

УДК 533.924;546.26;661.666

ЭРОЗИЯ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИНТЕНСИВНЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ

*Н.И. Архипов, В.М. Сафронов, В.А. Барсук, А.М. Житлухин, Н.С. Климов, С.М. Куркин, В.Л. Подковыров
(Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований, Троицк, Московская обл., Россия)*

На плазменных ускорителях МК-200 и КСПУ были проведены испытания углеграфитового композита SEP NB31 и мелкозернистого графита МПГ-8. Эти материалы подвергались многократным воздействиям интенсивных потоков водородной плазмы при тепловых нагрузках, характерных для срывов тока и ЭЛМов в ИТЭР. В статье представлены результаты испытаний материалов, включая сведения о механизмах и продуктах эрозии. Отмечается, что эрозионная стойкость дорогостоящего С—С-композита практически такая же, как у обычного графита.

Ключевые слова: углеграфитовые материалы, эрозия, хрупкое разрушение, дивертор, ИТЭР, плазменные ускорители.

EROSION OF CARBON BASED MATERIALS UNDER ACTION OF INTENSE PLASMA STREAMS. N.I. ARKHIPOV, V.M. SAFRONOV, V.A. BARSUK, A.M. ZHITLUKHIN, N.S. KLIMOV, S.M. KURKIN, V.L. PODKOVYROV. Carbon fibre composite SEP NB31 and fine grain graphite MPG-8 were tested at the plasma gun facilities MK-200 and QSPA. The materials have been exposed to the multiple irradiations by intense streams of hydrogen plasma under the heat loads relevant to disruptions and ELMs in ITER. The paper reports the test results including the data obtained on the erosion mechanisms and erosion products. It is noted that the erosion resistance of the high-priced composite SEP NB31 is practically the same as in the standard graphite.

Key words: carbon based materials, erosion, brittle destruction, divertor, ITER, plasma guns.

ВВЕДЕНИЕ

После того, как на современных токамаках были отработаны способы эффективного нагрева и удержания плазмы, а затем начаты работы по созданию опытного термоядерного токамака-реактора ИТЭР, на первый план вышли проблемы технологического характера. Одна из наиболее острых проблем связана с поиском теплозащитных материалов для первой стенки реактора. Под действием горячей плазмы материалы первой стенки будут эродировать и постепенно разрушаться, уменьшая тем самым срок службы элементов камеры. Поступление продуктов эрозии в вакуумную камеру может вызвать загрязнение термоядерной плазмы тяжёлыми примесями, что приведёт к радиационному охлаждению плазмы и снижению энергетической эффективности реактора. Кроме того, эрозия будет сопровождаться образованием «материальной» пыли. Являясь химически агрессивной, взрывоопасной и насыщенной тритием, эта пыль представляет серьёзную проблему с точки зрения безопасности будущего термоядерного реактора.

Чтобы минимизировать негативные последствия от взаимодействия плазмы с первой стенкой, нужны материалы, обладающие высокой эрозионной стойкостью. Эти материалы должны противостоять воздействию плазмы не только во время стационарной работы токамака-реактора, но и во время так называемых переходных процессов типа срывов тока или ЭЛМ-событий (edge localized mode), приводящих к резкому росту тепловых потоков на теплозащитные покрытия. Наиболее интенсивному воздействию подвергаются диверторные пластины токамака. Ожидается, что при срывах тока тепловая нагрузка на диверторные пластины ИТЭР может достигать $q = 10\text{—}100$ МДж/м² за промежуток времени $t = 1\text{—}10$ мс, а во время ЭЛМ-событий — $q = 0,2\text{—}5$ МДж/м², $t = 0,1\text{—}1$ мс [1, 2]. При таких потоках тепла, особенно при срывах тока, любой материал будет интенсивно испаряться, что может привести к быстрому разрушению пластин и выходу их из эксплуатации через несколько десятков срывов [1, 3].

В настоящее время наиболее перспективными материалами для облицовки дивертора ИТЭР считаются углеграфитовые материалы (мелкозернистый графит и волоконные углеграфитовые композиты) и вольфрам (чистый вольфрам и вольфрам с добавками других элементов). Для окончательного выбора теплозащитных материалов нужны надёжные сведения о поведении этих материалов при воздействии на них интенсивных потоков плазмы. Поскольку плазменные нагрузки, ожидаемые во время срывов тока и ЭЛМов в ИТЭР, в существующих токамаках не достигаются, для испытания материалов применяются мощные плазменные ускорители [4—7] и электронные пучки [8—11].

Следует отметить, что в модельных экспериментах невозможно полностью симитировать условия переходных процессов в токамаке, поэтому в задачу экспериментальных исследований не входит получение окончательного ответа на вопрос, какой будет эрозия материалов в токамаке-реакторе. Это задача расчётно-теоретического моделирования. Задача эксперимента состоит прежде всего в изучении основных физических процессов, происходящих при взаимодействии мощных потоков плазмы с веществом, и получении ключевых экспериментальных данных, необходимых для разработки и проверки соответствующих расчётно-теоретических моделей.

В данной статье приведены основные результаты испытаний углеродистых материалов, полученные за последние годы в ГНЦ РФ ТРИНИТИ на импульсном плазменном ускорителе МК-200 и квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Испытания углеродистых материалов проводились на плазменных установках МК-200 [12] и КСПУ [13].

Установка МК-200. В состав установки МК-200 (рис. 1) входят импульсный плазменный ускоритель, плазмопровод длиной 9,5 м и мишенная камера с комплектом диагностических средств. Плазменный ускоритель запитывается от конденсаторной батареи ёмкостью 1152 мкФ. Рабочее напряжение варьируется в диапазоне 13—25 кВ, что соответствует изменению энергии в конденсаторной батарее от 100 до 360 кДж.

