

УДК 538.971

**ЭРОЗИЯ ВОЛЬФРАМА В ТОКАМАКЕ ПРИ СРЫВЕ ТОКА**Ю. В. Мартыненко<sup>1,2</sup>, В. П. Будаев<sup>1,3</sup>, С. А. Грашин<sup>1</sup>, Е. А. Шестаков<sup>1</sup>

*Предложено теоретическое описание процесса эрозии вольфрама при срыве тока в токамаке при отсутствии экранирующего слоя плазмы. Представлены экспериментальные наблюдения значительного оплавления, формирования мелких кратеров и эрозии вольфрамовой диафрагмы после срывов тока в токамаке T-10. Проведено сравнение экспериментальных наблюдений и оценок на основе предложенной модели. Результаты используются для прогноза эрозии вольфрамового дивертора ИТЭР.*

**Ключевые слова:** материалы термоядерного реактора, вольфрам, плазменно-тепловые испытания, токамак, ИТЭР.

*Введение.* Проблема плавления и эрозии материалов при мощном плазменно-тепловом воздействии плазмы на пластины дивертора и облицовки первой стенки является ключевой для создания международного токамака-реактора ИТЭР [1, 2] и реакторов следующего поколения. Наиболее интенсивному плазменно-тепловому воздействию подвергаются компоненты первой стенки токамака во время импульсных плазменных процессов, таких как срывы тока и ЭЛМ-события (см. [3]). Вольфрам используется для изготовления компонентов первой стенки (лимитеров и диверторных пластин), ограничивающих взаимодействие плазмы с вакуумной камерой в современных крупных токамаках и планируется к использованию в будущих установках реакторного масштаба: в ИТЭР будет эксплуатироваться вольфрамовый дивертор, рассматриваются вопросы использования вольфрама в термоядерном источнике нейтронов (ТИН) и реакторе ДЕМО [3]. Импульсные кратковременные тепловые нагрузки на лимитеры и пластины дивертора в современных токамаках в срывах и ЭЛМах приводят к перегреву поверхности и даже к плавлению вольфрама (см. [3–5]). В ИТЭР в срывах и ЭЛМах нагрузки на диверторные пластины будут достигать величины гигаваттного масштаба

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

<sup>3</sup> НИУ Московский энергетический институт “МЭИ”, Россия, Москва.

$\sim 0.6\text{--}3.5 \text{ ГВт}\cdot\text{м}^{-2}$  (см. [3]), что выше предела плавления вольфрама. При срыве тока в токамаке формируется пучок убегających электронов с энергией  $\sim 0.1\text{--}5 \text{ МэВ}$ , который в течение нескольких миллисекунд взаимодействует с элементами первой стенки, приводя к ее перегреву и локальным разрушениям. В токамаках круглого сечения с полоидальным лимитером (диафрагмой), в том числе токамаке Т-10, такие разрушения полоидального лимитера наблюдаются на внешнем обводе тора.

Процесс эрозии определяется динамикой расплавленного слоя под действием потока плазмы [5, 6]. Такие процессы в настоящее время моделируются в плазменных ускорителях КСПУ [3]. Однако давление плазменных потоков на испытываемую мишень в КСПУ отличается от условий при ЭЛМах и срывах в ИТЭР. В ИТЭР ожидается давление потока плазмы при ЭЛМах  $10^2\text{--}10^3 \text{ Па}$  и при срывах  $10^2\text{--}4 \cdot 10^3 \text{ Па}$ , а в КСПУ давление плазменного потока составляет несколько атмосфер. В работе [7] показано, что воздействие на материал широкого пучка плазмы большой мощности, даже с малым давлением, создает в приповерхностном слое экранирующую плазму из испаренного материала. В этом случае энергия, поглощаемая материальной поверхностью, ограничена экранирующим слоем; для вольфрама при длительности плазменного воздействия  $\sim 0.5 \text{ мс}$  такой энергетический предел составляет величину  $\sim 0.5 \text{ МДж}/\text{м}^2$ . При этом эрозия поверхности обусловлена возбуждением волн на расплавленной поверхности вследствие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, быстрым перемещением этих волн плазменным ветром и капельной эрозией.

