

К вопросу об эрозии первой стенки установки токамак

ГУСЕВА М. И., ИОНОВА Е. С., МАРТЫНЕНКО Ю. В.

Эрозия поверхности первой стенки термоядерного реактора под действием бомбардировки корпускулярных и электромагнитных излучений горячей плазмы может иметь двойной эффект. С одной стороны, она приводит к уменьшению толщины стенки, вследствие чего ограничивается срок службы вакуумной камеры реактора, с другой — в результате эрозии в плазму забрасываются частицы материала стенки, увеличивающие излучательные потери энергии плазмы и тем самым уменьшающие температуру плазмы и длительность рабочего цикла реактора.

Как показали многочисленные исследования [1—3], основным физическим процессом, ответственным за эрозию поверхности первой стенки, является распыление материала стенки ионами D^+ , T^+ , He^+ . В начальный период рабочего импульса существенное влияние может оказать десорбция находящихся на поверхности загрязнений (в основном кислорода и углерода) под действием электронного удара и электромагнитного излучения. В связи с этим в реакторе должна быть предусмотрена очистка поверхности камеры перед рабочим импульсом с помощью специальных тренировочных разрядов. Как показано в работе [3], коэффициент электронной десорбции, играющей доминирующую роль, должен быть снижен при этом до 10^{-6} моль/электрон.

В течение некоторого периода работы реактора заметный вклад в эрозию стенки может внести также гелиевый блистеринг [2]. Для оценки скорости эрозии стенки за счет распыления и блистеринга необходимо знать потоки и энергии частиц, идущих из плазмы на стенку, коэффициенты распыления S (равные отношению числа атомов мишени, удаляемых с поверхности при распылении, к числу частиц, падающих на поверхность) и коэффициенты эрозии вследствие блистеринга S^* .

При радиационном блистеринге и флехинге (отшелушивании) происходит удаление кусков поверхностного слоя размером 1—100 мкм, но для единообразия коэффициент эрозии S^* выражают также в единицах атом/ион. Полный коэффициент эрозии равен сумме коэффициента распыления и коэффициента эрозии при блистеринге. В качестве крупномасштабного токамака рассмотрим установку Т-20.

Оценку скорости эрозии стенки удобно характеризовать толщиной d , которая удаляется со стенки за год непрерывной работы. Для эрозии только за счет распыления $d = \frac{5,23 \cdot 10^{-17} A}{\alpha \rho} \times (\bar{S}_D q_D + \bar{S}_T q_T + \bar{S}_{He} q_{He}) (1 + \beta \bar{S}_s)$, где A

и ρ — атомная масса и плотность материала стенки; $\bar{S}$ — средние по энергетическому спектру коэффициенты распыления; q — потоки ионов и атомов D , T и He ; $\bar{S}_s$ — средний коэффициент распыления ионами материала мишени; β — коэффициент, дающий долю числа распыленных атомов, которые, термализовавшись в плазме, возвращаются обратно на стенку; α — коэффициент, учитывающий ослабление потока ионов на стенку за счет дивертора. Следуя работе [4], полагаем $\beta = 0,1$. Для оценок предположим также $q_D = q_T = 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\alpha = 1$.

Согласно работе [3] энергетический спектр быстрых атомов D и T , выходящих из плазмы токамака на стенку камеры, хорошо аппроксимируется максвелловским распределением с температурой, соответствующей температуре наружного слоя плазмы. Для приближенной оценки энергетического распределения идущих на стенку быстрых атомов принимаем температуру наружного слоя равной 1 кэВ. Это, по-видимому, верхняя оценка возможной температуры.

На рис. 1 представлены энергетические зависимости коэффициентов распыления S ряда американских [5] и отечественных сталей ионами H^+ , D^+ , He^+ . Используя эти экспериментальные данные, мы рассчитали средние коэффициенты распыления $\bar{S}$ этими частицами с максвелловским распределением по энергии при температуре 1 кэВ: $\bar{S} = 3,4 \cdot 10^{-2}$ атом/ион и $\bar{S}_D = 7 \cdot 10^{-2}$ атом/ион [6].