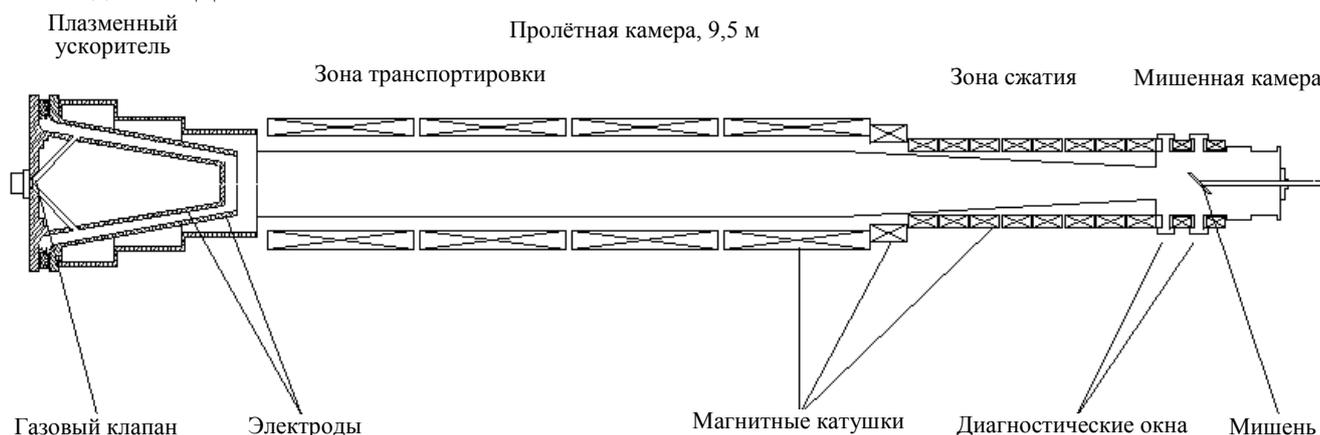


Рис. 1. Схема установки МК-200

Плазмопровод состоит из цилиндрической части длиной 6,5 м и конической длиной 3 м. Диаметр цилиндрического участка 30 см. В конической части диаметр уменьшается от 30 на входе до 15 см на выходе. Цилиндрический участок заполнен продольным магнитным полем 0,7 Тл. В коническом плазмопроводе магнитное поле нарастает по длине от 0,7 до 2,5—3 Тл. При транспортировке сверхзвукового плазменного потока в нарастающем по длине магнитном поле происходят радиальное сжатие и замагничивание плазмы.

Облучаемые образцы располагаются в конце плазмопровода в специальной мишенной камере диаметром 30 и длиной 50 см. В камере имеется продольное магнитное поле величиной до 2 Тл. Камера снабжена двумя диагностическими патрубками. Средства диагностики (интерферометр, спектрометры, методика томсоновского лазерного рассеяния, болометры, радиационный калориметр, пирометр и др.) могут пристыковываться как к одному, так и к другому патрубку. Условия облучения мишеней одинаковы в сечениях обоих патрубков.

В описываемых экспериментах в качестве плазмообразующего газа использовался водород. Если вместо водорода использовать дейтерий, то поток плазмы, движущийся в плазмопроводе, излучает нейтроны с интегральным выходом около 10^9 нейтронов за разряд. Этот факт свидетельствует о том, что МК-200 относится к классу термоядерных установок.

Интенсивность плазменного потока в мишенной камере варьируется за счёт изменения плотности частиц в потоке, при этом энергия направленного движения ионов сохраняется на уровне 2—3 кэВ. В таблице приведены параметры плазменного потока в мишенной камере.

Параметры плазменного потока на установке МК-200

Параметры	Моделирование сильных срывов тока	Моделирование ЭЛМов и ослабленных срывов
Тепловая нагрузка	$q = 10—15 \text{ МДж/м}^2$	$q = 0,05—1 \text{ МДж/м}^2$
Поток энергии	$w = 200—300 \text{ ГВт/м}^2$	$w = 1—20 \text{ ГВт/м}^2$
Длительность потока	$\tau = 50 \text{ мкс}$	$\tau = 50 \text{ мкс}$
Энергия ионов	$E_i = 2 \text{ кэВ}$	$E_i = 3 \text{ кэВ}$
Плотность плазмы	$n = (2—3)10^{21} \text{ м}^{-3}$	$n = (0,1—2)10^{20} \text{ м}^{-3}$
Магнитное поле	$B = 2 \text{ Тл}$	$B = 0,5—2 \text{ Тл}$
Диаметр потока	$d = 6 \text{ см}$	$d = 5—10 \text{ см}$

Поток тепла w , энергия ионов E_i , плотность плазмы n , незначительное (<1%) содержание примесей, наличие в плазме магнитного поля B близки к тем параметрам, которые ожидаются в диверторе токамака-реактора во время срывов тока и ЭЛМ-событий. Недостатком установки является малая длительность плазменного импульса τ , что осложняет проведение ресурсных испытаний защитных покрытий. Дело в том, что эрозия материала, облучаемого мощным потоком плазмы, растёт практически линейно с длительностью плазменного воздействия [14], поэтому для испытания материалов на установке МК-200 требуется производить большое количество облучений. По этой причине ресурсные испытания материалов проводятся в основном на квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ, а установка МК-200 применяется преимущественно для изучения физической картины взаимодействия мощных потоков высокотемпературной плазмы с материалами.

Установка КСПУ. Установка КСПУ (рис. 2) представляет собой одноступенчатый коаксиальный сильноточный плазменный ускоритель с собственным магнитным полем.

Ускорение плазмы происходит между двумя коаксиальными электродами, к которым приложено электрическое напряжение от источника питания, а в зазор между электродами постоянно подаётся плазмообразующий газ. Ускорение плазмы происходит за счёт силы Ампера $\mathbf{F} = \int [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] dV$, где \mathbf{j} — плотность тока в плазменном объёме dV , \mathbf{B} — магнитное поле, создаваемое разрядным током. При постоянной подаче газа длительность плазменного потока определяется временем существования напряжения на электродах.

Энергетика ускорителя включает в себя шесть секций конденсаторной батареи по 8 мФ каждая, которые коммутируются на нагрузку независимым образом. Схема коммутации секций позволяет варьировать длительность плазменного потока в пределах 0,2—0,6 мс. Энергозапас батареи составляет 600 кДж при максимальном рабочем напряжении 5 кВ.

Установка КСПУ используется в основном для проведения ресурсных испытаний теплозащитных материалов, а также для исследования механизмов и продуктов эрозии. Исследуемые образцы устанавливаются на расстоянии 60 см от электродов ускорителя. Угол падения потока плазмы на поверхность мишени варьируется от $\beta = 0$ (нормальное падение, см. рис. 2) до $\beta = 80^\circ$ (см. рис. 2). Мишени предварительно подогреваются до температуры 500 °С. Параметры плазменного потока на установке КСПУ:

Тепловая нагрузка q , МДж/м ² ...	1—50
Поток энергии w , ГВт/м ² ...	2—100
Длительность потока τ , мкс...	500
Энергия ионов E_i , кэВ...	0,1—0,3
Плотность плазмы n , м ⁻³ ...	$10^{22}—10^{23}$
Диаметр потока d , см...	6