В крупных токамаках максимальная тепловая нагрузка потока плазмы на диверторные пластины формируется в узком слое вблизи  $X$ -точки сепаратрисы. Перегрев поверхности в таком слое может приводить к поступлению продуктов эрозии в приповерхностный слой и формированию плотной экранирующей плазмы. Предполагается, что в ИТЭР такой экранирующий слой плазмы не будет формироваться на диверторных пластинах вблизи зоны (размером несколько миллиметров) с максимальной плазменной нагрузкой ввиду быстрого поперечного выноса продуктов эрозии из этой зоны. Отсутствие экранирующего слоя плазмы реализуется также в процессе воздействия электронного пучка на диафрагму при срыве в круглом токамаке Т-10, где установлены вольфрамовые полоидальная и грибковая диафрагмы. В данной работе предложено описание процесса эрозии вольфрама при срыве тока в токамаке, и проведено сравнение модельного описания с экспериментальным наблюдением эрозии вольфрамовой диафрагмы в токамаке Т-10.

*Перемещение расплавленного слоя под действием пучка электронов.* Рассмотрим нагрев и плавление обращенной к плазме поверхности вольфрамовой пластины при воздействии пучка высокоэнергичных частиц – ускоренных электронов в момент срыва. Если пучок электронов достаточно узкий, то согласно [7] экранирующая плазма над поверхностью вольфрама не образуется. В этом случае температура поверхности вольфрамовой пластины растет до тех пор, пока охлаждение поверхности за счет испарения и теплового излучения не сравняется с нагревом пучком электронов, условие на мощность при этом:

$$W = N \cdot U \cdot E_b + \sigma T^4, \quad (1)$$

здесь  $W$  – плотность мощности пучка электронов,  $N$  – число атомов в единице объема мишени,  $U = s \cdot \exp(-E_b/T)$  – скорость движения поверхности за счет испарения,  $s = (3/4\pi)^{1/3}(1 + 1.5^3)^{-1/3}c \approx 0.38 c$ ,  $c$  – скорость звука в металле [8],  $E_b$  – удельная теплота испарения,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана. Для вольфрама охлаждение за счет испарения превышает охлаждение излучением при  $T > 6800$  К, что соответствует плотности мощности потока тепла на поверхность равного  $W \approx 2.5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Следует отметить, что хотя температура кипения вольфрама  $T_b \approx 6000$  К, в идеальной жидкости, без внесенных извне центров зарождения пузырьков, кипение вольфрама не происходит вплоть до очень больших температур. Согласно, например [9], для образования пузырька критического размера требуется энергия:

$$E_{cr} = (16\pi\alpha^3/3) \cdot (T_b/\Delta T \rho' E_b)^2, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – поверхностное натяжение жидкого вольфрама,  $\Delta T = T - T_b$  – перегрев,  $\rho'$  – плотность пара,  $E_b$  – энергия испарения. Для вольфрама даже при  $T = 10000$  К величина  $E_{cr} \approx 1$  кэВ, то есть кипение чистого вольфрама не происходит.

Рассмотрим динамику расплавленной поверхности вольфрама. Испаряющийся вольфрамовый пар оказывает давление на поверхность:

$$P = \rho v_T U, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность мишени,  $v_T$  – тепловая скорость атомов. При плотности мощности пучка  $W > 2.5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> можно пренебречь тепловым излучением мишени и считать, что мишень охлаждается только испарением. Тогда из (1), (3) получим, что давление пара  $P$  при испарении поверхности связано с плотностью мощности потока пучка электронов как

$$P = (\rho v_T / N E_b) \cdot W. \quad (4)$$

При плотности мощности пучка  $W < 2.5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> давление  $P$  быстро убывает при убывании  $W$ , и давление пара при этом не может вызвать движение расплавленного вольфрама. При  $W = 2.5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> давление пара составляет  $P = 3 \cdot 10^4$  Па. Если зона воздействия пучка электронов – круг радиусом  $R$ , то давление отдачи пара может перемещать расплавленный слой из центра круга к периферии. В вязкой жидкости за время  $t \approx h^2/\nu$  (где  $h$  – глубина расплавленного слоя,  $\nu$  – кинематическая вязкость) скорость движения расплавленного слоя  $v$  становится постоянной, при которой градиент давления уравновешивается силой вязкости

$$\nabla P = \rho\nu\partial^2v/\partial z^2, \quad (5)$$

где  $z$  – координата вдоль нормали к поверхности. Полагая приближенно  $\nabla P \approx P/R$ ,  $\partial^2v/\partial z^2 \approx v/h^2$ , получим

$$v = (Ph^2/R\rho\nu) = (v_T/NE_b\nu) \cdot (h^2/R) \cdot W. \quad (6)$$

Образование кратера на поверхности в зоне воздействия пучка электронов происходит, если за время воздействия пучка на поверхность  $t$  расплавленный вольфрам переместится на расстояние  $R$ , то есть, если

$$v > R/\tau. \quad (7)$$

Таким образом, кратер на месте воздействия пучка электронов начинает образовываться при

