УДК 621.039.634

ОЦЕНКА СРОКА СЛУЖБЫ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТИН С УЧЁТОМ ЕЁ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПЛАЗМОЙ

А.Ю. Пашков

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Для оценки возможности применения предложенной конструкции первой стенки (ПС) необходимо определить её возможный срок службы. Одним из факторов, ограничивающих срок службы ПС, является её эрозия при взаимодействии с плазмой. В работе сделана оценка скорости эрозии ПС установки ТИН (термоядерный источник нейтронов) с учётом воздействия только этого фактора. Описаны конструктивные особенности ПС и методика расчёта процессов её радиационной эрозии при стационарной работе ТИН, а также эрозии при срывах плазмы. Сделаны выводы о возможном сроке службы ПС при различных условиях её эксплуатации.

Ключевые слова: установка ТИН, первая стенка, распыление, срыв плазмы, эрозия, срок службы.

THE ASSESMENT OF THE FIRST WALL LIFETIME FOR DESIGNED FNS FACILITY WITH ACCOUNTING OF ITS INTERACTION WITH PLASMA

A.Yu. Pashkov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

For assessment the possibility of the application the first wall offered design it is necessary to determine its possible lifetime. The first wall erosion process caused by the interaction with the plasma is one from main factors, that restrict the first wall lifetime. In this article is made the assessment of the first wall erosion processes rate for designed thermonuclear neutron source. The design peculiarity of the first wall was described. The method of the calculations the sputtering and erosion processes rate was given. The influence on the first wall the plasma disruption process was examined. It was appraised the first wall possible lifetime by different conditions of the exploitation.

Key words: thermonuclear neutron source, first wall, sputtering, plasma disruption, erosion, lifetime.

ВВЕДЕНИЕ

Ожидаемый срок службы первой стенки (ПС) установки ТИН является одним из критериев, определяющих возможность применения предложенной конструкции. Срок службы ПС ограничен такими факторами, как её взаимодействие с плазмой, воздействие циклических нагрузок при включении и выключении установки, радиационные повреждения материалов, качество изготовления и пр. В данной работе рассматриваются лишь те ограничения срока службы ПС, которые связаны с её взаимодействием с плазмой.

КОНСТРУКЦИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ

Рассматриваемая конструкция ПС предложена в [1], её конструктивные особенности представлены на рис. 1, 2, 3. ПС состоит из двух оболочек — стальной (сталь 316L) и бронзовой (CuCrZr), между которыми течёт теплоноситель (вода) с температурой на входе 50 °С, на выходе 100 °С. Со стороны плазмы на поверхность стенки устанавливаются бериллиевые плитки переменной толщины, скреплённые с бронзой промежуточным медным слоем. Общий вид ПС представлен на рис. 1.

Рис. 1. Схема конструкции первой стенки установки ТИН:
■ — бериллиевая плитка; ■ — промежуточный медный слой; ■ — бронзовая оболочка; ■ — стальная оболочка

Рис. 2. Вид первой стенки без бериллиевой плитки и промежуточного медного слоя

Вид первой стенки без бериллиевых плиток и промежуточного медного слоя (для наглядности) показан на рис. 2, где в верхней части показана бронзовая (CuCrZr) оболочка с характерными прессованными углублениями (пуклёвками). Основные размеры ПС в характерном сечении представлены на рис. 3.

Оболочки, составляющие ПС, прикреплены друг к другу сваркой в местах пуклёвок в бронзовом сплаве. Минимальная толщина бериллиевой плитки $h_{\text{мин}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, максимальная $h_{\text{макс}} = 9 \cdot 10^{-3}$ м. Предполагается, что когда толщина распылённого слоя бериллия достигает $h_{\text{мин}}$, то работоспособность ПС утрачивается.