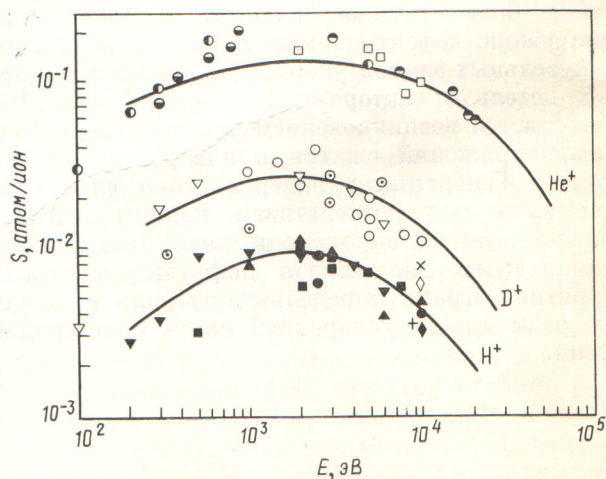


Рис. 1. Зависимость коэффициентов распыления различных нержавеющих сталей ионами H^+ , D^+ , He^+ от энергии: $\times$ — эксперимент для ЭП-125; $\diamond$ — 01X18H40M5; $\blacktriangle$ — АС-9; $\blacktriangledown$ — ЭИ-847; $\blacklozenge$ — 4С-43П; $\bullet$, $\circ$, $\square$, ∇ , $\circ$, $\odot$, $\blacksquare$, $\bullet$, $+$ — эксперимент для сталей 304 и 316 [5]

Коэффициент распыления железа одноименными ионами с энергией 1 кэВ равен 2 атом/ион [7].

Что касается α -частиц, то согласно работе [8] в крупномасштабной установке Т-20 в плазме будет удерживаться не менее 75 % рождающихся высокоэнергетических ионов He^+ . По данным этой работы, в приближении однородной плазмы относительное число уходящих из плазменного шнура α -частиц на стенку при параметрах Т-20 [7] составляет 0,26. В действительности удержание α -частиц в плазме будет значительно лучше, поскольку на стенки камеры будут попадать лишь те α -частицы, которые рождаются в периферийной части плазменного шнура [7]. Для плазмы с параболическим распределением параметров по радиусу число уходящих на стенки высокоэнергетических ионов существенно уменьшается. В работе [7] показано, что в Т-20 отношение значений максимальной плотности потоков α -частиц на стенку камеры для плазмы с параболическим распределением параметров по радиусу и однородной плазмы составляет $3 \cdot 10^{-3}$. С учетом параболического распределения плазмы наибольшему воздействию со стороны α -частиц будут подвергаться участки камеры, характеризующиеся малыми азимутальными углами θ , близкими к $|\theta| \approx 50-60^\circ$ [6, 7].

Распределение α -частиц по углам падения будет приводить к размазыванию профиля распределения вбиваемых в стенку ионов He^+ и уменьшению глубины их проникновения.

На рис. 2 приведен рассчитанный в работе [8] профиль концентрации α -частиц энергией 3,5 МэВ в нержавеющей стали, учитывающий угловое распределение α -частиц. Средняя глуби-

