

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ (05.14.03)

УДК 538.971

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-22-33

Плазменно-тепловая нагрузка в диверторе термоядерного реактора-токамака

В.П. Будаев

Рассмотрена проблема предельной плазменно-тепловой нагрузки на первую стенку в токамаке-реакторе. На основании обзора имеющихся экспериментальных данных отмечено, что подавляющая часть теплового потока из плазмы на стенку поглощается поверхностью в узком радиальном слое шириной несколько миллиметров в зоне контакта сепаратрисы с диверторными пластинами. Выявленная эмпирическая закономерность существования верхнего предела для усредненной тепловой нагрузки на первую стенку токамака ставит проблемные вопросы обеспечения устойчивости стационарного разряда в реакторе-токамаке. Механизмы, ограничивающие предел длительности стационарного разряда в токамаке, еще не исследованы. В литературе представлены обзоры лишь ряда механизмов, в том числе, исследовано влияние пленок, сформированных из материалов эрозии на поверхности первой стенки токамака.

В настоящей работе проанализирована тепловая нагрузка на критическую область контакта материальной поверхности с плазменной сепаратрисой или последней замкнутой магнитной поверхностью. Это позволяет выработать дополнительные критерии оценки предельной плазменно-тепловой нагрузки на стенки в стационарном режиме токамака-реактора: основной вклад в данный эффект обеспечивается пределом потока тепла на диверторные пластины в узкой (миллиметрового масштаба) зоне взаимодействия сепаратрисы с материальной поверхностью. Предельный поток тепла на диверторные пластины зависит от условий на поверхности, в том числе от степени ее шероховатости, пористости и эффектов дугообразования. Для стационарного токамака-реактора следует ожидать, что в доминирующей степени процесс взаимодействия плазма–стенка определяют коллективные эффекты, развивающиеся в пространственно-временных масштабах, изменяющихся на 6...12 порядках величины. Многомасштабность процесса взаимодействия плазма–стенка в токамаке предполагает необходимость применения степенных законов для описания эффектов. Исходя из результатов анализа предельных тепловых потоков на стенку предложен степенной закон функциональной взаимозависимости электронной температуры и плотности плазмы вблизи сепаратрисы со степенной зависимостью, которую следует ожидать в Н-режимах стационарного токамака-реактора с предельными параметрами разряда, когда значительно меняются рельеф и свойства поверхности диверторных пластин, влияющих на перенос тепла через приповерхностный плазменный слой, в том числе с эффектами дугообразования.

Следует расширить базу экспериментальных данных для обобщающего анализа взаимозависимости электронной температуры и плотности плазмы вблизи сепаратрисы, что позволит приступить к выработке подходов к управлению взаимодействием плазма–стенка с целью достижения оптимальных условий поддержания стационарного разряда в токамаке-реакторе.

Ключевые слова: плазменно-тепловые испытания, материалы термоядерного реактора, вольфрам, дивертор, термоядерный реактор, токамак.

Для цитирования: Будаев В.П. Плазменно-тепловая нагрузка в диверторе термоядерного реактора-токамака // Вестник МЭИ. 2019. № 4. С. 22—33. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-22-33.

The Plasma Heat Load in the Diverter of a Tokamak Nuclear Fusion Reactor

V.P. Budaev

The problem of the limiting plasma heat load on the first wall in a tokamak fusion reactor is considered. It is pointed out, based on a review of available experimental data, that the major part of the heat flux from the plasma falling on the wall is absorbed by the surface in a narrow (a few several millimeters wide) radial layer in the zone where the separatrix comes in contact with the diverter plates. The revealed

empirical regularity relating to existence of an upper limit for the averaged heat load on the tokamak first wall is a factor generating the need to solve the challenging matters of ensuring stability of a stationary plasma discharge in a tokamak fusion reactor. The mechanisms imposing limits on the stationary discharge duration in a tokamak have not been investigated as yet. In the literature, only a few mechanisms are reviewed, including the influence of erosion material films formed on the tokamak first wall surface.

In the article, the heat load on the critical area of the contact between the material surface and a plasma separatrix or the last closed magnetic surface is analyzed. With such analysis, it becomes possible to elaborate additional criteria for estimating the limiting plasma heat load on the walls during steady-state operation of a tokamak fusion reactor: the main contribution in this effect is due to the heat flux limit on the diverter plates in a narrow (of a millimeter scale) zone of interaction between the separatrix and material surface. The limiting heat flux to the diverter plates depends on the conditions on the surface, including the degree of its roughness, porosity, and arcing effects. For a stationary tokamak fusion reactor, it should be expected that the plasma-wall interaction is mainly governed by the collective effects developing on space-time scales that vary by 6–12 orders of magnitude. The multiscale nature of the plasma-wall interaction in a tokamak reactor implies the need of using power laws to describe the effects.