При большом радиусе ТИН $R = 0,5$ м, малом радиусе $r = 0,3$ м и коэффициенте вытянутости плазмы 2,75 общая площадь поверхности ПС и дивертора составит ~ 12 м², из них площадь ПС $S_{\text{пс}} \sim 8$ м².

Как предполагается, установка ТИН будет работать в стационарном режиме — календарный срок 30 лет с коэффициентом готовности, различным на различных этапах её эксплуатации. Время работы установки на i -м этапе обозначим $\tau_{\text{раб}}^i$, её суммарное время работы к концу i -го этапа $t_{\text{раб}}^i = \sum \tau_{\text{раб}}^i$.

Если обозначить время простоя установки, вызванное ремонтом, плановым обслуживанием и т.п. на i -м этапе эксплуатации $\tau_{\text{пр}}^i$, то коэффициент готовности для i -го этапа

В табл. 1 приведены ожидаемые значения K_{Γ}^i на различных этапах эксплуатации, $\tau_{\text{раб}}^i$ и $t_{\text{раб}}^i$ ТИН к концу каждого этапа эксплуатации.

Номер этапа	Годы эксплуатации установки, считая от момента пуска	Коэффициент готовности на этапе $K_{г}^i$	$\tau_{\text{раб}}^i$, с	$t_{\text{раб}}^i$, с
1	1—3	0,05	$4,73 \cdot 10^6$	$4,73 \cdot 10^6$
2	4—5	0,1	$6,31 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^7$
3	6—10	0,3	$4,73 \cdot 10^7$	$5,8 \cdot 10^7$
4	11—30	0,5	$3,15 \cdot 10^8$	$3,73 \cdot 10^8$

Взаимодействие плазмы с материалом ПС приводит к его радиационной эрозии, в результате которой слой материала становится тоньше, а плазма загрязняется примесями [2].

Основными механизмами радиационной эрозии являются:

- физическое и химическое распыление, вызываемое ионами, атомами и нейтронами;
- шелушение, обусловленное блистерингом и (или) флехингом в результате внедрения в материал малорастворимых газов (в основном гелия);
- скалывание, растрескивание и локальное испарение в результате выбросов (срывов) плазмы и образования униполярных дуг;
- испарение материала;
- десорбция примесей с поверхности и другие факторы.

Физическое распыление материалов. Главным фактором, определяющим процесс физического распыления материала, является коэффициент распыления Y , который равен числу выбитых из поверхности материала атомов, приходящихся на одну бомбардирующую частицу.

Распыление поверхности частицами плазмы представляет собой сложный процесс, зависящий от материала и температуры поверхности, вида и энергии падающих частиц и угла их падения, интенсивности падающего потока. Процесс распыления включает в себя также перенасыщение на поверхность распылённых частиц и самораспыление (распыление поверхности частицами, ранее распылёнными с ней). Скорость утончения материала (линейную скорость распыления) аналитически определить нельзя вследствие ряда причин: неизвестны точные энергетические спектры, угловые распределения и потоки частиц и излучения на ПС; для ряда механизмов распыления (срывы плазмы, униполярные дуги) не определены их частота и плотность энерговыделения при этих процессах, не определён ряд других параметров, влияющих на скорость распыления. Однако возможно провести оценку линейной скорости распыления материала, приняв допущения об аддитивности парциальных коэффициентов эрозии для разных частиц, об усреднении коэффициентов распыления по энергетическому спектру каждой частицы и об отсутствии химического взаимодействия частиц с материалом. С учётом принятых допущений величину Y можно определить по формуле

$$Y = \Sigma(Y_i F_i / F), \quad (1)$$

где Y_i — средний парциальный коэффициент распыления материала i -ми частицами (атомами и ионами изотопов водорода, гелия и попавших в плазму примесей); F_i — плотность потока i -х частиц, част./($\text{м}^2 \cdot \text{с}$); F — суммарная плотность потока частиц из плазмы, част./($\text{м}^2 \cdot \text{с}$).

