УДК 533.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ С ТОРОИДАЛЬНЫМ ДИВЕРТОРОМ ПРИ ЭЦР-РАЗРЯДЕ

А.В. Березкин, Е.Ю. Брагин, В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин, С.В. Янченков

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований плазменных потоков, вытекающих из открытой ловушки с тороидальным дивертором. Холодная плазма создавалась при вводе микроволновой мощности в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Излучение по волноводу через вакуумноплотное керамическое окно вводилось поперёк оси установки. С помощью ленгмюровских зондов измерены пространственные распределения параметров плазмы. Максимальная плотность была ограничена критической плотностью n_c (~10¹² см⁻³) для используемой частоты генератора. Обнаружено, что температура и плотность плазмы в ловушке и вытекающих потоках практически не зависят от радиуса, когда зона ЭЦР находится в области удержания открытой ловушки, а плотность близка к n_c . При плотности $n < n_c$ наблюдаются кольцевые плазменные структуры вблизи сепаратрисы, которые разрушались под действием низкочастотной неустойчивости. Обсуждаются возможные механизмы появления структур и характера плазменных потоков.

Ключевые слова: открытые ловушки, ЭЦР, тороидальный дивертор, плазменные потоки.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PLASMA FLOWS FROM OPEN TRAP WITH THE TOROIDAL DIVERTOR UNDER ECR DISCHARGE

A.V. Berezkin, E.Yu. Bragin, V.A. Zhil'tsov, V.M. Kulygin, S.V. Yanchenkov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The results of the experimental studies of plasma flows escaping from the open trap with the toroidal divertor are presented. Cold plasma was produced introducing the microwave power in the presence of the electron cyclotron resonance (ECR). The radiation passed the waveguide through a ceramic vacuum-tight window being introduced across the axis of the device. By means of the Langmuir probes the spatial distribution of plasma parameters have been measured. The maximum density was limited by the critical density n_c (~10¹² cm⁻³) for the used generator frequency. It has been found that the temperature and density of trapped and escaping flows practically do not depend on the radius when the ECR zone is located near the open trap confinement region and density is closed to n_c . At a density of $n < n_c$ plasma ring structures are observed near the separatrix, which were disintegrating under the influence of the low-frequency shortwave instability. The possible mechanisms of the plasma structures occurrence and the plasma flows nature are discussed.

Key words: open trap, ECR, toroidal divertor, plasma flows.

введение

Создание потоков холодной плазмы при вводе микроволновой мощности в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) широко применяется в микроэлектронике, обработке поверхностей, ионных источниках, в том числе многозарядных, плазменных ракетных двигателях [1]. Метод успешно применяется в системах разделения изотопов [2], имеется предложение использовать его в системах сепарации материалов [3], где ионы, вытекающие из источника, нагревались с помощью винтовых антенн. Естественно, такие потоки с последующим нагревом ионов можно использовать и в плазменных двигателях большой мощности [4], где тяга создаётся при течении ионно-горячей плазмы через магнитное сопло.

Отметим некоторые преимущества ЭЦР-метода создания плазмы. Метод является бесконтактным, в качестве устройств ввода мощности служат простые антенны, позволяющие формировать диаграммы направленности под произвольным углом по отношению к магнитному полю. Мощность вкладывается только в ионизирующие газ электроны в пределах резонансных зон $\omega \approx \omega_e$ [5] (ω — частота излучения генератора, $\omega_e = eB/mc$ — электронная циклотронная частота). Пространственное расположение этих зон определяется конфигурацией магнитного поля. Создание плазмы ЭЦР-методом слабо избирательно к элементному составу ионизируемого газа.

Традиционной конфигурацией магнитного поля ЭЦР-источника плазмы является простая пробочная ловушка. Для обеспечения МГД-устойчивости открытых ловушек были предложены и экспериментально исследованы [6—8] конфигурации магнитного поля с тороидальным дивертором. Сепаратриса дивер-

тора также служит «нематериальной стенкой» и может влиять на параметры и пространственные распределения плазменных потоков. В данной работе с помощью ленгмюровских зондов и сеточного анализатора измерялись параметры плазмы при ЭЦР-разряде в пробочной ловушке с тороидальным дивертором и вытекающих из неё плазменных потоков.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальные исследования проводились на установке ПС-1, схема которой показана на рис. 1. Показаны вакуумные объёмы, расположение катушек магнитного поля и геометрия силовых линий. Уста-