An interrelation (in power law form) between the electron temperature and plasma density near the separatrix is proposed proceeding from the results of analyzing the limiting heat fluxes on the wall. Such dependence should be expected in the H operation modes of a stationary tokamak fusion reactor with the limit discharge parameters, in which significant changes occur in the diverter plate surface profiles and properties influencing the heat transfer through the plasma sheath layer, including arcing effects.

It is advisable to further extend the base of experimental data for carrying out a generalizing analysis of the interrelation between the electron temperature and plasma density near the separatrix. With such data at hand, it will become possible to develop approaches to control the plasma-wall interaction with a view to achieve the optimal conditions for maintaining stationary discharge in a tokamak reactor.

Key words: plasma-thermal tests, thermonuclear reactor materials, tungsten, diverter, thermonuclear reactor, tokamak.

For citation: Budaev V.P. The Plasma Heat Load in the Diverter of a Tokamak Nuclear Fusion Reactor. Bulletin of MPEI. 2019;4: 22—33. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-22-33.

Введение

Вопросы эксплуатации токамака-реактора в стационарном режиме относятся к наиболее важным в проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС) ввиду отсутствия экспериментальных данных и опыта длительного (многочасового) удержания плазмы в токамаках [1]. Во всех предыдущих экспериментах на токамаках разного размера плазму удерживали в импульсных разрядах. В подобных исследованиях степень влияния стенки на характеристики плазмы оценивали, в основном, лишь через уровень потока поступления примесей с материальной поверхности стенок в плазму. Предполагали, что одним из достаточных условий достижения высоких характеристик термоядерной плазмы будет лишь обеспечение высокой степени предварительной очистки стенок от примесей (кислорода, углерода, азота и их химических соединений) и создание условий подавления или существенного уменьшения эрозии стенок. Такой упрощенный подход к анализу влияния стенки (в котором она предполагается лишь как пассивный элемент ограничения объема удержания плазмы) в токамаке был достаточным для технологии получения стабильного разряда в импульсном режиме, когда масштабы времен удержания энергии и длительности разряда отличались незначительно (всего на 1...2 порядка величины). Вместе с тем, упрощенный подход недостаточен для оценки параметров удержания плазмы в стационарном токамаке-реакторе и создания оптимальных условий его эксплуатации.

Опыты на современных крупных токамаках с длительным удержанием плазмы (см. данные экспериментов на токамаках EAST [2], KSTAR [3]) указывают на значительное (если не доминирующее) влияние характеристик взаимодействия плазма – стенка на условия

удержания и достижения высоких параметров плазмы, требуемых для зажигания DT-реакции. Проведенный обобщающий анализ предыдущих экспериментов на токамаках разных размеров [1] показал зависимость длительности разряда в токамаке от вводимой мощности. Выявлена эмпирическая закономерность — существование верхнего предела для усредненной тепловой нагрузки на первую стенку токамака. Величина отношения $P_{\text{н}}/S$ ($P_{\text{н}}$ — мощность нагрева плазмы или мощность ее полных тепловых потерь (в стационаре); S — площадь первой стенки, обращенной к плазме) для многих токамаков равна 0,2 МВт/м² и в рекордных разрядах не превышает 0,3...0,4 МВт/м². При этом отмечается уменьшение времени удержания плазмы от вводимой мощности нагрева плазмы. В этой зависимости находят данные, полученные не только в экспериментах на токамаках, но и стеллараторах. Механизмы, обеспечивающие предел длительности разряда, в экспериментах не исследованы.

Рассмотрено несколько механизмов, ограничивающих длительность. Изучено влияние пленок, сформированных из материалов эрозии на поверхности первой стенки токамака. При достижении критической толщины пленок (в процессе их роста — осаждения со временем) происходит их разрушение, и материал пленок, а также накопленный в них рабочий газ, проникают в плазму и ведут к срыву (прерыванию) разряда. Пленки также могут формировать условия для инициации дуговых процессов. Данная гипотеза соотносится с экспериментальным наблюдением большого количества пористых пленок и пылевых частиц в камере токамаков и других термоядерных установок после длительной эксплуатации. Вместе с тем, убедительные доказательства в пользу этой гипотезы отсутствуют, и требуются подробный анализ процесса, исходя из име-

ющихся экспериментальных данных, а также проведение соответствующих экспериментов.