Линейную скорость распыления можно оценить по формуле

$$v = M_{\text{ат}} F Y / \rho, \quad (2)$$

где $M_{\text{ат}}$ — масса атома распыляемого вещества (бериллия) $1,5 \cdot 10^{-26}$ кг; ρ — плотность распыляемого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; v — линейная скорость распыления, м/с. Если умножить v на число секунд в календарном году, то получим скорость распыления, выраженную в единицах м/год горения плазмы.

Массовая скорость распыления поверхности, выраженная в единицах массы с 1 м^2 в секунду:

$$V_{\text{м}} = v \rho \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (3)$$

Количество распылённого бериллия за рассматриваемое время работы ТИН-СТ $t_{\text{раб}}^i$ и, соответственно, количество образовавшейся бериллиевой пыли

$$M_{\text{пи}} = V_{\text{м}} S_{\text{пс}} t_{\text{раб}}^i \text{ кг}. \quad (4)$$

Толщину распылённого слоя h^i к концу i -го этапа эксплуатации можно оценить по формуле

$$h^i = v t_{\text{раб}}^i. \quad (5)$$

Время утраты работоспособности ПС (когда $h_i = h_{\text{мин}}$)

$$t_{\text{отказ}} = h_{\text{мин}} / v. \quad (6)$$

Параметры пристеночной плазмы сильно меняются в полоидальном направлении ПС, соответственно величины F и Y имеют переменное значение. Как ожидается, значение F будет находиться в диапазоне 10^{21} — 10^{23} част./($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Значение величины Y зависит от многих факторов и обычно измеряется экспериментально. Согласно [3] она изменяется следующим образом: при достижении пороговой энергии ио-

нов ~ 10 эВ Y начинает быстро расти от 0 до максимума при энергии ионов ~ 200 эВ, затем в диапазоне энергии ионов 200—1000 эВ Y медленно уменьшается. В ожидаемом диапазоне энергии пристеночной плазмы 10 эВ — 1 кэВ Y находится в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}$ —0,22. В [4] экспериментальное исследование величины Y показало хорошее совпадение с результатами [3].

Химическое распыление поверхности происходит, когда частицы плазмы образуют легколетучие соединения с её материалом. В нашем случае происходит взаимодействие водородно-гелиевой плазмы с бериллием. Образующийся гидрид бериллия неустойчив при ожидающейся температуре поверхности $T_{\text{пов}} = 450$ —550 К, и явление химической эрозии не будет иметь место.

Шелушение поверхности материалов. Процесс шелушения поверхности материала при её взаимодействии с ионами гелия зависит от соотношения доз облучения ионами низкой и высокой энергии, критической дозы начала шелушения, дозы обрыва и коэффициента распыления за счёт шелушения. Необходимо учесть также распыление, вызываемое кратерным механизмом после обрыва шелушения ионами низкой энергии. Как представляется, в нашем случае процесс шелушения будет заторможен вследствие воздействия срывов плазмы и ELM-процессов. При этих событиях происходит значительный выброс энергии на поверхность ПС, сопровождающийся её разогревом и частичным плавлением, что приведёт к существенному снижению содержания в ней атомов гелия. Поэтому влияние процесса шелушения на утончение ПС не будем учитывать.

Скалывание, растрескивание и локальное плавление. Процессы скалывания, растрескивания, локального плавления, сопровождающегося перемещением расплавленного слоя и расплескиванием капель расплава, а также испарение поверхности в результате срывов плазмы объединяются под общим названием «макроскопические механизмы эрозии».

При проектировании установки ИТЭР сделан вывод, что процесс срыва плазмы длится $\tau_{\text{ср}} = 0,1$ —1 мс и сопровождается воздействием на ПС тепловой нагрузки $Q = 0,2$ —5 МДж/м². Плотность теплового потока $P = Q/\tau_{\text{ср}}$ будет находиться в диапазоне $(0,2$ —50) 10^9 Вт/м².