Рис. 1. Схема установки ПС-1 и размещения диагностики. Вакуумные объёмы установки: І — газовый; ІІ — ЭЦР-источника; ІІІ — нагрева ионов; IV — приёмный; 1, 2 — подвижные зонды; 3, 4, 5 — линейки зондов; 6 — сеточный анализатор

новка состоит из четырёх вакуумных объёмов — газового, источника плазмы, нагрева ионов и приёмного. В первый объём производится напуск рабочего газа, в объём источника плазмы вводится микроволновая мощность, в объёме нагрева ионов размещена винтовая антенна, в приёмном объёме с расходящимися силовыми



Рис. 2. ЭЦР-источник плазмы: *1* — катушки пробочного магнитного поля и соленоида; *2* — диверторная катушка; *2*k— корректирующая катушка; *3* — ввод СВЧ-мощности (излучатель); *4* — линейка ленгмюровских зондов в диверторе; *5* — магнитные силовые линии; *6* — плазма в пробочной ловушке; *7* — плазма в диверторной области; *8* — сепаратриса. В точке О магнитное поле на сепаратрисе равно нулю, *n* = 1, 2 — резонансная поверхность

линиями реализуется конфигурация магнитного поля, которая в плазменных двигателях называется магнитным соплом. В приёмном объёме производится откачка плазменного потока. В данной работе приводятся результаты исследований потоков только при вводе микроволновой мощности без нагрева ионов.

На рис. 2 отдельно показана схема секции ЭЦР-источника плазмы, представляющей собой простую пробочную ловушку с тороидальным дивертором [9]. В так называемых диверторных катушках 2 направление тока противоположно току в катушках, создающих простое пробочное поле. Диверторная катушка 2 расположена в вакууме в центральной плоскости камеры источника и состоит из двух частей с зазором между ними. Каждая часть заключена в вакуумноплотную оболочку, внутри которой давление атмосферное. Такая геометрия диверторной катушки позволяет через зазор вводить в центральную плоскость диагностическую и технологическую аппаратуру. Пробочные катушки, корректирующие диверторные катушки 2k, и соленоид секции нагрева ионов размещены вне вакуумных объёмов в атмосфере. Все катушки магнитного поля включены последовательно и запитываются от одного генератора.

На рис. 3 показано распределение напряжённости магнитного поля вдоль оси установки и в центральной плоскости ловушки. Видно, что в данном случае (без нагрева ионов) соленоид является просто длинной пробкой ловушки с пробочным отношением ~3.



Рис. 3. Распределение напряжённости магнитного поля вдоль оси установки (*a*) и модуля магнитного поля по радиусу в центральной плоскости источника плазмы (*б*). Ток в катушках равен 2 кА

Распределение модуля магнитного поля по радиусу в центральной плоскости источника (см. рис. 3, б) имеет два нуля. Первый нуль поля возникает из-за того, что токи в пробочных и диверторных катушках противоположны. Второй ноль находится в зазоре между секциями диверторной катушки (см. рис. 2) с одинаковым направлением токов.

В диверторной конфигурации имеется кольцевая линия, на которой магнитное поле равно нулю (B = 0 на рис. 2). В области около этой линии нарушается адиабатичность движения частиц плазмы [10]. Силовая линия магнитного поля, проходящая через эту точку, называется сепаратрисой, и она разделяет всю область существования плазмы на две — пробочную и диверторную (выделены цветом на рис. 2).

Излучение по волноводу через вакуумноплотное керамическое окно вводится в кольцевую щель диверторной катушки (см. рис. 2) поперёк оси установки. Антенной с широкой диаграммой направленности служит открытый конец волновода размером 15×35 мм. При таком размещении антенны предотвращаются пробои в волноводе между вакуумноплотным окном и открытым концом — излучателем, поскольку он расположен в области со слабым магнитным полем, где частота генератора больше электронной циклотронной частоты и нигде не выполняется условие ЭЦР. Открытый конец волновода не доходит до крайней силовой линии, ограничивающей область существования плазмы (см. рис. 2), и поэтому в волноводе не происходит пробоев из-за плазмы. Поскольку поглощение СВЧ-мощности происходит только вблизи резонансных поверхностей n = 1 (см. рис. 2), то реализуется бесконтактный метод создания плазмы.

Все системы установки работают в стационарном режиме. Для удобства регистрации и уменьшения влияния пробоев в волноводных системах плазма создавалась в импульсно-периодическом режиме (длительность импульса 1—2 с, скважность 5—10) путём модуляции напряжения на задающем генераторе СВЧ-системы.

