УДК 533.9:519.688

ГОФРИРОВОЧНЫЕ ПОТЕРИ ИОНОВ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПУЧКА И АССОЦИИРОВАННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ПЕРВУЮ СТЕНКУ ИТЭР

П.Б. Алейников, С.В. Коновалов (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)

Гофрировочные потери ионов диагностического пучка (ДП) рассчитывались для исходного проекта со строго перпендикулярной инъекцией и для базового альтернативного варианта с осью инъекции, повернутой на 6° . Рассматривались базовые сценарии — индуктивный и со слабым обращённым широм для DT и водородной фаз работы ИТЭР. Рассчитанные значения тепловых нагрузок на первую стенку в случае исходного проекта ДП оказываются экстремально большими, достигая величины порядка $2\text{--}4\text{ МВт/м}^2$. Поворот пучка приводит к значительному снижению нагрузок на первую стенку. Для основного альтернативного варианта рассчитанные тепловые нагрузки оказываются меньше величины $0,1\text{ МВт/м}^2$. Показано, что поворот пучка на угол 6° ($R_{\text{target}} = 141,3\text{ см}$) оказывается близким к минимально необходимому для снижения тепловых нагрузок ниже предельно допустимого уровня. При меньшем повороте пучка $R_{\text{target}} < 120\text{ см}$ тепловые нагрузки, ассоциированные с гофрировочными потерями диагностического пучка, представляют серьёзную угрозу компонентам первой стенки. Анализ изменения тепловых нагрузок при вариации плотности и температуры плазмы показал, что для базового альтернативного варианта поворота пучка тепловые нагрузки оказываются значительно меньше допустимых, тогда как для строго перпендикулярной инъекции возрастание плотности плазмы на 25% сопровождается ростом тепловых нагрузок вплоть до 5 МВт/м^2 .

Ключевые слова: гофрировочные потери, нейтральная инъекция, диагностический пучок, ИТЭР.

RIPPLE LOSS OF DIAGNOSTIC BEAM IONS AND ASSOCIATED HEAT LOADS ON THE FIRST WALL IN ITER. P.B. ALEYNIKOV, S.V. KONOVALOV. Ripple loss of the Diagnostic Neutral Beam, DNB, were calculated for original design with strictly perpendicular injection and for basic revised design with injection line rotated for 6 degree. Reference inductive and weak negative shear scenarios for DT and H phases of ITER operation were considered. For the original design First Wall heat loads, associated with ripple loss of the DNB ions, were found to be extremely high, of order $2\text{--}4\text{ MW/m}^2$. Rotation of the beam results in significant reduction of the FW heat loads. For the basic revised design in all operation scenarios heat loads were found to be smaller than 0.1 MW/m^2 . DNB rotation angle of 6 degrees ($R_{\text{target}} = 141.3\text{ cm}$) was found to be close to the marginal one to provide the heat loads to be within the tolerable level. For smaller rotation with $R_{\text{target}} < 120\text{ cm}$ heat loads associated with DNB ion ripple loss pose serious danger for the FW components. Sensitivity study for the heat loads variation with changing the plasma density and temperature reveals that for the basic revised design FW loading remains in the tolerable limits, while for the strictly perpendicular beam, rising the plasma density for 25% is accompanied by the increase of the loads up to the 5 MW/m^2 .

Key words: ripple losses, neutral injection, diagnostic neutral beam, ITER.

ВВЕДЕНИЕ

Перпендикулярная инъекция диагностического пучка (ДП) в плазму представляет потенциальную опасность ввиду возможных потерь ионов пучка вследствие запираания их в локальные гофры магнитного поля. Хорошо известно, что распределение тепловых нагрузок, создаваемых локально запертыми частицами, характеризуется значительным как тороидальным, так и полоидальным пикированием. Следовательно, даже при относительно малой доле потерь инжектируемых ионов связанные с ними тепловые нагрузки на элементы первой стенки токамака могут превосходить допустимые значения. Характерная дрейфовая траектория заряженной частицы в гофрированном магнитном поле ИТЭР показана на рис. 1. При достаточно широкой области существования локальных магнитных ям (гофров) запертые в них частицы выходят на первую стенку токамака. При узкой области существования гофров возможны бесстолкновительные переходы частиц с локально запертой на «обычную», так называемую «банановую» траекторию и обратно. Такие переходы не сопровождаются дополнительным радиальным переносом частиц.