Число срывов за срок службы ИТЭР ожидается порядка 500—1000. Примем, что эти значения будут характерны и для ТИН.

Экспериментальное моделирование «макроскопических механизмов эрозии» на поверхности из вольфрама при тепловой нагрузке и длительности её воздействия, близкой к ожидаемой, было выполнено в [5]. Установлено, что при $Q = 1$ МДж/м² начинается плавление вольфрама, при $Q = 1,2$ МДж/м² начинается стабильный выброс капель расплава, при Q выше 1,9 МДж/м² начинается кипение вольфрама.

В общем случае величину $P_{\text{кип}}$, при которой (и при более высоких плотностях теплового потока) материал поверхности к концу срыва плазмы закипит, можно оценить по формуле из [6]

$$P_{\text{кип}} \sim \lambda T_{\text{кип}} / (2(A\tau_{\text{ср}})^{1/2}), \quad (7)$$

где λ — коэффициент теплопроводности твёрдого материала, Вт/(м·К); $T_{\text{кип}}$ — температура кипения материала, К; A — коэффициент температуропроводности твёрдого материала при температуре плавления, м²/с.

В [7] экспериментально исследовалась эрозия образцов различных металлов (вольфрама, стали, ниобия, меди и алюминия) при воздействии на них импульсных потоков плазмы с параметрами, близкими к ожидаемым в ИТЭР и ТИН. При этом величина Q изменялась в диапазоне 0,5—4,5 МДж/м², величина P при длительности импульса 0,5 мс находилась в диапазоне $(1$ —9) 10^9 Вт/м². Теплофизические свойства исследованных материалов, а также бериллия приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Теплофизические свойства материалов по данным [8]*

Материал	Температура плавления, К	Температура кипения, К	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоёмкость, Дж/кг·К	Плотность, кг/м ³	Коэффициент температуропроводности, м ² /с
Алюминий	933	2792	217	1256	2550	$68 \cdot 10^{-6}$
Медь	1357	2840	317	525	8400	$72 \cdot 10^{-6}$
Сталь нержавеющая	Более 1700	Более 3100	30,5	690	7400	$6 \cdot 10^{-6}$
Ниобий	2750	5015	85	444	7800	$24 \cdot 10^{-6}$
Вольфрам	3695	5828	99	270	17 500	$21 \cdot 10^{-6}$
Бериллий	1550	3243	44—70	3330	1690	$(8$ — $12)10^{-6}$

*Теплопроводность, теплоёмкость, плотность и коэффициент температуропроводности даны для твёрдого вещества при температуре плавления. Теплопроводность бериллия и коэффициент температуропроводности зависят от способа его получения.

Установлено, что глубина эрозии $\Delta x_{\text{эр}}$ образцов растёт с ростом Q и её зависимость от Q и, соответственно, P носит нелинейный характер. В табл. 3 приведены измеренные значения $\Delta x_{\text{эр}}$ при различных значениях P и вычисленное по (7) значение $P_{\text{кип}}$.

Таблица 3. Экспериментально определённая глубина эрозии

Материал	Расчётное значение $P_{\text{кип}}$, Вт/м ²	Экспериментальное значение $\Delta x_{\text{эр}}$, м, при $P = 1 \cdot 10^9$ Вт/м ²	Экспериментальное значение $\Delta x_{\text{эр}}$, м, при $P = 4,8 \cdot 10^9$ Вт/м ²	Экспериментальное значение $\Delta x_{\text{эр}}$, м, при $P = 9 \cdot 10^9$ Вт/м ²
Алюминий	$0,8 \cdot 10^9$	10^{-8}	10^{-4}	Нет данных
Медь	$2,4 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	10^{-5}	10^{-4}
Сталь нержавеющая	$0,8 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	10^{-5}	$8 \cdot 10^{-5}$
Ниобий	$2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{-9}$	10^{-6}	10^{-5}
Вольфрам	$2,8 \cdot 10^9$	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Бериллий	$(1,1—1,5) \cdot 10^9$	—	—	—

Для вольфрама значение $P_{\text{кип}}$ соответствует при длительности импульса плазмы 0,5 мс значению $Q = 1,4$ МДж/м², что близко к измеренной величине начала кипения $1,9$ МДж/м².

