produced with a fully non-inductive current of about 1 MA, plasma temperature of ~some keV, plasma density of $\sim(3—7)10^{19} \text{ m}^{-3}$ and discharge duration of about 20 s. Such discharges are of interest for further experimental study.

Key words: plasma, tokamak, fully non-inductive current drive.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-3-73-79

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач токамака T-15MD является исследование условий получения стационарных режимов токамака. Поскольку длительность импульса тороидального магнитного поля в базовом сценарии составляет 10 с [1, 2] и полностью стационарные разряды получить будет нельзя, возникает вопрос, что можно называть квазистационарными разрядами и какие процессы можно будет изучать на этой установке.

Можно выделить несколько характерных времен процессов в токамаке. Время, характерное для неустойчивостей плазменного шнура, в частности, для неустойчивости срыва и неустойчивости смещения шнура в вертикальном направлении, — от десятков мкс до десятков мс. Время, характерное для процессов переноса, — десятки—сотни мс. Скиновое время, характеризующее процессы установления и перестройки профилей тока, — несколько секунд. Время, характеризующее установление равновесия при взаимодействии плазмы с материалами стенки и дивертора и изменения характеристик материалов под действием потоков плазмы, — сутки и более, т.е. видно, что на этой установке можно в импульсах длительностью несколько десятков секунд изучать практически все процессы, кроме процессов установления равновесия между плазмой и окружающими материалами. Последние процессы можно будет исследовать на ограниченном отрезке времени несколько десятков секунд и в серии импульсов. Для увеличения длительности разряда до 20—30 с по сравнению с базовым сценарием (10 с) без перегрева катушек магнитного поля необходимо снизить величину тороидального поля на оси плазмы с 2 Тл в базовом режиме до 1—1,5 Тл. Одним из важных вопросов для исследования будет вопрос об установлении и управлении профилем тока масштаба 1 МА. Поэтому задачей данной работы является рассмотрение возможности получения разрядов токамака T-15MD с током масштаба 1 МА с полностью неиндуктивным поддержанием тока. Такие разряды далее будем называть квазистационарными, поскольку не все условия полностью стационарного разряда выполнены. Основные параметры токамака T-15MD:

Тороидальное поле на оси плазмы B_t , Тл . . .	2
Ток плазмы I_p , МА . . .	2

Большой радиус тора R_0 , м . . .	1,48
Малый радиус плазмы a , м . . .	0,67
Аспектное отношение A . . .	2,2
Вытянутость сечения k_{95} . . .	1,7—1,9
Треугольность δ_{95} . . .	0,3—0,4
Мощность нагрева плазмы P_{AUX} , МВт . . .	15—20
Предельная плотность n_e , 10^{20} м^{-3} . . .	1,4
Запас магнитного потока в центральном соленоиде, Вб . . .	6

Целями расчётов являются демонстрация возможности получения в Т-15МД квазистационарных разрядов с током до 1 МА с использованием систем нагрева плазмы и поддержания неиндуктивного тока, которые предполагается использовать на этой установке, определение характерных параметров плазмы и их распределения по малому радиусу. Также необходимо определить возможность получения параметров, близких к предельным для дальнейшего исследования таких перспективных режимов.

УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ В Т-15МД

Поскольку эффективность генерации неиндуктивного тока возрастает с ростом температуры плазмы, для формирования квазистационарных сценариев при ограниченной величине мощности дополнительного нагрева необходимо использовать режимы с улучшенным удержанием плазмы — H -режимы и режимы с внутренним транспортным барьером. Мощность порога перехода в H -моду для Т-15МД равна $\sim 1\text{—}2$ МВт. Поэтому при уровне мощности дополнительного нагрева плазмы более 2 МВт удержание плазмы должно соответствовать режиму H -моды. Более значительное улучшение удержания можно получить, создавая в центральных областях шнура зону с малым либо с отрицательным магнитным широм. Как показывают эксперименты на больших токамаках ASDEX, DIII-D, JT-60, в режимах с отрицательным широм при плотности $(3\text{—}5)10^{19} \text{ м}^{-3}$ можно получить значение фактора улучшения удержания по сравнению с режимом H -моды (НН) в диапазоне 1,3—1,6. В дальнейших расчётах осуществляется такое формирование профиля тока, чтобы в центральных областях шнура образовывалась зона отрицательного шира. При этом используется умеренное значение этого фактора НН $\sim 1,4$.