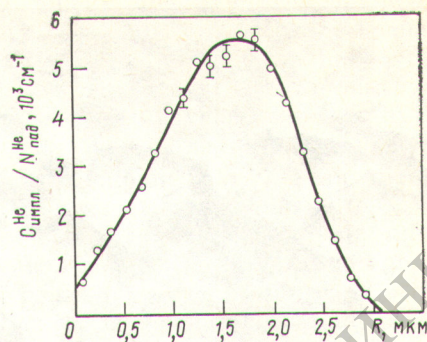


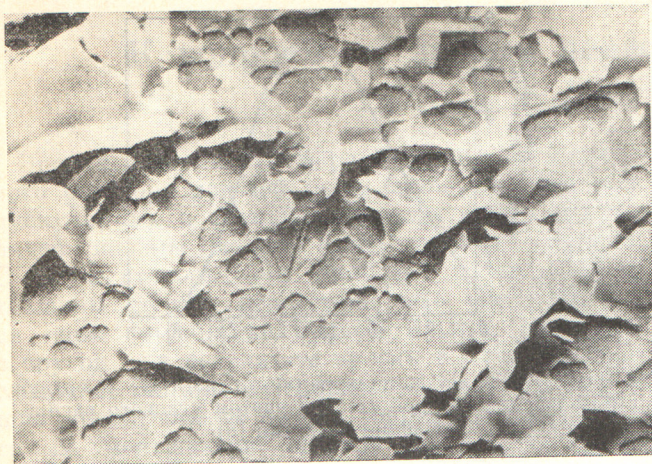
Рис. 2. Профиль концентрации α -частиц энергией 3,5 МэВ в нержавеющей стали с учетом углового распределения α -частиц [8]

на проникновения составляет $R_p \approx 1,6$ мкм, а средний разброс глубин $\Delta R_p \approx 2,5$ мкм, в то время как при нормальном падении ионов He^+ с энергией 3,5 МэВ $R_p \approx 7,5$ мкм, а $\Delta R_p \approx 0,3$ мкм [5]. При ожидающемся распределении ионов He^+ по энергиям $\sim 80\%$ интегральной дозы будет приходиться на интервал энергии 100—350 кэВ (при пересчете на нормальное падение).

Из работы [7] следует, что при концентрации плазмы на оси плазменного шнура $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$ и $T_0 = 15$ кэВ максимальный поток α -частиц на стенку при $\theta \approx 60^\circ$ составляет $8 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$. В работе [8] путем машинного расчета было показано, что средний поток α -частиц на стенку соответствует приблизительно половине максимального значения при $\theta \approx 60^\circ$. С учетом этого примем, что средний поток α -частиц на стенку камеры Т-20 будет составлять $q_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$.

Коэффициенты распыления ионами H^+ , D^+ , T^+ , He^+ ; эрозия стенки за 1 год работы реактора и значения параметра $\bar{S}_Z Z^2$ для различных материалов

Материал	$\bar{S}_{\text{H}}$, атом/ион	$\bar{S}_{\text{D}}$, атом/ион	$\bar{S}_{\text{T}}$, атом/ион	$\bar{S}_{\text{He}}$, атом/ион	d , см	$\bar{S}_Z Z^2$	Литература
Be	$2,8 \cdot 10^{-2}$ [9]	$6,8 \cdot 10^{-25}$ [10, 11]	$1,3 \cdot 10^{-2}$ [10, 11]	0,54 [10, 11]	$6,4 \cdot 10^{-2}$	13,2	[9], [6, 11]
В	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	0,41	$5,5 \cdot 10^{-2}$	15,2	[9]
Углеродистая сталь	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$4,45 \cdot 10^{-2}$	0,13	$2,4 \cdot 10^{-2}$	7,2	[12, 6]
Al	$1,3 \cdot 10^{-3}$ — $-2,2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$ — $-5 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-3}$ — $-2,7 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$ — $-7,4 \cdot 10^{-1}$ [11—13]	$6,3 \cdot 10^{-3}$ — $-2,5 \cdot 10^{-1}$	8,5—182,8	[11, 13]
Ti	$4,7 \cdot 10^{-3}$ [2]	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$ [11]	$2,7 \cdot 10^{-2}$	51,2	[2], [11, 6]
V	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	0,12	$3,9 \cdot 10^{-2}$	101,8	[6, 11]
OX16H15M3E	$1 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	0,23	$6,4 \cdot 10^{-2}$	213	
Mo	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	150	[2]
W	$3 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	79	[11, 6]
SiC	$7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	0,12	$1,4 \cdot 10^{-2}$	19,2	[2]
TiC	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	27	[9, 6]
BeO	$4 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,24	0,86	$1 \cdot 10^{-1}$	57,6	[9, 6]
B $_4$ C	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-2}$	0,34	$4,1 \cdot 10^{-2}$	69,7	[9, 6]
Al $_2$ O $_3$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	0,135	0,24	0,75	$1,1 \cdot 10^{-1}$	44	[9, 6]
SiO $_2$	$4 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,23	0,69	$2 \cdot 10^{-1}$	109	[9, 6]
TiB $_2$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,86 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$	0,18	$3,3 \cdot 10^{-2}$	33,4	[9, 6]