Анализ экспериментальных результатов и данных табл. 2 показывает, что $\Delta x_{\text{эр}}$ материала зависит в значительной степени от его $T_{\text{пл}}$. Чем выше $T_{\text{пл}}$, тем меньше глубина эрозии. Большее значение $\Delta x_{\text{эр}}$ для вольфрама, который обладает более высокой $T_{\text{пл}}$ по сравнению с ниобием, объясняется, по-видимому, влиянием других свойств этого материала. Максимальная $\Delta x_{\text{эр}}$ для алюминия объясняется его самой низкой из исследованных образцов $T_{\text{пл}}$. Максимальные значения $\Delta x_{\text{эр}}$ наблюдаются при значениях P , превышающих $P_{\text{кип}}$, т.е. при кипении материала.

Так как $T_{\text{пл}}$ бериллия меньше, чем у ниобия и вольфрама, но больше, чем у алюминия, и близка к $T_{\text{пл}}$ меди и стали, то следует ожидать, что его $\Delta x_{\text{эр}}$ будет близкой к $\Delta x_{\text{эр}}$ меди и стали. Вероятно, в рассматриваемом диапазоне значений $P = (1—9) \cdot 10^9$ Вт/м² $\Delta x_{\text{эр}}$ бериллия будет лежать в диапазоне $10^{-8}—10^{-4}$ м за импульс, при этом будут наблюдаться его плавление и разбрызгивание, так как $P_{\text{кип}}$ практически совпадает с минимальной плотностью действующего теплового потока.

Большая неопределённость исходных данных при срыве и сложность происходящих при этом процессов (например, смещение расплавленного слоя под действием магнитного поля и давления плазмы, влияние гравитационных сил, вибрации ПС, экранирующее влияние испаренного материала) позволяют лишь приближенно оценить толщину испаренного и расплавившегося, т.е. эродировавшего материала.

Толщину слоя материала ПС, прогретого при срыве плазмы до температуры плавления и, соответственно, расплавившегося, можно оценить по формуле

$$\Delta x_{\text{распл}} = (2A\tau_{\text{ср}})^{1/2}, \quad (8)$$

где $\Delta x_{\text{распл}}$ — толщина слоя расплавленного материала, м.

Сделать оценку $\Delta x_{\text{распл}}$ можно другим способом — составить уравнение теплового баланса для элемента поверхности ПС площадью ΔS :

$$\Delta SQ = \Delta S \Delta x_{\text{распл}} \rho C_p (T_{\text{пл}} - T_{\text{пов}}) + \Delta S \Delta x_{\text{распл}} \rho \lambda_{\text{плав}}, \quad (9)$$

где $\lambda_{\text{плав}}$ — теплота плавления материала поверхности (в нашем случае бериллия), Дж/кг. После преобразований и подстановки численных значений (9) запишется в виде

$$\Delta x_{\text{распл}} = (1,4—1,5) 10^{-10} Q. \quad (10)$$

Формула (10) выведена в предположении, что вся тепловая энергия плазмы, попавшая на ПС при срыве, пойдёт на разогрев и плавление материала в слое $\Delta x_{\text{распл}}$. В действительности тепловая энергия пойдёт и на разогрев материала ПС, оставшегося твёрдым, и на испарение расплавившегося материала, и на тепловое излучение ПС. Значение $\Delta x_{\text{распл}}$, полученное по (10), будет завышенным и даст максимальную оценку глубины эрозии при срыве плазмы.