Рис. 1. Траектория заряженной частицы в гофрированном магнитном поле токамака с бесстолкновительными переходами между локально запертыми участками траектории (короткие тороидальные осцилляции) и тороидально запертыми («банановые» орбиты)

Ключевыми параметрами, определяющими гофрировочные потери ионов ДП и ассоциированные нагрузки на первую стенку, являются распределение амплитуды гофрировки по сечению плазменного шнура, геометрия области существования локальных магнитных ям (зависящая также от равновесной конфигурации), параметры инжекции и форма первой стенки.

Первоначально ферромагнитные вставки, компенсирующие гофрировку, оптимизировались для номинальной амплитуды тороидального поля. Для начальной, водородной фазы работы ИТЭР амплитуда тороидального поля будет составлять половину от номинальной величины. Следовательно, в этом случае возможна некоторая перекомпенсация гофрировочного возмущения.

Размер области существования локальных гофрировочных ям существенно зависит от амплитуды и радиального распределения тока плазмы. Наиболее опасными с точки зрения удержания надтепловых ионов являются режимы с малым током плазмы и обращённым широм магнитного поля, т.е. такие, как предполагаемые в качестве базовых для квазистационарных режимов работы ИТЭР.

В исходном проекте инжекция ДП предполагается строго перпендикулярной. Это означает, что при такой геометрии инжекции ионы пучка будут захватываться в локальные гофры непосредственно вблизи точки ионизации. В случае их потерь создаваемые ими тепловые нагрузки могут быть достаточно велики благодаря экстремально высокой пикированности. Возможный диапазон углов инжекции необходимо проанализировать для определения границ безопасной работы в различных операционных сценариях ИТЭР.

Известно, что кулоновское рассеяние существенным образом влияет на гофрировочные потери быстрых ионов. При этом ключевым параметром является температура электронов плазмы в области пьедестала. Следовательно, также представляет интерес анализ зависимости гофрировочных потерь ионов ДП от возможных значений температуры плазмы в области пьедестала.

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО КОДА

Для расчётов мы использовали модуль DRIFT численного кода HYBRID [1], являющийся самостоятельным кодом по расчёту траекторий частиц с учётом кулоновских столкновений по методу Монте-Карло. В расчётах не были использованы никакие из ускорительных опций, таких, как использование модуля MAPPING кода HYBRID или искусственного ускорения столкновительных процессов.

Код интенсивно используется для расчётов гофрировочных потерь быстрых ионов в ИТЭР начиная с 1989 г. [2] (до 1994 г. в неоптимизированной версии). Проведены многочисленные сравнительные расчёты с кодами ORBIT (PPPL) (в начале 1990-х гг.) и JAERI OFMC [3] (с 1990 по 2004 г.). Сравнение продемонстрировало прекрасное совпадение результатов DRIFT (HYBRID) и JAERI OFMC.

Результаты моделирования DRIFT верифицировались сравнением с экспериментальными данными, полученными в ходе кампаний RIPPLE-1 и RIPPLE-2 экспериментов на JET. При этом с высокой точностью воспроизводились измеряемые значения нейтронных эмиссий DD и DT [4], данные, измеряемые анализатором нейтральных атомов, и другие.

Прекрасное совпадение измеренных (с помощью инфракрасной видеосъёмки) и рассчитанных кодами HYBRID и JAERI OFMC распределений тепловых нагрузок, обусловленных гофрировочными потерями нагревного пучка, на первую стенку токамака JT-60U получено в 1994 г. [1].

ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТОВ

В расчётах мы использовали данные по равновесию и распределению параметров плазмы для базовых индуктивного сценария и сценария со слабым обращённым широм магнитного поля (сценарии S2 и S4 соответственно). Файлы данных равновесия в форме EQDSK, профили необходимых параметров плазмы, геометрия первой стенки и распределение амплитуды гофрировки магнитного поля предоставлены Международной организацией ИТЭР [5].