Установка работала в режиме с протоком аргона. Напуск производился в газовый объём и зазор диверторной катушки (см. рис. 2), откачка производилась в приёмном объёме. С помощью стационарных и импульсных натекателей газовые потоки подбирались так, чтобы в течение разряда давление в объёме источника поддерживалось на уровне 10⁻⁴ торр. Основные технические параметры установки ПС-1:

Длина вакуумной камеры, м	3,75
Диаметр сепаратрисы в источнике, м	0,352
Максимальный диаметр плазмы в пробках ловушки, м	0,15
Диаметр приёмной камеры, м	0,9
Максимальное магнитное поле в центре источника, Тл	0,25
Пробочное отношение в источнике	3
Частота СВЧ-генератора, ГГц	7
Критическая плотность плазмы для частоты генератора, м ⁻³	$0,6 \cdot 10^{18}$
Резонансное магнитное поле, Тл	0,25
Максимальная вводимая СВЧ-мощность, кВт	20

ДИАГНОСТИКА

Для измерения параметров по радиусу плазмы в источнике использовались два подвижных одиночных ленгмюровских зонда (ЛЗ). Первый перемещался по радиусу от 0 до 30 см в зазоре диверторной катушки и проходил через точку B = 0 (см. рис. 1, зонд 1). Второй перемещался в диверторной щели по радиусу от 10 до 30 см и пересекал плазменный поток в щели под углом к магнитному полю (см. рис. 1, зонд 2).

В приёмном объёме плазмы располагались две линейки зондов по 16 зондов в каждой. Одна располагалась вдоль оси магнитного поля от катушек соленоида до стенки вакуумной камеры, вторая поперёк оси на входе в приёмный объём (см. рис. 1). Величина магнитного поля вдоль продольной линейки зондов изменялась на два порядка. Поперечная линейка перехватывала весь вытекающий плазменный поток, ограниченный упирающимися в металлические стенки камеры крайними силовыми линиями. Линейка из 16 плоских зондов располагалась перпендикулярно к оси установки в газовом объёме (см. рис. 1) и измеряла параметры потока, вытекающего в левую пробку магнитной ловушки. Величина магнитного поля в месте расположения этой линейки равна полю в центре магнитной ловушки. Линейки из восьми плоских зондов также располагались поперёк двух плазменных потоков, вытекающих из диверторного объёма (см. рис. 2). Таким образом, с помощью указанных зондов можно измерить основные параметры плазмы в ловушке и вытекающих из неё плазменных потоков. Все перечисленные зонды использовались также для измерения параметров и пространственных распределений колебаний плавающего потенциала.

Параметры ионов, вытекающих в приёмный объём, измерялись с помощью многосеточных анализаторов с задерживающим потенциалом [11]. Анализатор располагался в приёмном объёме на стенке вблизи оси установки (см. рис. 1).

На рис. 4 показаны типичная зависимость тока на коллектор сеточного анализатора от запирающего ионы положительного потенциала сетки U (кривая запирания) и кривая её аппроксимации гладкими



Рис. 4. Зависимость тока на коллектор сеточного анализатора от запирающего ионы положительного потенциала сетки: *1* — осциллограмма кривой запирания; *2* — её аппроксимация; *3* — функция распределения ионов по скоростям

функциями после операции усреднения. Дифференцирование этой кривой даёт функцию распределения вытекающих ионов по скоростям.

Хвосты кривых запирания и функции распределения являются экспонентами и позволяют оценить температуру ионов T_i . Пик функции распределения (наиболее вероятная энергия) характеризует потенциал плазмы, и в дальнейшем мы будем ссылаться на него как на потенциал плазмы *F*. Для приведённой на рис. 4 осциллограммы F = 20 B, $T_i \sim 10$ эВ.

Средняя по диаметру (линейная) плотность плазмы в магнитной ловушке измерялась с помощью микроволнового интерферометра, работающего на частоте 70 ГГц. Рупоры интерферометра располагались в щели диверторной катушки (см. рис. 1). Давление газа в диверторном и приёмном объёмах измерялось вакуумметрами с манометрическими преобразователями ПМИ-10.

ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, т. 37, 2014, вып. 1

Вводимая и отражённая СВЧ-мощность измерялась по сигналам детекторов направленных волноводных ответвителей, которые были откалиброваны калориметрическим методом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными экспериментально измеряемыми величинами были линейная плотность $nl = \int n dl$, ин-

теграл вдоль луча интерферометра, I_s — ионный ток насыщения ленгмюровских зондов (пропорциональный плотности плазмы), T_e — температура электронов, F — потенциал плазмы и пространственные распределения указанных величин. Снимались параметрические зависимости указанных величин от вводимой СВЧ-мощности и тока в катушках магнитного поля.

Параметры плазмы в ЭЦР-источнике. На рис. 5, *а* показана зависимость линейной плотности *nl*, потенциала плазмы *F*, измеренных введённым в центр источника легмюровским зондом тока насыщения I_s и температуры электронов T_e от вводимой мощности *P*. Пробой происходит при мощности 0,8 кВт, и после достижения $nl \approx 3.10^{13}$ см⁻² измеряемые параметры слабо увеличиваются.

На рис. 5, δ показана зависимость этих же параметров плазмы от тока в катушках J_k . При токе менее 0,7 кА, когда резонансная поверхность n = 1 выходит из области удержания открытой ловушки, разряд не зажигается. При увеличении тока J_k параметры плазмы практически не меняются.

Параметры плазмы в средней плоскости источника измерялись подвижным одиночным ленгмюровским зондом (см. рис. 1).



Рис. 5. Зависимость nl, 10^{13} см⁻² (I); F/10, B (2); T_e , эВ (3); I_s , отн. ед. (4) от $P(J_k = 1,5 \text{ кA})$ (a) и J_k (P = 6 кВт) (δ)

На рис. 6, *a*, δ показано радиальное распределение ионного тока насыщения I_s и электронной температуры T_e . Видно, что в центральной области указанные параметры плазмы практически не зависят от радиуса.

Отметим, что в источнике наблюдаются низкочастотные (НЧ) колебания плавающего потенциала зонда. Зависимость амплитуды колебаний *A_f* от радиуса *r* показана на рис. 6, *в*.



ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 1



Рис. 8. Распределение I_s (1), T_e (2), B (3) вдоль оси установки: P = 6 кВт, $J_k = 1,5$ кА



Рис. 9. Распределение I_s (1), T_e (2) по радиусу в приёмном объёме: z = 180 см, P = 6 кВт, $J_k = 1,5$ кА

Типичный спектр колебаний, измеренных в центральной области плазмы, показан на рис. 7. Колебания лежат в полосе частот f до 100 кГц, максимум спектра приходится на частоты 2—4 кГц, и при увеличении вводимой мощности P растёт его интенсивность.

Параметры плазмы в вытекающих потоках. Приводятся параметры плазменных потоков при мощности выше пробоя (P > 2 кВт) и токах в катушках более 1 кА, когда зоны резонансов с n = 1 находятся в области удержания ловушки.

Плазма из ЭЦР-источника вытекает в приёмный объём, газовый объём и диверторные щели (см. рис. 1, 2).

На рис. 8 показаны распределение ионного тока насыщения зондов I_s , электронной температуры T_e плазмы вдоль оси z приёмного объёма (расстояние z отсчитывается от центра источника, см. рис. 1), а также продольное распределение величины магнитного поля B, нормированное на максимальную величину I_s (3). Видно, что B и I_s изменяются одинаково при спаде этих величин на порядок. Максимальный градиент магнитного поля в приёмном объёме установки достигает 1 Тл/м.

На рис. 9 показано распределение I_s и T_e по радиусу в приёмном объёме, стрелками показано положение сепаратрисы r = 12,5 см в месте расположения поперечной линейки ЛЗ.

Измерения показывают, что пространственное распределение плотности и температуры в приёмном объёме не зависит от величины тока в катушках при $J_k > 0,8$ кА. При вводимой микроволновой мощности более 3 кВт вид распределения I_s и T_e не изменяется, а величина плотности и температуры электронов слабо увеличивается в соответствии с их изменением в источнике (см. рис. 5, *a*). Видно (см. рис. 9), что I_s , характеризующий плотность плазмы, резко спадает за сепаратрисой, T_e , напротив, увеличивается.

Линейка ленгмюровских зондов, установленная в газовом объёме (см. рис. 1), регистрирует потоки вдоль силовых линий только из центральной области источника (r < 10 см). Радиальное распределение также плоское и имеет такую же зависимость от J_k и P, как и для линеек в приёмном объёме. На рис. 10 показано распределение ионного тока насыщения I_s в диверторной щели, снятое подвижным легмюровским зондом 2 (см. рис. 1) поперёк оси установки. Отметим, что зонд пересекает плазменный поток при его перемещении от 20 до 30 см под углом к силовым линиям. При радиусе меньше 15 см зонд входит в плазменный поток, вытекающий вдоль силовых линий через пробки открытой ловушки.