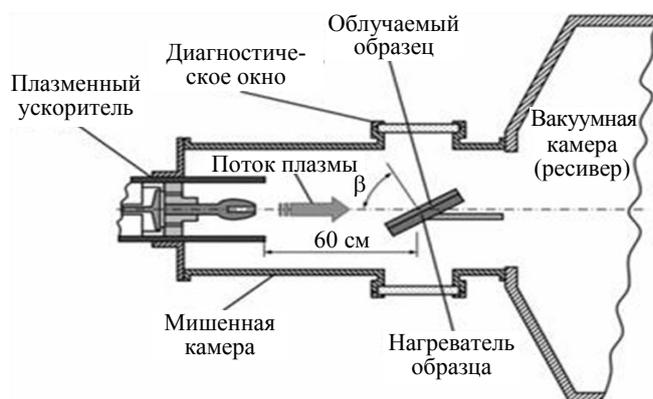


Рис. 2. Схема эксперимента на установке КСПУ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Испарение материала. Эффект экранировки. Для каждого материала существует предельный поток энергии w_{\max} , который может отводиться от облучаемой поверхности вглубь материала за счёт теплопроводности:

$$w_{\max}(t) = \lambda \nabla T \approx T_{\max}(\lambda c \rho / \pi t)^{1/2}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; c — удельная теплоёмкость; ρ — массовая плотность; T_{\max} — максимально возможная температура поверхности материала (это может быть температура кипения или сублимации); t — момент времени от начала взаимодействия. Например, при $t = 1$ мкс для вольфрама $w_{\max} = 100$ ГВт/м², меди $w_{\max} = 50$ ГВт/м², графита $w_{\max} = 20$ ГВт/м², стали $w_{\max} = 15$ ГВт/м².

В том случае, когда поступающий на поверхность поток энергии не может полностью отводиться вглубь материала, т.е. $w > w_{\max}$, начинается интенсивное испарение материала. Именно такой режим будет реализовываться на диверторных пластинах ИТЭР при срывах тока, и, соответственно, пластины могут сильно эродировать и разрушаться за счёт испарения. (В существующих токамаках условие $w > w_{\max}$ практически не достигается и основным механизмом эрозии материалов является атомарное распыление под действием потока частиц.)

Расчёты показывают, что если бы вся энергия плазменного потока доходила до поверхности диверторных пластин, то это приводило бы к испарению большого количества материала, и при каждом срыве тока с поверхности пластин испарялся бы слой вещества толщиной 100—200 мкм [1, 3]. Следует отметить, что такие значения эрозии (и даже больше) были зарегистрированы в ранних экспериментах с электронными пучками [15—17]. В этих экспериментах для моделирования требуемых плазменных нагрузок применялись пучки электронов с энергией более 100 кэВ, т.е. с энергией, существенно превышающей энергию частиц в плазме токамака. Позже, в том числе и усилиями авторов данной статьи [18], было показано, что высокоэнергетичные электронные пучки не способны воспроизводить специфические особенности взаимодействия плазмы с материалами. В отличие от плазмы электронный пучок свободно проходит через слой испаренного материала, непосредственно бомбардирует поверхность и даже внедряется внутрь материала, вызывая тем самым большую эрозию.

Специфика взаимодействия мощных потоков плазмы с материалами заключается в том, что в результате испарения и ионизации материала мишени перед облучаемой поверхностью быстро образуется плотный слой мишенной плазмы, который выполняет роль своеобразного экрана, защищая поверхность от прямого воздействия плазменного потока [18, 19]. Изучение свойств экранирующего слоя и его влияния на эрозию материалов стало основной целью наших исследований на первом этапе работы.

Было обнаружено, что в условиях, характерных для срыва тока в ИТЭР, экранирующий слой мишенной плазмы образуется в течение нескольких микросекунд [19], т.е. практически одновременно с началом взаимодействия плазмы с материалом. Затем начинается квазистационарная стадия процесса, когда тепловое воздействие на мишень полностью определяется процессами переноса энергии в экранирующем слое. При этом значительная часть энергии плазменного потока рассеивается в виде излучения мишенной плазмы и вообще не доходит по поверхности [20]. В результате тепловая нагрузка на мишень существенно снижается, соответственно, уменьшается количество испаренного материала.

Эрозия графита МПГ-8, измеренная на установке МК-200 при однократном воздействии плазменного потока с плотностью энергии $q = 15$ МДж/м², составила 0,4 мкм. В отсутствие экранирующего слоя, т.е. в том случае, когда вся энергия плазменного потока доходила бы до поверхности и полностью расходовалась на нагрев и испарение материала мишени, с облучаемой поверхности испарился бы слой графита толщиной около 200 мкм [18]. Таким образом, за счет эффекта экранировки эрозия графита уменьшилась в 500 раз!

В случае вольфрама эффективность экранировки оказалась ещё выше. На испарение материала расходовалось не более 0,1% энергии плазменного потока, а основная часть энергии трансформировалась в излучение мишенной вольфрамовой плазмы и рассеивалась в окружающее пространство. При этом излучение было настолько интенсивным, что вызывало плавление и испарение элементов вакуумной камеры, не находящихся в контакте с плазмой [21]. Этот экспериментальный факт указывает на то, что не

только приемные пластины дивертора, но и другие элементы дивертора, находящиеся за пределами плазменного потока, должны быть покрыты теплозащитными материалами.

Расчётно-теоретические модели, разработанные на основе полученных экспериментальных данных, свидетельствуют о том, что экранирующий слой надёжно защищает любой материал от интенсивного испарения. Согласно результатам расчётов [22, 23] эрозия диверторных пластин за счёт испарения не будет превышать нескольких микрон (5—7 мкм) при срывах тока в ИТЭР.

Если бы эрозия происходила только за счёт испарения, то проблему эрозии теплозащитных материалов дивертора при срывах тока можно было бы считать уже решённой. Однако существуют еще макроскопические механизмы эрозии, которые могут вызывать более серьёзные повреждения материалов, чем испарение. Например, углеграфитовые материалы подвержены хрупкому разрушению и могут эродировать в виде гранул [24], а эрозия металлов может осуществляться за счёт капельного разбрызгивания расплава, образующегося на поверхности мишени [25].

Макроскопические механизмы эрозии. К тому времени, когда авторы данной статьи приступили к систематическим исследованиям макроскопических механизмов эрозии, было выполнено уже много испытаний диверторных материалов на различных установках и накоплены сведения о возможных механизмах эрозии. В частности, было известно, что мелкозернистые графиты и С—С-композиты могут эродировать в виде гранул из-за макроскопического хрупкого разрушения. Однако эти данные были получены в основном на установках, где углеграфиты подвергались воздействию мощных электронных пучков [8, 9, 16, 17]. Электроны с энергией $E_e > 100$ кэВ проникали вглубь материала, и их энергия выделялась не на поверхности, а в объёме мишени. Это приводило к резкому объёмному нагреву материала, возникновению в нём термических напряжений и макроскопическому разрушению [26].