На рис. 2 показаны границы области существования локальных магнитных ям в базовом индуктивном сценарии ИТЭР (сценарий 2, $I_p = 15$ МА, $B_t(R = 6,0 \text{ м}) = 5,3$ Тл) для случаев гофрировки, создаваемой только тороидальным магнитом (синий) и с учётом компенсирующего эффекта ферромагнитных

Рис. 2. Границы области существования локальных гофров магнитного поля 15 МА в сценарии ИТЭР при наличии и без компенсирующих ферромагнитных вставок: ← — положение диагностического пучка

Рис. 3. Плотность энергии ДП по вертикали (а) и горизонтали (б) на расстоянии 20,1 (1) и 23,4 м (2) от излучающей решётки: N — число пробных частиц; X и Y — расстояние от оси пучка, см

вставок (красный), стрелкой указано положение диагностического пучка. Видно, что даже при компенсированной гофрировке частицы пучка, ионизованные на периферии плазмы, могут быть захвачены в локальные гофры и покинуть плазму, вылетая на стенку вдоль направления ионного магнитного дрейфа (вниз).

Для моделирования водородной фазы с половиной амплитуды тороидального поля мы использовали те же данные по равновесиям, в которых наряду с уменьшением тороидального поля также вдвое снижался ток плазмы. При этом для сохранения режимов в пределах допустимых плотностей плазмы плотности электронного и ионного компонентов также уменьшались вдвое.

ПАРАМЕТРЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПУЧКА ИТЭР

Для диагностических целей в плазму ИТЭР предполагается инжектировать пучок атомов водорода с энергией 100 кэВ и полной мощностью 3,6 МВт. Ось инжекции строго горизонтальна и нацелена (приблизительно) на магнитную ось разряда, $Z_{\text{DNB}} = 0,6$ м (см. рис. 2). Инжектор ДП имеет геометрическую структуру (оптические свойства формирования пучка атомов водорода), сходную со структурой инжектора основных нагревных пучков ИТЭР. Так же, как и для нагревного пучка, расходимость элементарных пучков, начинающихся на отдельных апертурах заземлённой («излучающей») решётки источника отрицательных ионов, в базовом варианте составляет 5 мрад и 15 мрад в компонентах Co (85%) и Halo (15%) соответственно. Для расчёта источника быстрых протонов ДП в плазме использовался специально разработанный численный модуль [6], опирающийся на данные геометрии инжектора ДП ИТЭР из инженерно-физического кода ВТЭР [7].

Рассчитанная плотность энергии пучка на расстоянии 20,1 м (точка фокусировки групп элементарных пучков как по вертикали, так и по горизонтали) и 23,4 м (характерное сечение) от излучающей решётки показана на рис. 3.

В исходном варианте ДП нацелен строго перпендикулярно, т.е. вдоль большого радиуса R . Максимально возможный угол поворота диагностического пучка (базовый альтернативный вариант) составляет 6° по часовой стрелке (вид сверху) [8]. При этом прицельный радиус для повернутого пучка составляет $R_t = 141,288$ см, а тороидальное смещение точки пересечения осью ДП первой стенки равно 53,3 см [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

DT-плазма. Основные результаты расчётов для перпендикулярного и базового альтернативного вариантов диагностического пучка на фазе DT представлены в табл. 1.

Таблица 1. Доля потерь мощности пучка и ассоциированные нагрузки на первую стенку для перпендикулярного и поворнутого (6°) вариантов в сценариях № 4 и № 2

Направление инжекции	Сценарий	Потери мощности, %	Максимальная нагрузка, кВт/м ²
Перпендикулярный	S4	19,16	4123,6
Повёрнутый (6°)	S4	2,15	55,3
Перпендикулярный	S2	30,2	3429,3
Повёрнутый (6°)	S2	6,44	43,12

Более высокая плотность плазмы в сценарии № 2 обеспечивает повышенную ионизацию атомов пучка на периферии плазмы, что приводит к заметному возрастанию полных потерь мощности P_{loss} . В то же время больший по сравнению со сценарием № 4 ток плазмы обеспечивает сужение области существования локальных магнитных ям. При этом гофрировочные потери диагностического пучка в сценарии № 2 распределяются примерно поровну между тороидально и локально запертыми каналами ухода — 14 и 16% соответственно. Тогда как в сценарии № 4 практически все потери (18%) происходят за счёт почти мгновенного ухода частиц, запертых в локальные гофры вблизи точки ионизации. Именно по этой причине тепловые нагрузки для строго перпендикулярной инжекции в сценарии № 4 превосходят полученные в сценарии № 2, несмотря на меньшие полные потери.