$$W > (\nu NE_b/v_T) \cdot (R^2/h^2\tau). \quad (8)$$

При этом условии слой расплавленного металла перемещается на периферию кратера и вылетает со скоростью  $v$  в виде капель. В результате слой металла утончается на глубину  $h$ . Если  $v\tau/R > 1$ , то за время импульса происходит  $vt/R$  выбросов расплавленного слоя из кратера, и за один импульс образуется кратер глубиной

$$H = hv\tau/R. \quad (9)$$

Глубина расплавленного слоя определяется временем  $R/v$  между выбросами расплава из кратера

$$h = (\chi R/v)^{1/2}, \quad (10)$$

где  $\chi$  – температуропроводность металла. Из условий (6) и (10) следует, что глубина расплавленного слоя равна

$$h = (\chi\nu NE_b v_T^{-1} R^2/W)^{1/4}, \quad (11)$$

скорость, с которой расплав вылетает из кратера, равна

$$v = (\chi v_T / NE_b \nu)^{1/2} \cdot W^{1/2}, \quad (12)$$

а глубина кратера, создаваемого за один импульс, равна

$$H = (\chi^3 v_T / NE_b \nu R^3)^{1/4} \cdot W^{1/4}. \quad (13)$$

На основании изложенного можно сформулировать следующие условия эрозии вольфрамового дивертора в ИТЭР: 1) экранирующий слой плазмы будет отсутствовать, при ширине максимальной тепловой нагрузки потока плазмы на диверторные пластины меньше  $\sim 1$  см [7]; 2) образование кратера будет происходить, если плотность мощности плазменного потока будет  $W > (NE_b \nu / v_T) \cdot (R^2 / h^2 \tau)$ , а глубина кратера после одного срыва составит  $H = (\chi^3 v_T / NE_b \nu R^3)^{1/4} \cdot W^{1/4}$ .

Далее рассмотренный механизм эрозии проверен сравнением с данными по эрозии вольфрамового лимитера в экспериментах со срывами тока в токамаке Т-10.

*Плавление и эрозия вольфрамовой диафрагмы в токамаке Т-10.* В 2015 г. в токамаке Т-10 были установлены вольфрамовые диафрагмы (кольцевая полоидальная и грибковая), ограничивающие взаимодействие плазмы со стенкой. Полоидальная диафрагма состоит из парных пластин, установленных на кольце из нержавеющей стали в одном полоидальном сечении вакуумной камеры токамака. Пластины полоидальной (кольцевой) диафрагмы (см. рис. 1(а)) изготовлены из вольфрама российской марки В-МП, используемого для изготовления диверторных пластин ИТЭР. Размеры пластин  $\sim 67 \cdot 38$  мм<sup>2</sup> и толщина 10 мм, все пластины имеют электрический контакт с камерой токамака, изготовленной из нержавеющей стали.

После серии  $\sim 400$  экспериментов (кампания 2015 г.) со срывами в токамаке Т-10 на внешнем обводе полоидальной диафрагмы наблюдалась интенсивная эрозия и расплавленный рельеф вольфрамовых пластин с кратерами диаметром 1–5 мм (рис. 1(а), (б)). На элементах камеры наблюдались капли расплавленного вольфрама (рис. 1(в)), эжектированные из зоны эрозии вольфрамовых пластин полоидальной диафрагмы (рис. 1(а)). Размер вольфрамовых капель от  $\sim 0.1$  до  $\sim 3$  мм (рис. 1(в)). Типичные характеристики плазмы в разрядах с большими срывами в токамаке Т-10 приведены в [10, 11].

Оценка мощности электронного пучка при его взаимодействии с поверхностью была проведена на основе анализа данных регистрации надтепловых электронов в большом