На этом пути необходимо рассматривать следующие вопросы, относящиеся к проблеме материалов первой стенки в термоядерном реакторе:

- формирования (роста) пленок и пересажженных слоев из продуктов эрозии, их влияния на плазму и потенциальной возможности вызова срыва разряда и ограничения его длительности;

- образования пыли при разрушении поверхности и пленок, динамики их поступления в разряд, критического влияния пылевых частиц на характеристики плазмы;

- модификации структуры поверхности материала стенки (изменения теплопроводности и условий плавления, рекристаллизации и др.), связанного с этим изменения баланса токов (эффектов неамбиполярности) из плазмы на стенку и влияния этих эффектов на устойчивость и стабильность разряда;

- захвата экстремально большого объема рабочего газа в поверхностных слоях (в особенности в пересажженных пористых слоях) и оценки возможности негативного влияния такого эффекта на устойчивость разряда;

- процессов эрозии — физического и химического распыления, капельной эрозии, пересаживания, растрескивания материала, радиационных повреждений материала в условиях нейтронной нагрузки, динамики и коллективных эффектов процессов эрозии.

В течение длительной эксплуатации материальные поверхности обращенных к плазме элементов первой стенки в стационарном режиме токамака-реактора в условиях высоких плазменно-тепловых нагрузок подвергаются значительной эрозии с изменением макро- и микроструктуры. Состояние материальной стенки определяет теплоперенос из плазмы на стенку и создает новые условия взаимовлияния стенки и плазмы, отличные от первоначальных условий взаимодействия с гладкой стенкой.

На основе краткого обзора экспериментальных данных рассмотрены тепловые нагрузки на различные зоны поверхности первой стенки, обращенные к плазме. Отмечена критическая область контакта материальной поверхности с плазменной сепаратрисой (последней замкнутой магнитной поверхностью (ПЗМП)). Это позволяет выработать дополнительные критерии оценки предельной плазменно-тепловой нагрузки на стенки в стационарном режиме токамака-реактора.

Характеристики плазмы вблизи сепаратрисы. Рост пористых пленок и слоев в токамаках

Приведен краткий обзор и частично обобщающий анализ экспериментальных измерений характеристик плазмы вблизи сепаратрисы и структуры поверхностей, обращенных к плазме, включая пересаживаемые пленки и слои. Эмпирические данные позволяют выработать расширенный подход к изучению вопроса о предельной длительности стационарного разряда токамака-реактора.

В стационарной стадии разряда в токамаке-реакторе суммарная тепловая нагрузка на диверторные пластины определяется аномальным переносом плазмы поперек магнитного поля. В зоне плазменной сепаратрисы и в СОЛ (от англ. SOL — Scrape-off-layer, зона периферийной плазмы) значительную роль играют эффекты сильной турбулентности плазмы, которая определяет поперечный перенос плазмы — аномальную диффузию [4, 5].

Тепловая нагрузка на диверторные пластины максимальна в зоне контакта сепаратрисы с поверхностью, уровень нагрузки уменьшается в радиальном направлении. Радиальный размер слоя, в котором уровень тепловой нагрузки падает в e раз (так называемый λ_q масштаб), рассматривается в литературе как интегральная характеристика пиковой тепловой нагрузки на материальную стенку токамака. Таким образом, наибольшая часть теплового потока q осаждается из плазмы на материальную стенку (диверторные пластины) в радиальном слое шириной $\sim \lambda_q$. Экспериментальные наблюдения и теоретические оценки показали, что в современных крупных токамаках λ_q составляет 1,5...5 мм (рис. 1) [6]. Например, в токамаке JET $\lambda_q \sim 1,5...2$ мм. Отмечается уменьшение масштаба λ_q с увеличением размера токамака.

Для описания ширины такого слоя (λ_q масштаба) предложен эмпирический скейлинг [7], рассматривающий перенос тепла в периферийной плазме в рамках дрейфовой модели:

$$\lambda = 5671 P_{SOL}^{1/8} \frac{(1+k^2)^{5/8} a^{17/8} B^{1/4}}{I^{9/8} R} \times \left(\frac{2\bar{A}}{\bar{Z}^2(1+\bar{Z})} \right)^{7/16} \left(\frac{Z_{эф} + 4}{5} \right)^{1,8}, \quad (1)$$