Испарение материала. Скорость испарения металлического бериллия при температуре выше 1000 К исследована экспериментально [8]. Установлено, что с ростом температуры бериллия скорость испарения растёт, давление окружающей среды влияет на неё незначительно. При температуре бериллия 1000 К и давлении окружающей среды менее 0,13 Па массовая скорость испарения составляет 10^{-13} г/(см²·с), или 10^{-12} кг/(м²·с). Как будет показано дальше, эта величина на несколько порядков

меньше, чем линейная скорость физического распыления бериллия падающими на него ионами. К тому же при ожидаемой рабочей температуре поверхности ПС 450—550 К массовая скорость испарения бериллия будет ещё меньше, и процессом испарения поверхности при дальнейших оценках можно пренебречь.

Десорбция примесей. Десорбцией примесей с поверхности ПС также можно пренебречь, так как это явление будет иметь место только в начальный период работы ТИН.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ФИЗИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ

Расчёт скорости распыления проводился в трёх вариантах: «минимальном» (при минимальных значениях F и Y , что обуславливает минимальное значение v), «среднем» (при средних ожидаемых значениях F и Y) и «максимальном» (при максимальных значениях F и Y , что обуславливает максимальное значение v).

Значения скорости распыления ПС и количество образовавшейся бериллиевой пыли, вычисленные по формулам (2)—(6), даны в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Результаты расчётов

Вариант	Минимальный	Средний	Максимальный
Среднее значение Y	10^{-4}	0,05	0,22
Среднее значение F , част./($m^2 \cdot c$)	10^{21}	10^{22}	10^{23}
Скорость распыления:			
м/с	$8,1 \cdot 10^{-13}$	$4,1 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$
м/год горения плазмы	$2,6 \cdot 10^{-5}$	0,13	5,7
кг/($m^2 \cdot c$)	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
Время достижения глубины эрозии, равной $h_{мин}$, с:	Больше расчётного срока службы ТИН		
без учёта перенапыления		$6,1 \cdot 10^5$ (~0,02 года)	$1,4 \cdot 10^4$ (~4 ч)
с учётом перенапыления		0,02—1 год	4—200 ч
Количество образовавшейся бериллиевой пыли, кг:			
без учёта перенапыления	4,5*	37**	37**
с учётом перенапыления	0,09—4,5*	0,74—37**	0,74—37**

* За расчётный срок службы ТИН.

** За время достижения $h_{мин}$.

Большое значение для оценки скорости распыления ПС имеют процессы взаимодействия с ней распылённого материала и накопления пыли в пристеночной плазме. Теория для количественной оценки происходящих при этом процессов полностью не разработана, но имеются экспериментальные работы [9]. Большая часть пыли в плазме испаряется, и образующееся паровое облако приблизительно в 50 раз снижает тепловой поток на ПС. Как установлено экспериментальным путём, частицы распылённого материала, находясь в пристеночной плазме, могут переосаждаться вновь в любом месте ПС. Этот процесс может значительно уменьшить скорость распыления. Для количественной оценки уменьшения скорости распыления с учётом фактора перенапыления сделаем предположение, что реальная скорость распыления бериллия может уменьшиться в 1—50 раз по сравнению с вычисленной. Соответственно, в 1—50 раз увеличится время, когда толщина распылённого слоя достигает $h_{мин}$, и в 1—50 раз уменьшится количество бериллиевой пыли, что показано в табл. 4.

Следует отметить, что величина V_m для ПС, покрытой графитом или сплавом инконель, определялась экспериментально на установках JET и JT-60U [10]. Там же приведена методика пересчёта полученных результатов для оценки V_m для бериллия. Полученная величина V_m для бериллия составила $\sim 1,5 \cdot 10^{-8}$ кг/($m^2 \cdot c$). Эта величина на порядок больше, чем оцененная минимальная скорость распыления ПС в ТИН, и находится в рассчитанном интервале значений.