Энергетический порог хрупкого разрушения графита был экспериментально определён в [9]. Отдельного внимания заслуживает величина эрозии, полученная в этом эксперименте: при плотности энергии в электронном пучке 30 МДж/м², что характерно для сильных срывов тока в ИТЭР, с поверхности графитовой мишени эродировал слой толщиной 500 мкм.

В то время был известен лишь один плазменный эксперимент [27], где наблюдалось хрупкое разрушение графита (среди продуктов эрозии были обнаружены углеродные частицы, которые имели такую же кристаллическую структуру, как и облучаемый плазмой графит). Сведений о хрупком разрушении углеграфитового композита при его облучении плазмой вообще не было. Поэтому к основным задачам исследований было отнесено следующее:

- экспериментальная проверка факта хрупкого разрушения графита и С—С-композита при воздействии мощного потока плазмы;
- получение количественных данных о вкладе хрупкого разрушения в результирующую эрозию углеграфитовых материалов.

Хрупкое разрушение графита. На первом этапе эксперимента была использована методика лазерного рассеяния для регистрации частиц, вылетающих с поверхности графитовой мишени, в реальном масштабе времени. Измерения проводились на установке МК-200 на расстоянии 5—10 мм от поверхности в центральной части мишени, где ожидалось наиболее сильное разрушение графита. Обнаружить частицы графита не удалось. Работоспособность самой диагностики сомнений не вызывала, так как она применялась ранее для регистрации и измерения скорости металлических капель. С учётом чувствительности применявшейся аппаратуры был сделан вывод: либо частиц графита нет вообще, либо их размер заведомо меньше 1 мкм.

Следует отметить, что в численных моделях, разработанных к тому времени, хорошо воспроизводились результаты плазменных экспериментов с графитом. В этих моделях учитывался лишь один механизм эрозии — испарение. Поскольку наблюдалось хорошее соответствие численных и экспериментальных данных, не было веских причин для привлечения более мощных механизмов эрозии, чем испарение.

Однако вопрос о хрупком разрушении графита, экспериментально обнаруженном в [27], оставался открытым, поэтому был проведён ещё один эксперимент. В нём использовался тот же метод, что и в [27]: около мишени устанавливались сборники продуктов эрозии, а затем анализировалось их содержимое. Сначала в качестве сборника применялась базальтовая вата (как в [27]), но после того, как она разрушилась под действием излучения мишени плазмы, её заменили на вольфрамовую вату. Внутри это-

го сборника были обнаружены частицы, имевшие такую же кристаллическую структуру, как и облучаемый плазмой графит. Таким образом, факт хрупкого разрушения графита был подтверждён. Следующей задачей экспериментальных исследований стало получение количественных данных о роли хрупкого разрушения в эрозии графита.

Была разработана система сбора и анализа продуктов эрозии. Частицы графита собирались при помощи ловушек, изготовленных из полированных керамических пластин белого цвета. (Керамика не плавится под действием излучения плазмы и на её поверхности отчётливо видны чёрные графитовые частицы.) Поверхность керамических сборников сканировалась на оптическом микроскопе, и изображения частиц регистрировались цифровой фотокамерой. Затем полученные изображения вводились в ПК, и при помощи специально разработанной программы определялись площадь проекции каждой частицы на поверхность сборника S и средний линейный размер частицы $d = (4S/\pi)^{1/2}$. На рис. 3 представлены результаты измерений, полученные в эксперименте с графитом МПГ-8.

Распределение частиц по размеру $N(d)$ имеет резкий максимум в районе $d = 2\text{—}3$ мкм (рис. 3, а). Более крупные частицы тоже наблюдаются (рис. 3, б), но их количество быстро уменьшается с ростом размера d . Подавляющее число частиц (90%) имеет размер меньше 5 мкм.

На рис. 4 приведено изображение поверхности графитовой мишени, на которой видны отдельные гранулы. По-видимому, именно эти гранулы вылетают с поверхности мишени при воздействии плазменного потока. По крайней мере, размер гранул, представленных на рис. 4, согласуется с размером частиц на рис. 3.

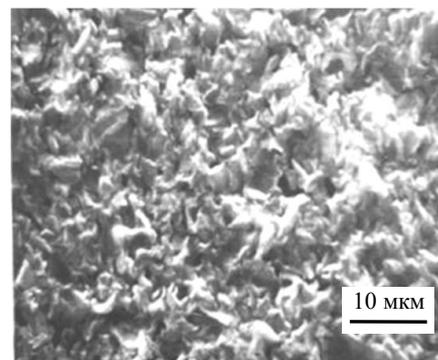
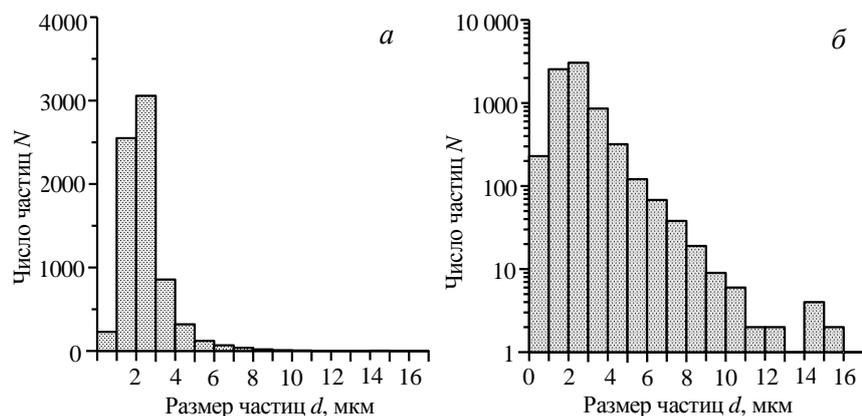


Рис. 3. Распределение эродировавших частиц графита МПГ-8 по размеру: а — линейный масштаб; б — логарифмический масштаб. Частицы получены на установке МК-200 после однократного облучения мишени плазмой ($q = 10$ МДж/м², $\tau = 50$ мкс)

Рис. 4. Структура поверхности графитовой мишени (МПГ-8) после 70 облучений на установке МК-200. Снимок получен на электронном микроскопе РЭММА-202

Частицы (гранулы), потеряв тепловой контакт с массивом графита, начинают интенсивно испаряться под действием теплового потока w_s , проходящего через экранирующий слой на поверхность мишени. Испарение круглой частицы радиусом r описывается уравнением

$$4\pi r^2 w_s = -q_v \frac{dV}{dt} = -q_v 4\pi r^2 \frac{dr}{dt}, \quad (2)$$

где $q_v = 100$ кДж/см³ — удельная теплота парообразования для графита. Интегрируя уравнение, получаем

$$r(t) = r_0 - \frac{w_s t}{q_v}, \quad (3)$$

откуда следует, что все частицы, диаметр которых меньше $d^* = 2(w_s t)/q_v$, должны полностью испариться к моменту времени t .