Подробности результатов расчётов проиллюстрированы на рис. 4, 5.

Поскольку для поворнутого пучка тороидальное распределение нагрузки не имеет пикированного

Рис. 4. Распределение потерь ДП между сегментами тороидального магнита. ДП инжектируется в первый сегмент: а — перпендикулярная инжекция; б — поворнутый пучок. S4 DT-плазма

Рис. 5. Распределение тепловых нагрузок, кВт/м², для перпендикулярного ДП в S4 DT-плазме. По вертикали «полоидальный угол» θ (град.). Этот угол в полярной системе координат с центром в $R = 6,0$ м, $Z = 0$ м при $\theta = 0$, на внутреннем обводе используется для задания геометрии первой стенки в вычислениях. $\theta = 196$ соответствует $Z_{\text{wall}} = -0,592$ м; $\theta = 210$ соответствует $Z_{\text{wall}} = -1,11$ м. По горизонтали — тороидальный угол ϕ (град.) в стандартной системе R, ϕ, Z , где R — большой радиус тора, $\phi = 10$ находится строго между катушек тороидального поля. Для перпендикулярной инжекции $\phi = 10$ соответствует положению оси пучка

характера (см. рис. 4, б), в расчётах 2D-распределения мы использовали усреднение по всем тороидальным сегментам (рис. 6).

Распределение мощности потерь ДП в S2 DT-плазме, характеризующейся повышенной плотностью (более периферийный захват пучка) и большим током (уже область существования локальных магнитных ям), в случаях перпендикулярной и поворнутой оси инъекции показано на рис. 7—10.

Для поворнутого пучка в S2 DT-плазме тороидальное распределение потерь практически равномерное (см. рис. 7, б). Усреднённое полоидальное распределение потерь для этого случая показано на рис. 10.

Рис. 6. Усреднённая по всем N тороидальным сегментам тепловая нагрузка ($\text{кВт}/\text{м}^2$) от потерь поворнутого ДП в S4 DT-плазме

Рис. 7. Распределение потерь ДП между сегментами тороидального магнита: а — перпендикулярная инъекция; б — поворнутый пучок. S2 DT-плазма

Рис. 8. Распределение тепловых нагрузок в сегменте инъекции ($\text{кВт}/\text{м}^2$). Перпендикулярный ДП в S2 DT-плазме

Рис. 9. Перпендикулярный ДП в S2 DT-плазме. Тепловые нагрузки усреднённые по тороидальным сегментам. Потери тороидально запертых частиц ($150 < \theta < 170$) не дают пикированных нагрузок, поскольку они практически равномерно распределены по тороидальным сегментам. Потери локально запертых частиц попадают, в основном, в сегмент инъекции

Рис. 10. Усреднённая по всем N тороидальным сегментам тепловая нагрузка ($\text{кВт}/\text{м}^2$) от потерь поворнутого ДП в S4 DT-плазме

Диагностический пучок с повышенной расходимостью. Расходимость пучка из каждой апертуры задавалась как 7 мрад для основного компонента и 21 мрад для гало. Размер окна ввода на первой стенке для этого варианта был задан 415×485 мм.

Основные результаты расчётов потерь диагностического пучка при повышенной дивергенции для сценария DT S4 представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Доля потерь и ассоциированные нагрузки на первую стенку для перпендикулярного и повёрнутого вариантов инжекции диагностического пучка с повышенной расходимостью в сценарии DT S4

Направление инжекции	Сценарий	Потери мощности, %	Максимальная нагрузка, кВт/м ²
Перпендикулярный	S4	18,3	3678,8
Повёрнутый (6°)	S4	2,00	36,4

Расчёты показали, что изменение расходимости пучка и размеров порта ввода не приводят к существенным изменениям в величине нагрузок на первую стенку. Для случая перпендикулярной инжекции тепловые нагрузки по-прежнему очень высоки с пиковой амплитудой до 3,7 МВт/м². 2D-распределение нагрузок и величина пиковых амплитуд получены при примерно в 10 раз большей статистике, чем для аналогичных сценариев при предыдущих параметрах пучка.

Поворот пучка существенно понижает тепловые нагрузки. Максимальная амплитуда в этом случае оказывается порядка 30 кВт/м².