Оценки, выполненные с учётом геометрических факторов, показывают, что потоки в диверторные щели на порядок меньше потоков вдоль силовых линий.



Рис. 10. Зависимость тока в диверторной щели от радиуса

КОЛЬЦЕВЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ В ПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ С ТОРОИДАЛЬНЫМ ДИВЕРТОРОМ

Интересно отметить, что в ловушке с дивертором возможно существование кольцевых структур. На рис. 11 показано распределение по радиусу *I*_s и амплитуды НЧ-колебаний плавающего потенциала в



Рис. 11. Зависимость ионного тока насыщения (1) и колебаний плавающего потенциала (2) от радиуса P = 1,2 кВт (a), P = 1,8 кВт (δ)

центральной плоскости источника, измеренное подвижным ленгмюровским зондом при двух значениях вводимой мощности. Напуск аргона производится в кольцевую щель между диверторными катушками. Видно, что образуется кольцевая структура плазмы, которая с повышением мощности разрушается и приводит к «плоскому» радиальному профилю как плотности, так и амплитуды колебаний. Центр такой кольцевой структуры привязан к нулю магнитного поля на сепаратрисе. НЧ-колебания привязаны к спаду плотности (максимальному градиенту).

Кольцевые структуры хорошо наблюдаются визуально. На рис. 12 показана фотография плазмы, снятая через окно, расположенное на правом торце установки (см. рис. 1, вид вдоль оси установки), и видно кольцевое свечение плазмы.

При напуске аргона вдоль оси установки (в объём напуска газа, см. рис. 1) таких структур и, естественно, кольцевого свечения не наблюдается.



Рис. 12. Фотография кольцевой структуры плазмы

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Условие ЭЦР-нагрева электронов плазмы [5]: $\omega = n\omega_e + k_{\parallel}v_{\parallel}$, где n — целое число, ω_e — электронная циклотронная частота, значком \parallel отмечены проекции волнового вектора k и скорости электронов v на направление магнитного поля. Для вклада микроволновой мощности в холодные электроны интерес представляют только резонансы при n = 1 и n = 2 [5]. На рис. 2 показано положение резонансных поверхностей n = 1 и n = 2 при токе в катушках 1,5 кА.

При токе в катушках менее 0,7 кА резонансная поверхность n = 1 выходит за пробку из области удержания и образование плазмы становится невозможным (см. рис. 5, б). При токе 2,1 кА (максимальный ток генераторов магнитного поля) выполняется условие ЭЦР для n = 1 только в одной точке на оси системы. Таким образом, при изменении тока в катушках в 3 раза резонансная поверхность n = 1 перекрывает всё сечение плазмы и, следовательно, плазма может образовываться во всём объёме ловушки в диапазоне токов в катушках 0,7—2,1 кА. Естественно, это соответствует выбранному пробочному отношению (см. рис. 3, a).

Пробой и образование плазмы обеспечивает только резонанс на основной частоте (n = 1). Пробоя при вводимой микроволновой мощности до 20 кВт и токах катушек магнитного поля менее 0,7 кА, когда поверхности с n = 1 находились за пробками, не наблюдалось, хотя резонансные поверхности с n = 2 на-ходились в области удержания ловушки. Однако возможно влияние резонанса n = 2 на нагрев электронов в кольцевой структуре (см. рис. 11, 12).

Источник плазмы состоит из двух ловушек (см. рис. 1). Центральная область представляет собой простую адиабатическую пробочную гидродинамически неустойчивую ловушку. На периферии по радиусу расположена тороидальная квадрупольная неадиабатическая гидродинамически устойчивая ловушка с абсолютным минимумом магнитного поля. На образование кольцевой структуры может влиять ряд факторов и, в частности, нагрев на гармониках циклотронной частоты. На это указывает увеличение электронной температуры вблизи сепаратрисы (см. рис. 6, 9). При плотности плазмы $\sim 10^{12}$ см⁻³ пробег атомов аргона до ионизации составляет 2—4 см, и поскольку напуск газа производится тоже радиально, то происходит экранировка центральной области источника как от газа, так и от микроволновой мощности. Поскольку такая структура имеет большие градиенты плотности, то с увеличение вводимой мощности она становится неустойчивой. Взаимодействие двух ловушек приводит к увеличению ширины плазменного кольца (см. рис. 11). Напуск аргона в источник из газового объёма вдоль силовых линий магнитного поля приводит к установлению практически «плоских» радиальных распределений всех параметров плазмы в источнике до сепаратрисы (см. рис. 6). Естественно, вытекающие плазменные потоки носят такой же характер (см. рис. 9).