На установке МК-200 длительность плазменного импульса составляет $t = 50$ мкс. За это время частица может улететь от поверхности не далее, чем на $L = V_{\max} t = 5$ мм (где $V_{\max} = 100$ м/с — максимальная скорость графитовых частиц, зарегистрированная в экспериментах с электронными пучками). Можно считать, что частицы, образовавшиеся в результате хрупкого разрушения графита, остаются вблизи поверхности в течение всего процесса облучения. В этом случае на частицу действует такой же тепловой поток w_s , как и на поверхность мишени, а величина $w_s t$ равна интегральной тепловой нагрузке на ми-

шень $q_s \approx 30 \text{ Дж/см}^2$, которая измеряется экспериментально. Подставляя значение q_s в выражение $d^* = 2 (w_s t) / q_s = 2 q_s / q_v$, получаем $d^* = 6 \text{ мкм}$. Это означает, что графитовые частицы размером $d \leq 6 \text{ мкм}$ должны полностью испариться вблизи поверхности мишени.

Поскольку графит МПГ-8 состоит из зёрен размером несколько микрон, то основная масса частиц, образующихся в результате хрупкого разрушения, должна испаряться. В сборники (рис. 5), видимо, попадают те частицы, которые образуются на краях зоны облучения, где интенсивность плазменного воздействия значительно ниже, чем в центре. Это предположение, в частности, подтверждается тем, что в центральной части мишени на расстоянии 5—10 мм от поверхности частицы графита вообще не были обнаружены (методика лазерного рассеяния). Кроме того, максимальное количество частиц накапливается в ловушках, установленных сбоку мишени (сборник 1 на рис. 5), и их число резко уменьшается с расстоянием от поверхности (сборники 2, 3).

Как правило, частицы графита собирались в течение 1—2 облучений. При большем количестве облучений на поверхности керамического сборника появлялась тёмная плёнка осаждённого углеродного пара, что осложняло регистрацию частиц. На рис. 3 приведены результаты анализа 7500 графитовых частиц. Они были собраны в течение одного разряда на одном элементе керамического сборника размером $0,5 \times 0,5 \text{ см}$. Этот факт свидетельствует о том, что полное число частиц, вылетающих с поверхности графитовой мишени, весьма значительно.

Для получения количественных данных о вкладе хрупкого разрушения в общую эрозию графита был проведён ещё один эксперимент. Вокруг мишени на различных расстояниях от поверхности устанавливались большие молибденовые сборники. Через 15—20 облучений на поверхности сборников формировался слой продуктов эрозии, состоявший из кусочков кристаллического графита и сплошной плёнки аморфного углерода, образующейся из осаждённого углеродного пара [28]. Продукты эрозии счищались с поверхности сборников, а затем при помощи рентгеновского дифрактометра определялось процентное содержание кристаллической фракции. По результатам измерений доля кристаллических частиц графита составляет 10% [29]. Это даёт нижнюю оценку для вклада хрупкого разрушения в общую эрозию графита. Очевидно, что реальный вклад больше 10%, так как существенная часть графитовых частиц испаряется и присутствует в продуктах эрозии в виде аморфного углерода.

Были проведены расчёты эрозии графита с учётом его хрупкого разрушения [30]. Выяснилось, что в случае мелкозернистого графита хрупкое разрушение не приводит к существенному увеличению эрозии по сравнению с обычным испарением. Это объясняется тем, что графит эродирует в виде мелких частиц, которые быстро испаряются вблизи поверхности мишени. В результате возникает дополнительная экранировка поверхности и тепловая нагрузка на мишень снижается. Таким образом, несмотря на то, что графит подвержен хрупкому разрушению, этот механизм эрозии не вызывает сильных разрушений данного материала.

Хрупкое разрушение углеграфитового композита. Углеграфитовый композит (С—С-композит) SEP NB31 состоит из объёмного трёхмерного каркаса, образованного пучками углеродных волокон, ориентированных перпендикулярно друг другу, и углеродного наполнителя, заполняющего пространство между волокнами. Большая теплопроводность композита (больше, чем у графита) обеспечивается высокой теплопроводностью волокон, ориентированных перпендикулярно лицевой (облучаемой плазмой) поверхности материала (так называемых pitch-волокон). Волокна, направленные вдоль лицевой поверхности (rap- и needle-волокна), выполняют технологическую роль и применяются для «сшивки» перпендикулярных волокон.

Как теплозащитный материал дивертора, С—С-композит обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с графитом [31]. Однако эти достоинства проявляются в основном в случае умеренных тепловых нагрузок в штатных режимах работы токамака. В случае же больших тепловых потоков, характерных для срывов тока, преимущества С—С-композита практически исчезают.

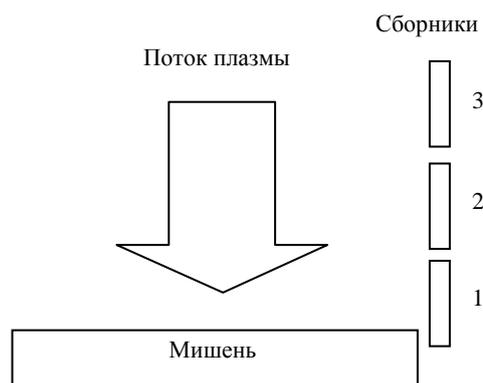


Рис. 5. Расположение сборников продуктов эрозии относительно мишени

С—С-композит подвержен хрупкому разрушению и эродирует в виде гранул. На рис. 6 представлен результат статистического анализа частиц, собранных около мишени. Размер частиц практически такой же, как и у графита (рис. 3). Однако С—С-композит эродирует не только в виде микронных частиц, но и в виде крупных осколков размером от нескольких десятков до более сотни микрон. В результате на поверхности мишени образуются сравнительно большие открытые полости (рис. 7). Это отличает С—С-композит от графита. Крупные частицы не испаряются полностью вблизи мишени, поэтому часть эродированного материала не принимает участия в экранировке поверхности.