В Т-15МД предполагается использовать несколько систем дополнительного нагрева и поддержания тока. В качестве основной системы будет использована нейтральная инжекция (НИ), которая может греть плазму и генерировать ток с хорошей эффективностью по всему сечению шнура. Кроме того, НИ может подпитывать центральные области шнура частицами и, вводя тороидальный момент, способствовать вращению шнура, что помогает стабилизировать некоторые неустойчивости плазмы. Предполагается использовать три инжектора быстрых атомов водорода с энергией основного компонента $\sim 50\text{—}80$ кэВ. На рис. 1

Рис. 1. Геометрия инжекции пучков быстрых атомов в токамаке Т-15МД, вид сверху

показана геометрия инжекции этих пучков.

Предполагается использование однонаправленной инжекции всех трёх пучков в направлении тока плазмы. Это позволит с максимальной эффективностью генерировать неиндуктивный ток, который будет замещать ток плазмы. Мощность быстрых атомов на каждый инжектор, состоящий из двух ионных источников, равна ~ 2 МВт, т.е. полная мощность трёх инжекторов равна ~ 6 МВт. Максимально возможная мощность инжекции в случае расположения дополнительного инжектора может быть доведена до ~ 8 МВт. Плотность компонентов инжектируемых пучков, соответствующих энергиям $E_0; E_0/2; E_0/3$, в расчётах задавалась в пропорции 0,7:0,2:0,1. Прицельный радиус инжекции R_p выбирался из условий, с одной стороны, максимальной близости к тангенциальному направлению к оси шнура (максимальная эффективность генерации тока), с другой стороны, чтобы обеспечить проход между катушками тороидального поля пучков не-

обходимой ширины (более перпендикулярное к оси направление). В результате было выбрано $R_p = 1,17$ м (см. рис. 1). Для уменьшения роли D—D-реакции при нагреве плазмы и наличия хвостов быстрых ионов в T-15MD предполагается проводить инъекцию пучков водородных атомов в водородную плазму.

Для оценки возможных параметров эксперимента были проведены предварительные расчёты зависимости характеристик захвата пучка от плотности плазмы для случая инъекции пучка атомов водорода с энергией основного компонента пучка 80 кэВ и мощностью 8 МВт в водородную плазму с током 2 МА. Результаты самосогласованных расчётов с учётом параметров пучков и плазмы показаны на рис. 2, 3. Одной из важных задач таких расчётов является определение оптимального диапазона плотности плазмы, при которой полезные эффекты инъекции максимальны и минимально прохождение пучка насквозь без ионизации, что уменьшает эффективность использования пучка, а также может представлять угрозу элементам конструкции стенки токамака на противоположной стороне тора. На рис. 2 видно, что инжектируемые пучки практически полностью усваиваются плазмой при плотности плазмы выше $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. При более низкой плотности увеличиваются как потери пучка при пролёте насквозь, так и потери захваченных ионов пучка при перезарядке с нейтралами, имеющимися в плазме до того, как они передадут свою энергию плазме. Величина генерируемого захваченным пучком неиндукционного тока быстро нарастает с уменьшением плотности плазмы и при плотности менее $2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ превышает 1 МА. Поэтому диапазон рабочей плотности, когда захват пучка уже хороший и ещё велика эффективность генерации пучкового тока, должен находиться в области $(3\text{—}5)10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Рис. 2. Захваченная мощность инжектируемых пучков и доля генерируемого неиндукционного тока как функция средней плотности плазмы: $\star$ — $P_{\text{NBI_trap}}$; $\circ$ — I_{NBI}/I_p