Водородная фаза. Как уже отмечалось, эксперименты с водородной плазмой в ИТЭР предполагается проводить с вдвое пониженным тороидальным полем. Для того чтобы сохранить равновесную конфигурацию неизменной, в расчётах одновременно со снижением поля мы понижали ток и плотность плазмы (половинные тороидальное поле, ток и плотность плазмы). Основные результаты расчётов потерь диагностического пучка для перпендикулярного и базового повёрнутого вариантов на водородной фазе представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Доля потерь мощности диагностического пучка и ассоциированные нагрузки на первую стенку на H-фазе для перпендикулярного и повёрнутого на 6° вариантов

Направление инжекции	Сценарий	Потери мощности, %	Максимальная нагрузка, кВт/м ²
Перпендикулярный	S4	11,4	1768,5
Повёрнутый (6°)	S4	2,88	18,69
Перпендикулярный	S2	21,8	1664,5
Повёрнутый (6°)	S2	6,08	11,9

При пониженной плотности плазмы на водородной фазе диагностический пучок проникает глубже внутрь шнура. Это приводит к некоторому снижению потерь по сравнению с DT-сценариями. Однако снижение тока плазмы приводит к возрастанию гофрировочных эффектов. В результате тепловые нагрузки на стенку при строго перпендикулярной инжекции по-прежнему значительно превосходят допустимый уровень. Характер распределений тепловых нагрузок на первой стенке остаётся таким же, как и в рассмотренном случае DT-плазмы.

Анализ влияния температуры и плотности плазмы. Анализ зависимости потерь от температуры и плотности плазмы проведён для равновесия сценария № 4 с использованием масштабирующих коэффициентов для температуры (одинаковой для электронов и ионов) $0,5 < Gt < 2$ и плотности плазмы $0,5 < Gn < 1,25$. Все локальные значения температуры и плотности умножаются на коэффициенты Gt и Gn . При этом задавалась геометрия инжекции, соответствующая случаю повышенной расходимости пучка и большего размера порта ввода.

Основные результаты показаны на рис. 11—14. Как и ожидалось, для случая строго перпендикулярной инжекции кулоновские столкновения не играют существенной роли. Принципиальное значение для изменения величины тепловых нагрузок при этом имеет изменение профиля захвата пучка при вариации параметров плазмы. В этом отношении изменение плотности плазмы оказывает значительно большее влияние, чем изменение температуры. Рост плотности сопровождается увеличением доли захвата атомов пучка на периферии плазмы, где ионы запираются в локальные гофры и практически мгновенно выносятся на первую стенку, создавая значительные тепловые нагрузки. Эффект вариации температуры плазмы в этих условиях оказывается практически незаметным по сравнению с эффектом вариации плотности.

Рис. 11. Зависимость потерь частиц (1), мощности пучка (2) (а) и тепловых нагрузок на стенку (б) от плотности плазмы при перпендикулярной инжекции

Рис. 12. Зависимость потерь частиц (1), мощности пучка (2) (а) и тепловых нагрузок на стенку (б) от температуры плазмы при перпендикулярной инжекции

Рис. 13. Зависимость потерь частиц (1), мощности пучка (2) (а) и тепловых нагрузок на стенку (б) от плотности плазмы

Для поворнутого пучка, когда потери относительно малы, кулоновские столкновения становятся основным механизмом, определяющим потери. При этом изменение температуры плазмы может оказаться важным. Так, охлаждение периферии плазмы приводит к лучшему удержанию ионов пучка, которые вместо

Рис. 14. Зависимость потерь частиц (1), мощности повернутого пучка (2) (а) и тепловых нагрузок на стенку (б) от температуры плазмы

ухода на стенку теперь термализуются вблизи границы шнура. В свою очередь, изменение плотности влияет как на кулоновское рассеяние, так и на профиль захвата пучка. Так что совокупный эффект вариации плотности оказывается не столь монотонным (однозначным), как в случае строго перпендикулярной инжекции.