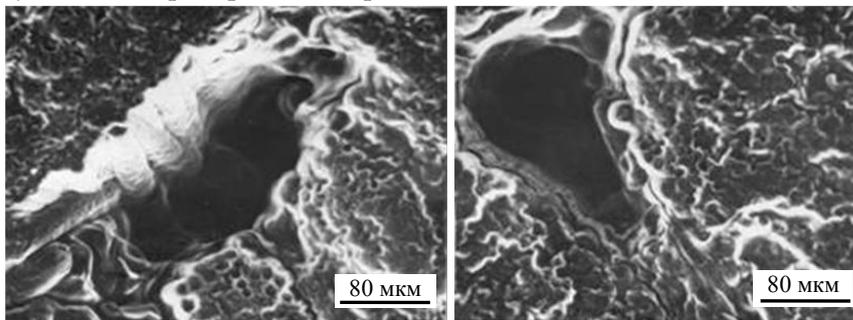
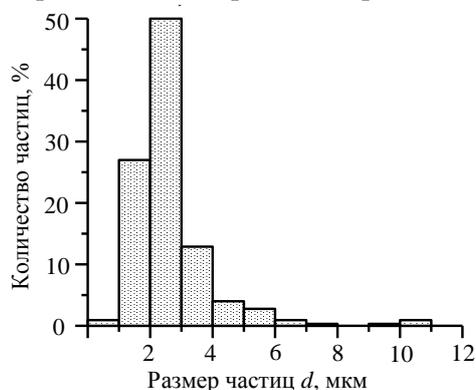


Рис. 6. Распределение по размеру мелких осколков углеграфитового композита SEP NB31 (МК-200, 1 импульс, $q = 10$ МДж/м², $\tau = 50$ мкс)

Рис. 7. Хрупкое разрушение С—С-композита SEP NB31 (образование полостей) после облучения плазмой на установке МК-200 (30 облучений, $q = 10$ МДж/м², $\tau = 50$ мкс). Снимки сделаны на электронном микроскопе РЭММА-202

На рис. 8, а запечатлён момент, когда кусочек С—С-композита уже отделился от мишени, но ещё не покинул поверхность. По-видимому, во время следующего облучения этот осколок вылетит из мишени и на поверхности появится ещё одна полость. На рис. 8, б приведён пример крупного осколка, который был обнаружен в керамической ловушке среди прочих продуктов эрозии.

Сильное растрескивание поверхности и образование открытых полостей происходят в основном на границах между продольными (направленными вдоль поверхности) и поперечными (перпендикулярными поверхности) пучками волокон (рис. 9). Это объясняется тем, что на стыке разнонаправленных пучков волокон возникают большие термические напряжения и в этих местах происходит наиболее интенсивное хрупкое разрушение.

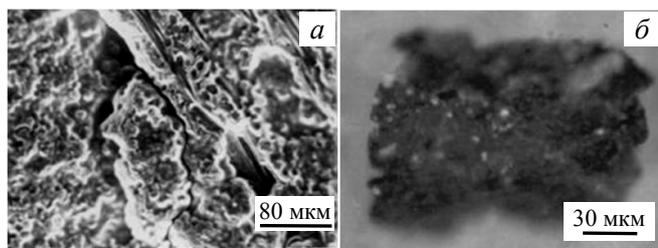


Рис. 8. Хрупкое разрушение С—С-композита SEP NB31 после облучения плазмой на установке МК-200 (30 облучений); а — растрескивание поверхности и формирование осколка; б — крупный осколок композита



Рис. 9. Структура поверхности SEP NB31 после 200 плазменных импульсов ($q = 10$ МДж/м², $\tau = 50$ мкс) на установке МК-200. Снимки получены на электронном микроскопе JEOL

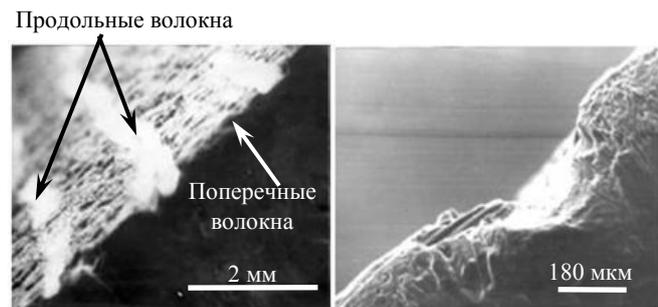


Рис. 10. Профиль поверхности С—С-композита после 50 облучений на установке МК-200 ($q = 10$ МДж/м², $\tau = 50$ мкс)

Инжекция крупных осколков несомненно вносит свой вклад в эрозию С—С-композита. Однако за одно облучение с поверхности композита вылетает не более 2—3 крупных осколков. Масса осколка размером 100—200 мкм составляет 10^{-3} — 10^{-2} мг. Учитывая, что мишень теряет несколько миллиграммов массы за одно облучение, можно сделать вывод, что крупные осколки не играют определяющей роли в эрозии композита.

На рис. 10 приведены снимки С—С-композита, сделанные с торца мишени. Видно, что

эрозия происходит с неодинаковой скоростью по поверхности мишени: поперечные волокна эродируют на меньшую глубину, чем продольные. Частично это связано с тем, что пучки поперечных волокон лучше отводят тепло с поверхности вглубь материала и, соответственно, они меньше испаряются. Кроме того, поперечные волокна в меньшей степени подвержены хрупкому разрушению (рис. 11).

Исследования эрозии С—С-композита были продолжены на установке КСПУ. При почти одинаковой плотности энергии $q = 10\text{--}30$ МДж/м² квазистационарный ускоритель КСПУ даёт потоки плазмы значительно большей длительности ($\tau = 500$ мкс), чем импульсный ускоритель МК-200 ($\tau = 50$ мкс). Увеличение длительности потока приводит к росту эрозии материала (при наличии экранирующего слоя), что позволяет более оперативно проводить испытания материалов.

Мишень из композита была подвергнута 250 облучениям. После каждой серии из $n = 25$ облучений измерялись потери массы Δm и определялась средняя величина потерь $\delta m = \Delta m/n$ для одного облучения данной серии. Оказалось, что потери массы δm растут с количеством облучений N (рис. 12). Это принципиально отличается от поведения графита, для которого величина δm практически не зависит от числа облучений. Если в начале испытаний потери массы у С—С-композита были меньше, чем у графита, то после 200 облучений они сравнялись. При этом сохранилась тенденция к росту δm (рис. 12).

Облучённая плазмой поверхность композита приобретает волнистый профиль (рис. 13). Это происходит из-за того, что пучки продольных волокон эродируют с большей скоростью, чем поперечные.