Рис. 3. Распределение мощности пучков нагрева вдоль малого радиуса при разной средней плотности плазмы $\langle n_e \rangle$. Значения плотности в единицах 10^{19} м^{-3} указаны около кривых

Распределение захваченной плазмой мощности пучков вдоль относительного малого радиуса плазменного шнура в зависимости от средней плотности плазмы показано на рис. 3. При умеренных значениях средней плотности плазмы инжектируемые пучки захватываются в центральных областях плазменного шнура, и только при плотности плазмы, приближающейся к 10^{20} м^{-3} , начинается сильный захват пучков на периферии шнура. Таким образом, с точки зрения радиального профиля захвата пучка оптимальной является область плотности $(3\text{—}10)10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Кроме НИ, для нагрева и генерации тока предполагается использовать ЭЦР-излучение. Для этого на установке имеются семь гиротронов с частотой $f = 112$ ГГц и полной мощностью 6—8 МВт. Поскольку зона поглощения ЭЦР-излучения достаточно узкая, это излучение трудно использовать для генерации тока во всём шнуре, но можно использовать для управления профилем тока. При номинальном тороидальном поле 2 Тл эти гиротроны можно использовать для генерации тока в центральных областях шнура. При уменьшенном магнитном поле $\sim 1,5$ Тл их можно использовать для генерации тока в области резонанса на половине малого радиуса ближе к центру тора, поскольку тороидальное поле нарастает к центру тора.

Кроме того, предполагается использовать несколько антенн для ввода ионно-циклотронного излучения, а также возможно использование геликонов и нижнегибридных волн. Далее эта группа волн будет называться высокочастотными волнами, их поглощение лежит в области $\sim 0,6\text{—}0,7$ малого радиуса шнура. При этом полный ток разряда состоит из бутстреп-тока I_{BS} , тока, генерируемого НИ, I_{NBI} , тока, генерируемого ЭЦР-излучением, $I_{\text{ЭЦР}}$ и ВЧ-волнами $I_{\text{ВЧ}}$. Рассчитывался также и омический ток, но параметры разряда и систем неиндуктивной генерации тока подбирались так, чтобы свести омический ток к нулю и получить разряд с полностью неиндуктивным поддержанием тока.

МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ПЛАЗМЫ

Моделирование эволюции параметров основной плазмы проводилось с помощью транспортного кода ASTRA [3]. Базовый набор уравнений кода ASTRA включает уравнение для плотности электронов n_e , электронной T_e и ионной T_i температур и полоидального потока Ψ_p . Двумерное равновесие плазменного шнура моделировалось в 3-моментном приближении с фиксированной границей.

При моделировании использовались следующие коэффициенты переноса плазмы:

$$\chi_e = D_e = D_A F_{sh} F_{H\text{-mode}} + \chi_i^{neo}; \quad (1)$$

$$\chi_i = 2D_A F_{sh} F_{H\text{-mode}} + \chi_i^{neo}, \quad (2)$$

где аномальный вклад имел параболическую зависимость от радиуса:

$$D_A = D_0(1 + 3\rho_N^2); \quad \rho_N = \rho/\rho_{\max}. \quad (3)$$

Нормировочный численный коэффициент D_0 подбирался так, чтобы выполнялось соответствие глобального времени удержания энергии в плазме скейлингам, полученным группой ИТЭР [4]: в омической фазе разряда — омическому скейлингу, в ходе L -фазы разряда — скейлингу L -моды и в H -фазе разряда — скейлингу H -моды IPB98(y, 2). В областях внешнего транспортного барьера H -моды и внутреннего транспортного барьера в области отрицательного магнитного шира коэффициенты переноса основной плазмы уменьшались до уровня коэффициента неоклассической ионной теплопроводности χ_i^{neo} [5], в области внешнего барьера с помощью коэффициента $F_{H\text{-mode}}$ и в области шнура с малым или отрицательным магнитным широм с помощью коэффициента F_{sh} . В уравнениях баланса энергии конвективные члены учитывались в виде $3/2GT$, где потоки частиц $\Gamma_{i,e}$ брались из уравнения баланса частиц. Необходимая временная динамика средней плотности плазмы воспроизводилась варьированием плотности нейтрального водорода на границе шнура, что моделировало подпитку шнура из газовых клапанов. Расчёт нагрева плазмы и поддержания тока с помощью инжекции пучков быстрых атомов с учётом реальной геометрии инжекции проводился с помощью кода [6]. Моделирование динамики зарядовых состояний и излучения примесей проводилось в корональном приближении. Для простоты предполагалось, что основной примесью является углерод в количестве $\sim 2\%$ от плотности электронов. Более детальный учёт поведения и влияния примесей на такие разряды требует специального рассмотрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ. СТАДИЯ ВВОДА ТОКА

Расчёты показывают, что при несколько уменьшенной по сравнению с базовой величиной тороидального магнитного поля $B_t \sim 1,5$ Тл в токамаке T-15МД можно получать разряды с током ~ 1 МА и длительностью ~ 20 с. При этом для ввода тока можно использовать центральный соленоид, который позволяет реализовать запас магнитного потока с переманчиванием до 6 В·с. Для того чтобы работать с минимальными токами в обмотках индуктора, желательно израсходовать на стадии ввода тока не более половины потока ~ 3 В·с. На рис. 4 показана зависимость некоторых параметров разряда от скорости нарастания тока: полного Ψ_{tot} и резистивного Ψ_{res} потоков (а), резистивной составляющей напряжения на обходе тора U_{res} (б), средней температуры плазмы $\langle T_e \rangle$ и в центре $T_e(0)$ (в) и внутренней индуктивности l_i (г) на стадии ввода индуктивного тока. Видно, что с увеличением скорости нарастания тока несколько уменьшается расход В·с. Это происходит, в основном, за счёт уменьшения расхода резистивного потока, так как резистивная составляющая напряжения на обходе остаётся практически неизменной. Поэтому можно немного уменьшить расход полоидального магнитного потока, увеличивая скорость роста тока и укорачивая длительность начальной стадии разряда. Однако слиш-

Рис. 4. Зависимость параметров плазмы от скорости роста плазменного тока

ком быстрое нарастание тока нежелательно, поскольку при этом наблюдается увеличение скинирования профиля тока (уменьшение внутренней индуктивности шнура), что усиливает опасность возникновения МГД-неустойчивости плазменного шнура (винтовых и двойных тиринг-мод). Поэтому видно, что скорость роста тока $\sim 1\text{--}2$ МА/с вполне приемлема для рассматриваемых сценариев. При этом расход полоидального потока как раз составляет ~ 3 В·с. Может быть рассмотрен сценарий введения тока неиндуктивными методами, и это может стать важным направлением экспериментов, но в данной серии расчётов используется предположение о чисто индуктивном подъёме тока с расходом полоидального потока.

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ НА КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА

Расчёты показывают, что для характерных параметров Т-15МД время перестройки либо установления профилей тока составляет $\sim 5\text{--}10$ с. Поэтому для проведения экспериментов по исследованию стационарных режимов необходимы разряды длительностью не менее 10 с. Вначале представляет интерес, какие параметры разрядов можно получить с использованием генерации тока только одной НИ. Поскольку эффективность генерации тока растёт с ростом температуры электронов, для её увеличения можно использовать ЭЦР-нагрев (без генерации тока) при перпендикулярном вводе ЭЦР-излучения.