Р и с. 3. Микроструктура поверхности нержавеющей стали ЭИ-847 после облучения ионами He^+ энергией 100 кэВ при $T_{\text{обл}} \approx 200^\circ\text{C}$ и $D_{\text{обл}} = 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

Коэффициент распыления нержавеющей стали ионами He^+ с энергией 100 кэВ составляет 0,02 атом/ион. Подставляя в приведенную выше формулу эти значения q_{He} и $\bar{S}_{\text{He}}$, а также аналогичные данные для дейтерия, трития [$q_{\text{D}} = q_{\text{T}} \approx 10^{15} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ (см. таблицу), получим, что скорость эрозии стенки из нержавеющей стали за счет распыления ионами T^+ , D^+ , He^+ , Fe^+ будет составлять 0,26 мм/год (без учета дивертора). При этом распыление стенки высокоэнергетическими ионами гелия пренебрежимо мало по сравнению с распыляющим действием атомов изотопов водорода, потоки которых на стенку более чем на три порядка превышают потоки α -частиц. Следовательно, за 5 лет работы установки распылится слой стенки толщиной 1,3 мм.

Как уже отмечалось, наряду с распылением существенный вклад в разрушение первой стенки может внести радиационный блистеринг [1, 2, 5]. На рис. 3 представлена типичная картина повреждения поверхности нержавеющей стали ЭИ-847 после облучения ионами He^+ энергией 100 кэВ. Рассчитанная по микрофотографии скорость эрозии S^* составляет 0,71 атом/ион. Степень повреждения поверхности при гелиевом блистеринге существенно зависит от температуры и дозы облучения. Максимальная эрозия для различных аустенитных нержавеющих сталей наблюдается в области температур (0,34—0,43) $T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ — температура плавления) [14, 15]. В частности, для стали ЭИ-847 скорость эрозии максимальна при $T_{\text{обл}} = 400^\circ\text{C}$ и для дозы $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ $S^* = 0,95$ атом/ион.

Для грубой оценки скорости эрозии первой стенки Т-20 вследствие имплантации в нее ионов гелия примем $S^* = 1$ атом/ион. При ожидаемых в Т-20 потоках высокоэнергетических ионов He^+ за год непрерывной работы в стенку будет внедре-

но $2,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Тогда за год скорость ее эрозии составит $3 \cdot 10^{-3}$ мм/год, т. е. на два порядка меньше, чем за счет суммарного распыления ионами D^+ и T^+ .

Следует, однако, иметь в виду, что все проводившиеся до сих пор эксперименты были в значительной степени модельными, поскольку изучалось воздействие на материалы различных корпускулярных излучений плазмы (каждого в отдельности), в то время как в реальных условиях стенка будет облучаться всеми этими частицами одновременно. Вследствие синергического эффекта интегральное воздействие корпускулярного излучения плазмы на стенку может существенно отличаться от простой арифметической суммы воздействий отдельных компонентов. Эффект синергизма в первую очередь может оказать значительное влияние на закономерности блистерообразования. Следует ожидать, например, что дозы обрыва блистеринга [16] будут в значительной степени снижены вследствие распыления оболочек блистеров интенсивными пучками ионов D^+ и T^+ . С другой стороны, критические дозы блистерообразования при одновременном облучении ионами гелия и водорода уменьшаются, и эрозия поверхности усиливается.