В последний период, начиная с 2010 г., была проведена новая серия опытов по непосредственному определению скорости эрозии бериллия на JET [11]. Часть ПС, первоначально покрытой углеродом, была заменена вольфрамовыми и бериллиевыми тайлами. Установлено, что скорость эрозии зависит от места расположения тайла. Используемый метод позволяет определить только интегральную скорость эрозии за кампанию, которая представляет собой разницу между количеством распылённого и перенапылённого материала. Измеренная скорость эрозии находится в интервале $(0,54—1,2)10^{14}$ ат./($cm^2 \cdot c$), или $(0,81—1,8)10^{-8}$ кг/($m^2 \cdot c$), что практически совпадает с ранее определённой величиной. Минимальное

значение скорости распыления было отмечено в ту кампанию, когда бериллием была покрыта более значительная площадь ПС по сравнению с той кампанией, когда площадь покрытия бериллием была минимальной. Авторы делают вывод, что снижение скорости распыления обусловлено процессом перенасыщения. Если принять за максимально возможную массовую скорость распыления (без учёта перенасыщения) $V_m = 1,8 \cdot 10^{-8}$ кг/(м²·с), то ей будет соответствовать линейная скорость распыления $v = 1 \cdot 10^{-11}$ м/с. В условиях ТИН по (6) это даст время работы до отказа $2,5 \cdot 10^8$ с, т.е. ~8 лет горения плазмы. Подобная оценка представляется очень приближенной, так как плазмозфизические параметры в ЖЕТ и ТИН сильно отличаются.

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ЭРОЗИИ, ВЫЗВАННОЙ СРЫВАМИ ПЛАЗМЫ

При расчёте по (8) получаем $\Delta x_{\text{распл}} \sim (1,2—2,7)10^{-4}$ м. Расчёт по (10) при действующих на ПС значениях Q даёт $\Delta x_{\text{распл}} \sim (0,3—7)10^{-4}$ м.

Эти оценки согласуются с выводом, сделанным в [7]: при импульсном воздействии плазмы перемещение расплава по поверхности материала является основным механизмом эрозии. За величину эрозии $L_{\text{эр}}$, вызванной единичным срывом плазмы, примем $\Delta x_{\text{распл}}$. Это мотивируется тем, что под воздействием плазменного потока при срыве происходит перемещение расплавленного материала от центра потока плазмы к его периферии, что приводит к образованию кратера эрозии на поверхности [7]. Глубина этого кратера близка к величине $\Delta x_{\text{распл}}$. В [12] сделан вывод, что при $\tau_{\text{ср}} = 0,1$ мс и $Q = 12$ МДж/м² толщина эродировавшего слоя бериллия $L_{\text{эр}}$ (находящегося, как и в рассматриваемой ПС, на промежуточном медном слое) составляет $8 \cdot 10^{-5}$ м, при увеличении длительности срыва до 3 мс возрастает до $1,1 \cdot 10^{-4}$ м, что близко к полученным значениям. Максимальное значение $L_{\text{эр}} \sim 1,2 \cdot 10^{-4}$ м (максимальная оценка по (8), так как значения, полученные по (10), являются завышенными). Это значение близко к значению, полученному в [12].

Допустимое число срывов плазмы N , приходящееся на один и тот же участок ПС при заданной конструкции, оценим по формуле

$$N = h_{\text{мин}}/L_{\text{эр}}.$$

При максимальном значении $L_{\text{эр}}$ величина N будет ~20, что вполне возможно за требуемый срок службы.

ВЫВОДЫ

Выполненные расчёты показывают, что существует большая неопределённость при оценке возможного срока службы предложенной конструкции ПС, обусловленного её взаимодействием с плазмой. При минимальной скорости физического распыления возможно, что ПС сохранит работоспособность весь расчётный срок службы — 30 лет. Но даже при средней и тем более при максимальной скорости физического распыления срок службы ПС сокращается до нескольких месяцев или даже часов. Влияние срывов плазмы может ещё больше сократить срок службы ПС. При определённых условиях достаточно 20 срывов на один участок поверхности ПС, и её работоспособность будет потеряна.