Зависимость от угла вращения DNB. В расчётах диапазона возможных углов поворота диагностического пучка мы предполагали, что размер и положение порта ввода на первой стенке фиксированы как для случая базового альтернативного варианта с поворотом на 6° и смещением порта ввода на 53,3 см против часовой стрелки относительно случая строго перпендикулярной инжекции. При этом, изменяя прицельный радиус пучка R_{target} , мы предполагали, что ось инжекции поворачивается относительно центра порта ввода. Расчёты выполнены для пучка с расходимостью 7 мрад для основного компонента и 21 мрад для гало. Размеры порта ввода выбраны 415×485 мм. Амплитуды тепловых нагрузок рассчитывались в предположении, что 3,6 МВт диагностического пучка поступает в плазму. Расчёты проводились для диапазона прицельных радиусов $70 \text{ см} < R_{\text{target}} < 141,3 \text{ см}$. Верхняя граница соответствует базовому альтернативному варианту с поворотом пучка на 6° . Основные результаты расчётов суммированы в табл. 4 и показаны на рис. 14.

Т а б л и ц а 4. Результаты расчётов для различных значений R_{target} для повернутого диагностического пучка (максимальные нагрузки на стенку рассчитывались в секторе инжекции)

R_{target} , см	Потери мощности, %	Максимальная нагрузка, кВт/м ²
70	12	881
87,5	9,2	516,6
105	6,6	212,4
122,5	5	73,14
141,3	3,9	70

Рис. 15. Потери мощности P_{loss} (а) DNB и максимальные тепловые нагрузки (б) на первую стенку P_{wall} в зависимости от величины прицельного радиуса

Таким образом, видно, что наибольший поворот пучка оказывается близким к минимально необходимому для обеспечения безопасного уровня тепловых нагрузок на стенку.

ВЫВОДЫ

Использование исходного варианта строго перпендикулярной инжекции диагностического пучка приводит к экстремально высоким (порядка нескольких МВт/м²) локализованным тепловым нагрузкам на первую стенку вблизи инжекционного порта. Эти нагрузки обусловлены потерями ионов, ионизованных на периферии плазмы, запираемых в локальные гофры магнитного поля.

Поворот диагностического пучка на 6° приводит к существенному снижению тепловых нагрузок. Во всех рассмотренных операционных режимах для повернутого ДП рассчитанные тепловые нагрузки на первую стенку не превышают 0,1 МВт/м².

Показано, что поворот пучка на угол 6° ($R_{\text{target}} = 141,3$ см) оказывается близким к минимально необходимому для снижения тепловых нагрузок ниже предельно допустимого уровня. При меньшем повороте пучка $R_{\text{target}} < 120$ см тепловые нагрузки, ассоциированные с гофрировочными потерями ДП представляют серьёзную угрозу компонентам первой стенки.

Анализ изменений тепловых нагрузок при вариации плотности и температуры плазмы показал, что для базового альтернативного варианта поворота пучка тепловые нагрузки оказываются значительно меньше допустимых, тогда как для строго перпендикулярной инжекции возрастание плотности плазмы на 25% сопровождается ростом тепловых нагрузок вплоть до 5 МВт/м².

REFERENCES

1. **Konovalov S. et al.** Analysis of high energy ion ripple loss in the up-down asymmetric configuration by OFMC plus Mapping HYBRID code. — JAERI-Research, 1994, vol. 94, p. 033.
2. **Konovalov S.V., Putvinski S.V., Saplakhi V.S., Smirnov A.P.** Alpha particle ripple loss in ITER. — In: Proc. of the IAEA Technical Committee Meeting on Alpha Particles in Fusion Research. Kiev, USSR, 1989, vol. 1, p. 107.
3. **Tani K. et al.** — J. of Phys. Soc. Jpn., 1981, vol. 50, p. 1726.
4. **Putvinski S.V., Tubbing B.J.D., Eriksson L.-G., Konovalov S.V.** On the modelling of fast particle ripple losses in tokamaks. — Nucl. Fus., 1994, vol. 34, p. 495.
5. **Putvinski S.V.** — ITER IDM, <https://www.iter.org/>, Energetic particles.
6. **Aleynikov P.B., Dlougach E.D.** (in press).
7. **Dlougach E.D.** www.btr.org.ru.
8. **Schunke B.** — ITER IO, private communication.

AUTHORS

Aleynikov P.B. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; alp@nfi.kiae.ru.

Konovalov S.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; konova@nfi.kiae.ru.

Received 24 April 2011
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2011, issue 4, pp. 103—111.