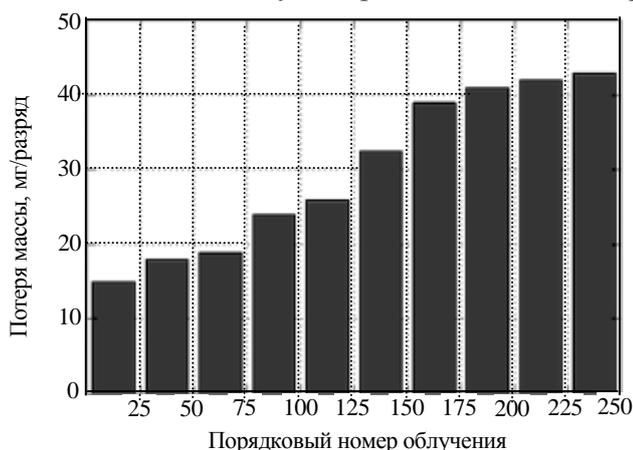


Рис. 12. Изменение потерь массы С—С-композита с ростом количества облучений на установке КСПУ ($q = 15$ МДж/м², $\tau = 500$ мкс)

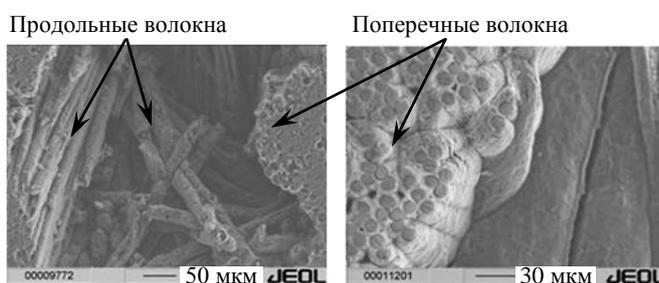


Рис. 11. Структура продольных и поперечных волокон после 50 облучений на установке МК-200 ($q = 10$ МДж/м², $\tau = 50$ мкс)



Рис. 13. Профиль поверхности С—С-композита после 50 облучений на установке КСПУ ($q = 15$ МДж/м², $\tau = 500$ мкс)

В начале облучения потери массы (см. рис. 12) почти полностью обусловлены эрозией продольных волокон (см. рис. 10, 14, а), а поперечные волокна вносят очень незначительный вклад. Однако после того, как продольные волокна эродируют на глубину около 0,5 мм (приблизительно после 100 облуче-

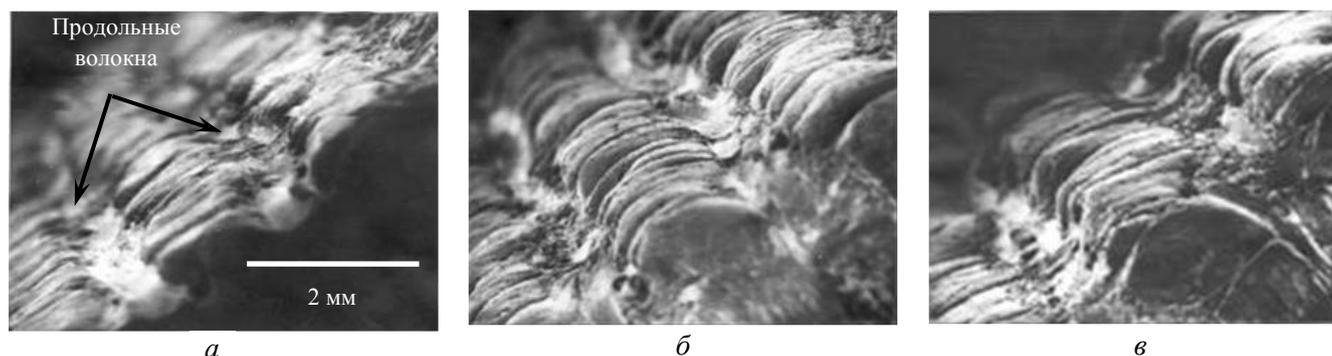


Рис. 14. Профиль поверхности С—С-композита после 50 (а), 150 (б), 200 (в) облучений на установке КСПУ

ний), эрозия поперечных волокон заметно интенсифицируется, что сопровождается увеличением потерь массы (см. рис. 12) и изменением профиля поверхности (рис. 14, б). Профиль становится более гладким, приобретает синусоидальную форму, и в дальнейшем он уже практически не меняется (рис. 14, в), т.е. эрозия начинает идти равномерно по всей поверхности композита. Это означает, что после определённого количества облучений поперечные волокна, которые должны обеспечивать высокую эрозионную стойкость материала, начинают эродировать с такой же скоростью, как и менее стойкие продольные волокна. Таким образом, эрозия С—С-композита в значительной степени определяется поведением продольных волокон, которые выполняют лишь технологическую роль и применяются для «сшивки» поперечных волокон.

Помимо исследований эрозии С—С-композита при тепловых нагрузках, ожидаемых при срывах тока в ИТЭР, были проведены измерения энергетического порога испарения, т.е. минимальной тепловой нагрузки, при которой композит начинает интенсивно испаряться [32]. Для этого плазменные нагрузки были снижены до уровня $q = 0,1—0,5$ МДж/м². Методом инфракрасной пирометрии измерялась температура поверхности мишени $T_s(t)$ в процессе плазменного воздействия, спектральными методами контролировался момент появления углеродного пара перед мишенью, и калориметрическими методами измерялась энергия, поступающая на поверхность мишени.

Как и ожидалось, интенсивное испарение композита было зарегистрировано при температуре поверхности около $T_s = 4000$ К. Однако достигалась эта температура при значительно меньших тепловых нагрузках, чем это следовало из расчётов [32], сделанных для табличных значений теплопроводности композита. Согласовать результаты эксперимента с расчётами удаётся лишь в том случае, если коэффициент теплопроводности композита уменьшить как минимум в 3—4 раза. Это объясняется тем, что в процессе плазменных облучений происходит растрескивание поверхностного слоя и его теплопроводность уменьшается. В результате интенсивное испарение начинается при меньших нагрузках.

Аналогичные измерения были проведены для мелкозернистого графита МПГ-8. Выяснилось, что интенсивное испарение графита начинается практически при таких же тепловых нагрузках, как и испарение С—С-композита.

Если просуммировать всю совокупность данных, то следует сделать следующий вывод: эрозионная стойкость дорогостоящего С—С-композита не хуже, чем у обычного мелкозернистого графита, но и не лучше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований показано, что при воздействии мощных потоков плазмы углеграфитовые материалы эродируют в виде пара и в виде твёрдых частиц, образующихся вследствие хрупкого разрушения материала.