На рис. 5 представлены результаты моделирования временной динамики параметров такого разряда длительностью ~ 20 с с полным замещением омического тока. Такая временная динамика развития разряда характерна и для других сценариев квазистационарных разрядов, которые рассматриваются в данной работе. По сравнению с базовым сценарием ток плазмы уменьшен до 1 МА и для увеличения эффективности генерации тока концентрация плазмы уменьшена до $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В этом сценарии из 13 МВт полной вкладываемой мощности 8 МВт тангенциальной НИ используются для нагрева и поддержания тока и 5 МВт ЭЦР-мощности — только для нагрева плазмы. Пробой и начало развития разряда с расширением плазменного шнура осуществлялись в данном сценарии от внешней стенки тора. Изменение геометрических параметров шнура и времени включения НИ и ЭЦР показаны на рис. 5, *г*, *д*, *е*.

Рис. 5. Сценарий квазистационарного режима в токамаке Т-15МД при полном замещении омического тока и низкой электронной плотности $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

Рис. 6. Распределение параметров плазмы по малому радиусу для квазистационарного разряда с низкой плотностью плазмы

Рис. 7. Профили параметров для разряда Т-15МД с полностью неиндуктивным поддержанием тока с высокой плотностью плазмы

Распределения некоторых параметров плазмы по нормализованному малому радиусу на 18-й с стационарной стадии разряда с низкой плотностью показаны на рис. 6.

Пик на кривой, показывающей мощность дополнительного нагрева на половине радиуса шнура, соответствует введённой для нагрева ЭЦР-мощности в области резонансного поля. Видно, что плотность полного тока уменьшается к центру шнура и существует достаточно широкая область с отрицательным магнитным широм. В таком разряде можно ожидать фактора улучшения удержания НН $\sim 1,4$. При этом величина запаса устойчивости q во всём сечении превышает значение 2, т.е. в таком разряде не следует ожидать развития МГД-неустойчивостей наиболее опасных низших мод $m/n = 1/1, 2/1, 2/2, 3/2, 4/2$.

Температура плазмы в центральных областях шнура равна 3—4 кэВ, величина нормализованного относительного давления плазмы β_N равна 2,7. Расчётное значение тока, генерируемого НИ, составляет $I_{\text{NBI}} = 0,62$ МА, бутстреп-тока $I_{\text{BS}} = 0,38$ МА. Поскольку величина q_{95} достаточно большая — $\sim 8,5$, то величину тороидального магнитного поля можно снизить ниже 1,5 Тл, уменьшить нагрев катушек и сделать длительность разряда больше — до 30 с. Либо можно увеличить ток разряда, подключая другие системы генерации тока и нагрева плазмы.

Если для генерации тока использовать не только НИ, но и предполагаемые на Т-15МД системы ЭЦР- и ВЧ-генерации тока, то можно получить и другие, более интересные сценарии разряда. Во-первых, можно получить режимы с более высоким током ($I_p > 1$ МА) при низкой плотности плазмы, во-вторых, получить квазистационарные режимы с током ~ 1 МА с более высокой плотностью основной плазмы. Временной сценарий таких разрядов в отношении порядка ввода дополнительной мощности, а также стадии ввода и вывода тока можно оставить неизменными.

На рис. 7 показаны радиальные профили основных параметров разряда с увеличенной плотностью плазмы $\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и током 1 МА на его квазистационарной стадии. В этом разряде для генерации тока использованы 6 МВт НИ, 5 МВт ЭЦР- и 7 МВт ВЧ-мощности. Полный ток состоит из бутстреп-тока $I_{\text{BS}} = 0,548$ МА, тока, генерируемого НИ, $I_{\text{NBI}} = 0,224$ МА, тока, создаваемого электронно-циклотронными волнами, $I_{\text{ЭЦР}} = 0,095$ МА и тока, генерируемого высокочастотным излуче-