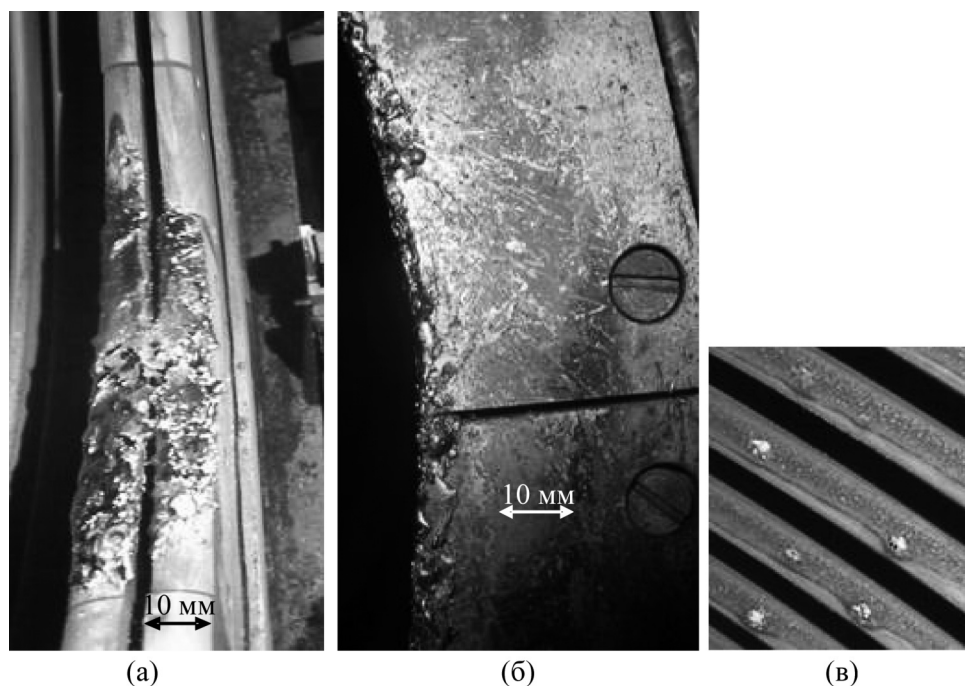


Рис. 1: Вольфрамовая полоидальная кольцевая диафрагма в токамаке T-10 после серии экспериментов со срывами тока, оплавление на внешнем обводе тора: (а) общий вид, (б) пластины – вид с торца, (в) капли на сильфоне камеры.

срыве в T-10. Интенсивность надтеплого рентгеновского излучения в зоне диафрагмы токамака T-10 (типичный сигнал на рис. 2(а)) в момент большого срыва значительно увеличивается, длительность фазы большого срыва около 5 мс. Энергетический спектр рентгеновского излучения в период срыва значительно отличается от спектра в стационарной стадии (рис. 2(б)). В стадии большого срыва наблюдается излучение в диапазоне энергий 0.1–2 МэВ (рис. 2(б)), что свидетельствует о наличии в плазме электронов с энергией не менее 2 МэВ. Эти электроны возникли в результате ускорения в электрических полях при перезамыкании магнитных силовых линий в момент срыва, что регистрируется по эволюции МГД моды с  $m = 2$ . Можно оценить размер пучка таких электронов из размера области перезамыкания силовых линий (см. [10]). Свойства электронного пучка зависят от ряда параметров плазменного разряда и взаимодействия плазма-стенка. Оценки, проведенные для срыва в токамаке T-10 в [10], показали, что сечение пучка электронов может составлять менее  $\sim 1$  см. Такую оценку следует рассматривать при анализе эффектов эрозии и размера кратеров на поверхности вольфрамовых пластин (рис. 1). Энергию в электронном пучке можно оценить из

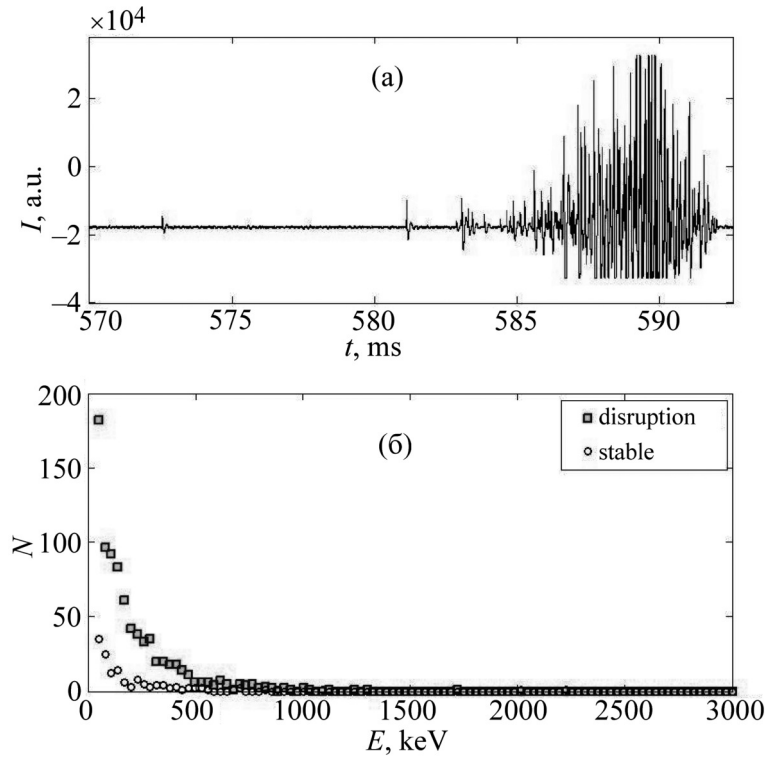


Рис. 2: Токамак Т-10, измерение CdTe спектрометром в разряде № 66815 (а) сигнал надтеплового рентгеновского излучения в зоне диафрагмы в момент срыва; (б) энергетический спектр рентгеновского излучения в стационарной стадии (круги, время регистрации спектра – 100 мс) и в период срыва (квадраты, время регистрации спектра – 5 мс).