Изучение роли синергизма, поведения материалов в условиях, близких к ожидающимся в реальных термоядерных реакторах, — дело ближайшего будущего.

Таким образом, приближенный анализ показывает, что износ поверхности первой стенки в Т-20 будет в основном определяться распылением низкоэнергетическими ионами изотопов водорода. За пятилетний срок работы реактора износ материала стенки из нержавеющей стали составит 1,3 мм (без учета работы дивертора). Для обеспечения надежного теплоотвода и предотвращения механических напряжений за счет перепада температуры толщина стенки не должна превышать ~2 мм. Кроме того, вследствие больших атомных номеров компонентов, входящих в нержавеющие стали, продукты эрозии нержавеющей стали, попадая в плазму, вызовут ее охлаждение за счет излучения. Мощность излучения приблизительно пропорциональна параметру $\bar{S}_Z Z^2$ [3]. Поскольку излучение будет выносить 30—50 % энергии плазмы, применение первой стенки из нержавеющей стали значительно понизит к. п. д. реактора. Если в качестве материала первой стенки используется нержавеющая сталь, то возможно следующее решение проблемы защиты стенки.

1. Создание покрытий, возобновляемых непосредственно в реакторе во время его остановок между рабочими импульсами.

2. Создание экрана, несущего всю (за исключением нейтронов) радиационную и тепловую нагрузку. Тепло с экрана отводится за счет из-

лучения. Экран необходимо делать из термостойких материалов.

3. Создание невозобновляемых покрытий, скорость эрозии которых была бы на порядок ниже, чем у нержавеющей стали, и эрозия покрытия составляла бы не более 0,1 мм за всю кампанию в течение 5 лет.

Основные требования, предъявляемые к материалам и покрытиям экрана, следующие:

1) термостойкость; экран должен работать в режиме охлаждения за счет излучения;

2) покрытия, наносимые на экран, должны иметь хорошую адгезию при температурной нагрузке (включая термоциклирование) и в условиях ионной бомбардировки;

3) толщина покрытий, наносимых на экран, должна быть достаточна для работы в течение всей кампании;

4) минимальные значения параметра $\bar{S}_Z Z^2$;

5) покрытия могут наноситься на различные термостойкие материалы.

Конструктивно каждый элемент экрана может представлять собой небольшую пластинку.

К возобновляемым и невозобновляемым покрытиям предъявляются такие основные требования:

1) хорошая адгезия с нержавеющей сталью в условиях ионной бомбардировки;

2) температура покрытий во время работы, как и температура нержавеющей стали, не должна превышать 200—400° С, но возможно термоциклирование при работе реактора. Покрытия должны иметь достаточную теплопроводность для охлаждения с помощью теплоотвода через стенку из нержавеющей стали;

3) минимальные значения $\bar{S}_Z Z^2$;

4) кроме того, у возобновляемых покрытий должна быть простая технология нанесения покрытия на стенки реактора без его разборки во время остановки реактора и толщина возобновляемого покрытия может быть не очень большой, но, по-видимому, следует наносить покрытия толще, чем глубина проникновения ионов гелия энергией ~300 кэВ, что составляет 4—10 мкм в зависимости от материала покрытия.

Невозобновляемые покрытия, как указывалось ранее, должны иметь малые коэффициенты эрозии, при которых покрытие толщиной 0,1 мм выдержит весь ресурс работы реактора.

Все покрытия и экраны должны быть экономически целесообразны. В качестве материала для экрана могут быть использованы графит (например, углесталл [12]), карбиды легких металлов [9, 17] и кремния [18] (см. таблицу).