нием, $I_{ВЧ} = 0,132$ МА. На рис. 7, б видны три пика на профиле полного тока J_{tot} и неомического тока J_{CD} . Центральный пик связан с током НИ, пик в средней области радиуса $\rho_N \sim 0,5$ определяется ЭЦР-волнами, пик на радиусе $\rho_N \sim 0,6—0,7$ — током ВЧ-волн. Плотность примеси углерода в этом разряде $n_C \sim 2\% n_e$, что даёт $Z_{эф} \sim 1,6$. Другие параметры равны $\beta_p = 1,41$, $\beta_N = 3,11$, при достаточно умеренном факторе улучшения удержания $HH = 1,44$.

Величина β_N в этом сценарии достаточно высокая, и требуются дополнительные исследования для того, чтобы убедиться в МГД-устойчивости шнура. Дальнейшее снижение тороидального магнитного поля для увеличения длительности разряда более 20 с нерационально, поскольку плазменный шнур может стать более неустойчивым. Шнур с такими параметрами может быть интересным для исследования МГД-неустойчивостей вблизи порога по β и методов их стабилизации.

ВЫВОДЫ

Выполнено исследование условий получения квазистационарных режимов в токамаке T-15МД. Приведены результаты расчётов и оптимизации сценариев разрядов T-15МД с полностью неиндуктивным поддержанием тока с использованием систем генерации тока с помощью нейтральной инжекции, ЭЦР- и ВЧ-излучения. Определены необходимые параметры плазмы и разряда для получения таких сценариев. Оптимальной для таких экспериментов является величина тороидального магнитного поля $B_T = 1,5$ Тл, поскольку при таком поле можно осуществить разряды длительностью до 20 с, что больше характерного времени перестройки профиля тока для параметров T-15МД. При использовании более высоких полей необходимо сокращать длительность разряда из-за возможного перегрева катушек тороидального поля. При меньшей величине магнитного поля величина β_N может превысить критическое значение для развития МГД-неустойчивостей. Рабочий диапазон плотности плазмы составляет $(3—7)10^{19} \text{ м}^{-3}$. При более низкой плотности захват плазмой нагретых пучков уменьшается, их значительная доля может проходить плазменный шнур насквозь и способствовать разрушению противоположной стенки разрядной камеры. При более высокой плотности плазмы пучки начинают захватываться на периферии шнура и плохо проходят в центральные области шнура. При высокой плотности плазмы также становится заметной рефракция пучков СВЧ-излучения.

Таким образом, выполненное исследование условий получения квазистационарных режимов продемонстрировало возможность осуществления сценариев с неиндуктивным током ~ 1 МА, длительностью ~ 20 с, температурой плазмы несколько кэВ и плотностью $(3—7)10^{19} \text{ м}^{-3}$, которые могут послужить основой для последующих экспериментов.

REFERENCES

1. **Azizov E.A. et al.** Status of project of engineering-physical tokamak. — In: 23rd IAEA Fusion Energy Conf. Daejeon, Republic of Korea, 11—16 October 2010, FTP/P6-01.
2. **Khvostenko P.P., Azizov E.A., Alfimov D.E. et al.** The magnet system of the tokamak T-15 upgrade. — Fusion Engineering and Design, 2015, vol. 98—99, p. 1090.
3. **Pereverzev G.V., Yushmanov P.N.** ASTRA — Automated System for Transport Analysis in a Tokamak: Preprint IPP 5/98. Garching, Germany, 2002.
4. **ITER Physics basic**, chapter 2. — Nucl. Fusion, 1999, vol. 39, p. 2175.
5. **Chang C.S., Hinton F.L.** — Phys. Fluids, 1986, vol. 29, p. 3314.
6. **Polevoi A., Shirai H., Takizuka T.** — JAERI Data/Code 97-014.

AUTHORS

Leonov V.M. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Leonov_VM@nrcki.ru

Received 7 June 2016
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 3, pp. 73—79.