моделирования [10] с учетом плотности электронов ( $\sim 10^{13}$  1/см<sup>3</sup>) и энергии электронов  $\sim 1$  МэВ. В результате, оценка мощности воздействия такого электронного пучка на зону диаметром около 4 мм составляет  $W = 3$  ГВт/м<sup>2</sup>.

Оценки, сделанные для параметров электронного пучка  $W = 3$  ГВт/м<sup>2</sup>,  $\tau = 5$  мс,  $R = 2$  мм по формулам (11), (12) и (13), дают следующие величины: глубина расплавленного слоя (11)  $h \approx 40$  мкм, скорость, с которой расплав вылетает из кратера  $v \approx 27$  м/с, глубина кратера, образующегося за один импульс  $H \approx 2.6$  мм. Эти оценки хорошо согласуются с наблюдаемой эрозией кольцевой вольфрамовой диафрагмы Т-10. Полученное согласие свидетельствует о достоверности условий эрозии вольфрамового дивертера ИТЭР, сформулированных в конце предыдущего параграфа.

*Закключение.* В работе предложено теоретическое описание процесса эрозии вольфрама при плазменной нагрузке в токамаке в процессе срыва тока. В модели пред-

полагается, что экранирующий слой плазмы над поверхностью не образуется. Такие условия ожидаются на диверторных пластинах в ИТЭР вблизи зоны с максимальной плазменной нагрузкой ввиду малой ширины максимальной тепловой нагрузки потока плазмы на диверторные пластины и быстрого поперечного выноса продуктов эрозии из этой зоны. Отсутствие экранирующего слоя плазмы предполагается также при воздействии электронного пучка на лимитер при срыве в круглом токамаке. При отсутствии экранирующего слоя вольфрам нагревается до температуры, при которой давление отдачи паров вольфрама становится столь большим, что вызывает течение расплавленного слоя от центра кратера к его периферии. Оценки эрозии кольцевого вольфрамового лимитера токамака Т-10 и сравнение с результатами эксперимента показали хорошее согласие. Сформулированы условия, при которых будет происходить эрозия вольфрамового дивертора ИТЭР: 1) ширина потока плазмы на диверторные пластины с максимальной тепловой нагрузкой, при которой не образуется экранирующий слой плазмы; 2) плотность мощности плазменного потока, при которой начинается эрозия вольфрама; 3) глубина эрозии в зависимости от плотности мощности плазменного потока.

Работа была выполнена при поддержке Росатома РФ.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. A. Pitts, S. Carpentier, F. Escourbiac, et al., *Journal of Nuclear Materials* **438**, 48 (2013).
- [2] Y. Ueda, J. W. Coenen, G. De Temmerman, et al., *Fusion Engineering and Design* **89**, 901 (2014).
- [3] В. П. Будаев, *ВАНТ Сер. Термоядерный синтез* **38**(4), 5 (2015).
- [4] V. P. Budaev, Yu. V. Martynenko, A. V. Karpov, et al., *Journal of Nuclear Materials* **463**, 237 (2015).
- [5] Ю. В. Мартыненко, *ВАНТ Сер. Термоядерный синтез* **37**(2), 53 (2014).
- [6] Ю. В. Мартыненко, *ВАНТ Сер. Термоядерный синтез* **35**(3), 41 (2012).
- [7] Ю. В. Мартыненко, *Физика плазмы* **43**(3), 260 (2017).
- [8] С. И. Анисимов, Я. Ф. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко, *Действие излучения большой мощности на металлы* (М., Наука, 1970).
- [9] В. П. Скрипов, *Метастабильная жидкость* (М., Наука, 1972).
- [10] P. V. Savrukhin and E. A. Shestakov, *Nuclear Fusion* **55**, 043016 (2015).
- [11] P. V. Savrukhin, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **48**, B201 (2006).

Поступила в редакцию 8 июня 2016 г.

*Печатается по представлению ОФВЭ ФИАН.*