Можно отметить, что в настоящее время в достаточной мере освоенным возобновляемым покрытием является титан. По-видимому, целесообразно также исследовать возможность нанесения покрытий из бериллия. Покрытия из титана

обладают рядом преимуществ: технология нанесения их освоена и была использована на РЛТ в рабочем режиме, когда была получена плазма с температурой 5,5 кэВ; титановые покрытия улучшают вакуум в камере и способствуют снижению $Z_{эф}$ плазмы; коэффициенты распыления и в особенности параметр $\bar{S}_Z Z^2$ для титана ниже, чем для нержавеющей стали (см. таблицу); титановые покрытия препятствуют проникновению изотопов водорода в стенку из нержавеющей стали, на которую они нанесены, поскольку растворимость водорода в титане значительно больше, чем в нержавеющей стали; в титане благодаря очень высокой растворимости водорода практически исключается водородный блистеринг.

Для титановых покрытий возникает проблема наводороживания титана и его отшелушивания. Однако, как показали эксперименты [10], тонкие титановые пленки восстанавливаются из гидрида титана при значительно более низкой температуре, чем массивные образцы. Это обусловлено тем, что в тонких пленках определяющим процессом восстановления является разложение гидрида, а не диффузия водорода, а распад гидрида происходит при $T \approx 250^\circ \text{C}$ [10]. Так, титановые пленки толщиной $\sim 1000 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) могут быть восстановлены примерно за 1 с при $T \approx 300^\circ \text{C}$. Следует отметить, что в сплаве Ti—Al—V, который можно использовать в качестве покрытия, при температуре $\geq 300^\circ \text{C}$ гидриды не образуются не только в тонких пленках, но и в массивных образцах. Покрытия из титановых сплавов перспективны, но необходимы более детальные исследования.

Бериллиевые покрытия имеют еще более низкие значения параметра $\bar{S}_Z Z^2$ и лучшую теплопроводность, чем титановые. Однако коэффициенты распыления бериллия сравнимы с S для нержавеющей стали (см. таблицу), и покрытия из бериллия менее термостойки, чем из титана. Технология работы с бериллием значительно сложнее.

Для невозобновляемых покрытий нужны материалы с очень низкими коэффициентами распыления. В связи с этой проблемой представляет большой интерес поиск и создание материалов с малым коэффициентом эрозии.

Итак, можно сказать, что в настоящее время наилучшими путями решения проблемы первой стенки являются создание возобновляемого покрытия из напыляемого титанового сплава Ti—Al—V (ПТ-3В) на нержавеющей стали; создание экрана, несущего радиационную и тепловую нагрузки. В качестве материала для такого экрана можно рекомендовать углесталл или графит МПГ-7 при температуре выше 700°C , а также карбид титана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaminsky M. In: Proc. Intern. Summer Institute in Surface Science. Wisconsin, 1975.
2. Behrisch R. Plasma Wall Interaction. Pergamon Press, Oxford, N.Y., 1977.
3. Гусев В. М. и др. Препринт ИАЭ-25456. 1975.
4. Kulchinsky G., Emmert G. «J. Nucl. Mater.», 1974, v. 53, p. 31.
5. Bauer W. Surface Processes in Plasma Wall Interactions, Sand 78-86-34, 1978.
6. Гусева М. И., Мартыненко Ю. В. «Физика плазмы», 1977, т. 2, № 4, с. 593.
7. Колесниченко Я. И., Фурса А. Д., Яворский В. А. «Физика плазмы», 1976, т. 2, № 6, с. 911.
8. Bauer W. e.a. «Nucl. Fusion», 1979, v. 19, N 1, p. 93.
9. Mattox D., Sharp D. «Low Energy Hydrogen Ion Erosion Yields as Determined with a Kaufman Ion Source». Sand 78-1029, 1978.
10. Malinorosky M. The Desorption of T_1D_2 films Formed During Simulated Tokamak Dettering Cycles. Sandia Laboratories Livermore, C. A. 94550, USA, 1979.
11. Ken Knight C., Wehner G. «J. Appl. Phys.», 1964, v. 35, p. 322.
12. Бушаров Н. П. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 6, с. 486.
13. Rosenberg J., Wehner G. «J. Appl. Phys.», 1962, v. 33, p. 1842.
14. Gusev V. M. e.a. The Temperature Dependence of Blistering under Helium Ion Irradiation. Soviet-American Topical Meeting. Argonne, 1979.
15. Kaminsky M., Das S., Sunha M. «J. Appl. Phys.», 1978, v. 49(1), p. 170.
16. Gusev V. M. e.a. «Rad. Effects», 1979, v. 44, p. 37.
17. Bohdanský J., Bay H., Ottenberger W. «J. Nucl. Mater.», 1976, v. 76, p. 163.
18. Behrish R. In: VII Intern. Conf. on Atomic Collis. in Solids. Moscow, 1977.