Течение плазмы в установке носит МГД-характер при изменении магнитного поля и плотности на порядок. Вид функции распределения ионов (см. рис. 4) указывает на их потенциальное ускорение, при этом потенциал плазмы составляет $(3-4)T_e$. Измерения сеточным анализатором температуры ионов (см. рис. 4) показывают, что $T_i \sim T_e$, что, возможно, объясняется их нагревом в электрических полях и наблюдаемых электростатических НЧ-колебаниях.

Предварительные результаты исследований колебаний в источнике позволяют сделать вывод, что наблюдаемая в источнике коротковолновая неустойчивость может быть идентифицирована как низкочастотная дрейфово-диссипативная [12].

В технологических источниках плазмы применяется аналогичная диверторной конфигурация с нейтральным контуром (Neutral Loop Discharge — NDL [13]), которая позволяет получить потоки с высокой однородностью по радиусу. В этой же работе отмечается роль нагрева электронов на гармониках электронной циклотронной частоты n > 1.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8238).

REFERENCES

- 1. **High** density plasma sources. Design, Physics and Performance. Ed. by O.A. Popov. Noyes publications, Park Ridge, New Jersey, USA.
- 2. Isotopes. Ed. by V.Yu. Baranov. Moscow, IzdAt, 2000 (in Russian).
- Zhil'tsov V.A., Kulygin V.M., Semashko N.N. et al. Plasma separation of the elements applied to nuclear materials handling — Atomnaya energiya (Atomic Energy), 2006, vol. 101, No. 4, pp. 755—759 (in Russian).
- 4. Breizman B.N., Arefiev A.V. Single pass ion cyclotron resonance absorption. Physics of Plasmas, 2000, vol. 8, p. 907.
- 5. **Timofeev A.V**. Resonance phenomena in plasma oscillations. Moscow, FizMatLit (Phismatlit), 2009 (in Russian).
- 6. Casey J.A., Lane D.G., Irby J.H. et al. Experimental studies of divertor stabilization in an axisymmetric tandem mirror. Phys. Fluids, 1988, vol. 31, p. 2009.
- 7. Katanuma I., Sasagawa Y., Tatematsu Y. et al. Magnetic divertor design in GAMMA 10 central cell. Nucl. Fusion, 2006, vol. 46, p. 608.
- 8. England A.C., Lee D.K., Lee S.G. et al. Mirror stabilization in the Hanbit device. Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 125 008.
- 9. Arsenin V.V., Dlougach E.D., Kulygin V.M. et al. The EPSILON experimental pseudo-symmetric trap. Nuclear Fusion, 2001, vol. 41, № 7, p. 945.
- 10. Chirikov B.V. Particles dynamics in magnetic traps. In collector Voprosy teorii plazmy (Problems of Plasma Theory), issue 13, ed. by B.B. Kadomtsev, 1984 (in Russian).
- 11. Hutchinson I.H. Principles of Plasma Diagnostics. Second Edition, 2002, Cambridge University Press.
- 12. **Timofeev A.V**. Drift-dissipative instability of irregular plasma in magnetic field. UFN (APhS), 1976, vol. 118, p. 273 (in Russian).
- 13. Uchida T., Hamaguchi S. Magnetic neutral loop discharge (NLD) plasmas for surface processing. J. Phys. D: Appl. Phys., 2008, vol. 41, p. 083001.

AUTHORS

Berezkin A.V. NRC "Kurchatov Institute", pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Berezkin_AV@nrcki.ru

Bragin E.Yu. NRC "Kurchatov Institute", pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Bragin_EY@nrcki.ru

Zhil'tsov V.A. NRC "Kurchatov Institute", pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Zhiltsov_VA@nrcki.ru

Kulygin V.M. NRC "Kurchatov Institute", pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kulygin_VM@nrcki.ru

Yanchenkov S.V. NRC "Kurchatov Institute", pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Yanchenkov_SV@nrcki.ru

Received 25 October 2013 Problems of Atomic Science and Technology Ser. Thermonuclear Fusion, 2014, vol. 37, issue 1, pp. 47—55.