Из-за хрупкого разрушения мелкозернистый графит эродирует в виде гранул размером меньше 5 мкм, которые почти полностью испаряются вблизи поверхности мишени. Это приводит к увеличению плотности приповерхностной углеродной плазмы и снижению тепловой нагрузки на мишень за счёт эффекта экранировки. В результате хрупкое разрушение не приводит к существенному увеличению эрозии мелкозернистого графита по сравнению с обычным испарением.

Поверхность углеграфитового композита растрескивается под воздействием плазмы. Наиболее сильное растрескивание происходит на границах между поперечными и продольными волокнами. Хрупкое разрушение композита происходит не только в виде мелких частиц, но и в виде крупных осколков. В результате на поверхности мишени образуются открытые полости размером более сотни микрон.

Когда композит только начинают облучать плазмой, эродируют в основном продольные волокна, а поперечные волокна вносят лишь незначительный вклад в общую эрозию. После того, как продольные волокна эродируют на глубину около 0,5 мм, интенсифицируется эрозия поперечных волокон, что приводит к росту суммарной эрозии материала. В дальнейшем скорость эрозии выравнивается по поверхности композита, причём происходит это из-за того, что поперечные волокна начинают эродировать с такой же большой скоростью, как и продольные технологические волокна.

Эрозия углеграфитового композита, который ещё не подвергался воздействию плазмы, приблизительно в 3 раза меньше, чем у графита. Однако после 100—200 облучений оба материала эродируют с практически одинаковой скоростью. Если сравнивать эти материалы в точки зрения их эрозии при переходных процессах в ИТЭР, то С—С-композит не лучше обыкновенного мелкозернистого графита.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 08-02-13612-офи_ц.

REFERENCES

1. **ITER Physics Basis.** — Nucler Fusion, 1999, vol. 39, p. 2137.
2. **Federici G., Scinner C.H., Brooks J.N. et al.** — Nuclear Fusion, 2001, vol. 41, p. 1967.
3. **Van der Laan J.G., Akiba M., Hassanein A. et al.** — Fusion Engineering and Design, 1991, vol. 18, p. 135.
4. **Drozдов A.A., Litunovsky V.N., Ljublin B.V. et al.** — Plasma Devices and Operations, 1992, vol. 2, p. 111.
5. **Arkhipov N.I., Bakhtin V.P., Safronov V.M. et al.** — J. of Nuclear Materials, 1995, vol. 220—222, p. 1066.
6. **Belan V.G., Levashov V.F., Maynashev V.S. et al.** — Ibid., 1996, vol. 233—237, p. 763.
7. **Chebotaev V.V., Garkusha I.E., Garkusha V.V. et al.** — Ibid., p. 736.
8. **Linke J., Akiba M., Bolt H. et al.** — Ibid., 1994, vol. 212—215, p. 767.
9. **Astrelin V.T., Burdakov A.V., Chebotaev P.Z.** — Nuclear Fusion, 1997, vol. 37, № 11, p. 1541.
10. **Nakamura K., Suzuki S., Tanabe T. et al.** — Fusion Engineering and Design, 1998, vol. 39—40, p. 295.
11. **Engelko V., Andreev A.D., Burtseva T. et al.** — J. of Nuclear Materials, 1996, vol. 233—237, p. 818.
12. **Arkhipov N., Bakhtin V., Kurkin S. et al.** — Ibid., p. 767.
13. **Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Zhitukhin A.M. et al.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2009, issue 2, p. 52 (in Russian).
14. **Arkhipov N.I., Bakhtin V.P., Vasenin S.G. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2001, vol. 27, № 3, p. 243 (in Russian).
15. **Croessmann C.D., Kislinski G.L., Whitley J.B.** — J. of Nuclear Materials, 1984, vol. 128—129, p. 816.
16. **Linke J., Akiba M., Bolt H. et al.** — In: Proc. of 16th Symp. of Fusion Technology. London, 1990, vol. 1, p. 428.
17. **Araki M., Akiba M., Seki M. et al.** — Nuclear Engineering and Design, 1992, vol. 19, p. 101.
18. **Safronov V., Arkhipov N., Bakhtin V. et al.** — J. of Nuclear Materials, 2001, vol. 290—293, p. 1052.
19. **Arkhipov N.I., Bakhtin V.P., Vasenin S.G. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1999, vol. 25, № 3, p. 263 (in Russian).
20. **Arkhipov N.I., Bakhtin V.P., Vasenin S.G. et al.** — In the same place, 2002, vol. 28, № 4, p. 1 (in Russian).
21. **Arkhipov N., Bakhtin V., Kurkin S.** — In: Proc. of 20th Symposium of Fusion Technology. Marseille, 1998, vol. 1, p. 105.
22. **Wuerz H., Pestchanyi S., Landman I. et al.** — Fusion Science and Technology, 2001, vol. 40, № 3, p. 191.
23. **Hassanein A., Konkashbaev I.** — Fusion Engineering and Design, 2000, vol. 51—52, p. 681.
24. **Martynenko Yu.V., Moskovkin P.G.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 1999, issue 2, p. 31 (in Russian).
25. **Martynenko Yu.V., Moskovkin P.G.** — In the same place, 2000, issue 1, p. 65 (in Russian).
26. **Usov N.A., Grebenshchikov Yu.B., Peschany S.E., Vyurts G.** — In the same place, issue 3, p. 36 (in Russian).
27. **Guseva M.I., Gureev B.M., Martynenko Yu.V. et al.** — Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Journal of technical physics), 1996, vol. 66, № 6, p. 106 (in Russian).
28. **Scaffidi-Argentina F., Safronov V., Arkhipov I. et al.** — J. of Nuclear Materials, 2000, vol. 283—287, p. 1111.
29. **Arkhipov N., Bakhtin V., Barsuk V. et al.** — Ibid., 2002, vol. 307—311, p. 1364.
30. **Wuerz H., Pestchanyi S., Bazylev B.** — In: Proc. of 27th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Budapest, 2000, vol. 24B, p. 368.
31. **Federici G., Andrew P., Barabaschi P. et al.** — J. of Nuclear Materials, 2003, vol. 313—316, p. 11.
32. **Safronov V.M., Arkhipov N.I., Landman I.S. et al.** — J. of Nuclear Materials, 2009, vol. 386—388, p. 744.

AUTHORS

Arkhipov N.I. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Safronov V.M. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; vsafr@triniti.ru

Barsuk V.A. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Zhitlukhin A.M. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; zhitlukh@triniti.ru

Klimov N.S. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; klimov@triniti.ru

Kurkin S.M. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Podkovyrov V.L. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; podk@triniti.ru

Received 19 October 2009
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2009, issue 4, pp. 3—13.