Поступила в Редакцию 4.06.79

УДК 539.125.516.4.07

Измерение спектров потока УХН магнитным интегральным спектрометром

КОСВИНЦЕВ Ю. Ю., КУШНИР Ю. А., МОРОЗОВ В. И.

Измерение спектров потока ультрахолодных нейтронов (УХН) — одна из наиболее трудных задач в технике экспериментирования с УХН. Практически все существующие способы измерений спектров потока основаны на сепарации УХН по энергии в поле тяжести Земли. В связи с этим для анализа спектров потока УХН энергией $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ эВ применяются довольно громоздкие устройства. Например, часто использующийся гравитационный спектрометр в виде П-образного колена имеет полную длину нейтроновода не менее 4 м [1]. Учет поглощения УХН в стенках нейтроновода и влияния последнего на форму измеряемого спектра довольно труден из-за сложного характера движений нейтронов в колене.

Искажений спектра, обусловленных большим числом столкновений УХН со стенками спектрометра, можно избежать, если для сепарации УХН по энергии использовать их способность отражаться от энергетического барьера, создаваемого магнитным полем в ограниченной области пространства [2, 3]. Для УХН со спином, ориентированным по полю, высота барьера $E_b = \mu B$, где μ — магнитный момент нейтрона; B — магнитная индукция. Численно $E_b = 60,3$ В нэВ, где B — магнитная индукция, выраженная в теслах.

Чтобы получить энергетический барьер 100 нэВ, необходимо магнитное поле 1,7 Тл, которое сравнительно просто реализуется при помощи электромагнита в зазоре ~ 1 см. Это дает возможность создать интегральный магнитный спектрометр с коротким нейтроноводом, проходя через

который УХН будут испытывать небольшое число ударов о стенки. Магнитный интегральный спектрометр такого типа был использован для измерения спектров потока УХН на реакторе СМ-2 (рис. 1).

Основная часть спектрометра — электромагнит, состоящий из ярма, полюсов с профилированными полюсными наконечниками и катушек возбуждения. Торцы полюсных наконечников представляют собой прямоугольники площадью 1×10 см. Обмотки катушек охлаждаются сжатым воздухом. Максимальное значение индукции магнитного поля в зазоре 1 см между полюсными наконечниками при токе 140 А через катушки возбуждения 2,6 Тл. В зазоре электромагнита

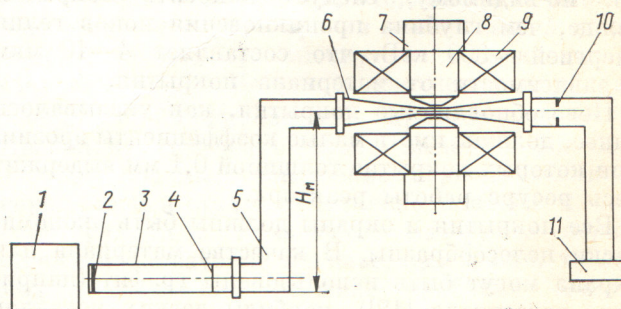


Рис. 1. Измерение спектров потока УХН магнитным интегральным спектрометром: 1 — активная зона реактора; 2 — конвертор УХН; 3 — транспортный нейтроновод; 4 — алюминиевая мембрана; 5 — поворотное колено; 6 — нейтроновод спектрометра; 7 — ярмо; 8 — полюса электромагнита; 9 — катушки возбуждения; 10 — диафрагма; 11 — детектор УХН