Следует отметить, что определяющим для процесса эрозии представляется физическое распыление. Импульсное воздействие при срыве плазмы приводит к удалению с поверхности ПС слоя материала незначительной толщины, и необходимо последовательное воздействие на один участок целой серии срывов, чтобы удалить слой материала толщиной более допустимого.

Процессы шелушения и испарения материала ПС при рабочей температуре, как ожидается, не будут оказывать заметного влияния на её работоспособность.

Для более точной оценки срока службы ПС необходимо уточнить условия её работы — значения Y и F , их распределение по поверхности, характеристики срывов плазмы и влияние на ПС процессов в пристеночной плазме, вызванных присутствием в ней распылённого материала. Необходимо учесть, что даже после одного срыва плазмы происходит существенное изменение свойств поверхности, подвергшейся срыву. Она приобретает пористый характер из-за застывания на ней мельчайших брызг расплавленного материала. Это может привести к изменению величины $L_{\text{эр}}$ при последующих срывах плазмы на этот участок.

Необходимо организовать натурные испытания модели ПС и экспериментально определить скорость её распыления. Эффекты, сопровождающие процессы распыления ПС и срыва плазмы (перенапыление, плавление и сублимация материала, экранирующее воздействие испаренного и эродировавшего материала, его перемещение под действием магнитного поля и др.), очень сложны и не могут быть точно определены теоретически, что подтверждено в [7].

Представляется, что задача создания конструкции ПС, покрытой бериллием и способной без замены и ремонта выдержать 30 лет эксплуатации в контакте с плазмой без какой-либо защиты, является нереалистической.

REFERENCES

1. **RW Report** «Development of technical specifications for preliminary design of a demonstration fusion neutron source (FNS). Stage 3 intermediate». M., RRC «Kurchatov Institute», 2011. Inv. № 140-17/6935-11 of 9.12.2011 (in Russian).
2. **Kalin B.A., Skorov D.M., Yakushin V.L.** The problems of materials choice for fusion reactors. — M.: Energoatomizdat, 1985 (in Russian).
3. **Eckstein W.** Sputtering Data. Max-Planck Institut fur Plasma Physik, 1993.
4. **Stamp M.F., Krieger K., Brezisek S.** Measurements of beryllium sputtering yields at JET. — J. of Nuclear Materials, 2011, vol. 415, pp. S170—S173.
5. **Klimov N.S. et al.** Tungsten splashing under intense plasma flow. — VANT. Ser. Termoyadernyi Sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2009, issue 2, p. 52 (in Russian).
6. **Vedenov A.A. et al.** Physical processes at materials laser treatment. — M.: Energoatomizdat, 1985 (in Russian).
7. **Poznyak I.M. et al.** Erosion of metals under the action of intense plasma stream. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2012, issue 4, p. 23 (in Russian).
8. **Chirkin V.S.** Thermophysical properties of nuclear technology materials. Reference. — M.: Atomizdat, 1968 (in Russian).
9. **Kolbasov B.N.** 19-th International conference on plasma surface interactions in controlled fusion devices (PSI-19). San-Diego, USA, 24—28 May 2010. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2010, issue 4 (in Russian).
10. **Tokamak** Dust Source Term Analysis and Requirement. Japan Atomic Energy Research Institute, 1995.
11. **Krat S.A. et al.** Comparison of erosion and deposition on the JET inner wall with the ITER-like and carbon walls. — In coll.: 17-th conference on plasma surface interactions. — M.: National Research Nuclear University «MEPhI», 30—31 January 2014 (in Russian).
12. **ITER** Plasma Facing Components. — Vienna: IAEA, 1991.

AUTHORS

Pashkov A.Yu NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; A_Yu_pashkoff@mail.ru

Received 21 November 2013
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2014, vol. 37, issue 2, pp. 45—52.