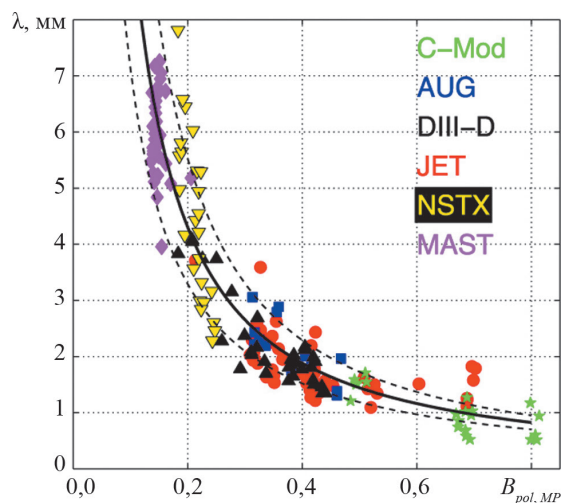


Рис. 1. Зависимость радиального размера слоя λ_q от полоидального магнитного поля (тока плазмы) для токамаков. Линии — подгонка степенной функцией из [5]

где P_{SOL} — мощность, выводимая в СОЛ; k, A, Z — параметры плазмы токамака, все в единицах СИ; R, a — большой и малый радиусы токамака; B — тороидальное магнитное поле; I_p — ток в плазме; $Z_{эф}$ — эффективный заряд.

В этой модели, а также в других предлагаемых моделях с учетом неоклассических и иных эффектов [6], рассмотрена степенная зависимость от тока плазмы I_p :

$$\lambda_q \sim 1/I_p^\zeta, \quad \zeta \sim 1. \quad (2).$$

Она описывает экспериментальные наблюдения в современных токамаках (см. рис. 1) [6]. В подобных подходах предполагают, что масштабы спада потока λ_q совпадают с масштабами уменьшения плотности плазмы λ_n в радиальном направлении ($\lambda_q = \lambda_n$ в [6]).

Существует предположение о преимущественном влиянии движения турбулентных структур — $\nabla B \times B$ -дрейфа на перенос плазмы через сепаратрису (например, в эвристической модели Голдстоуна — HD-модель, рассматривающая дрейфовые движения на границе сепаратрисы и СОЛ) [7]:

$$\lambda_q = V_{\nabla B \times B} \tau = V_{\nabla B \times B} (L_{\parallel} / C_s / 2) \approx 2(a/R) \rho_{Li}, \quad (3),$$

где $V_{\nabla B \times B}$ — скорость поперечного дрейфа в градиентном магнитном поле; τ — время ухода частиц на стенку вдоль магнитного поля; L_{\parallel} — продольная длина силовой магнитной линии в СОЛ; C_s — скорость ионного звука в СОЛ; ρ_{Li} — ларморовский радиус иона в СОЛ.

Данная оценка соотносится с представлениями об аномальном переносе в периферийной плазме, в которой доминирует движение, в том числе поперек магнитного поля, когерентных турбулентных структур, называемых блобами, бёрстами, джетами и т. п. [4, 5].

Для токамака-реактора с размерами ИТЭР в разрядах с DT-плазмой модель (1) предсказывает величину $\lambda_q \cong 1,1$ мм при следующих параметрах разряда: ток плазмы — 15 МА; мощность теплового потока, выносимого из центральной зоны токамака через сепаратрису в пристеночную плазму СОЛ, — $P_{SOL} = 100$ МВт. Таким образом, предсказывается, что ширина слоя λ_q в токамаке-реакторе масштаба ИТЭР будет меньше, чем в современных крупных токамаках, это ведет к большим локальным тепловым нагрузкам на материальные пластины дивертора.

Оценки тепловых нагрузок в токамаке-реакторе размера ИТЭР в зоне контакта с сепаратрисой в радиальном слое шириной $\sim \lambda_q$ дают величину мощности потока тепла на диверторные пластины $q_{\parallel} \sim 600 \dots 3000$ МВт·м⁻². Для уменьшения тепловой нагрузки можно распределить поток по поверхности в диверторе, обеспечив наклон магнитных линий к поверхности пластин под углом 3°, что понизит поток тепла в 20 раз. Однако в токамаке-реакторе (например, в ИТЭР) даже эти меры не позволяют уменьшить поток тепла на материальную поверхность дивертора ниже критического, уровень стационарных тепловых потоков на материал дивертора в

ИТЭР находится в диапазоне от 5 до 30 МВт·м⁻². Таким образом, диверторные пластины ИТЭР подвергаются повышенной тепловой нагрузке вблизи зоны контакта с сепаратрисой. Если же оценивать нагрузки в токамаке-реакторе следующего поколения ДЕМО следуя скейлингам (1), (2), то они выглядят еще более опасными. Напомним, что инженерные требования, выдвигаемые к максимальной тепловой нагрузке на материалы в токамаке-реакторе, ограничены средней величиной 10 МВт·м⁻², приемлемой для тугоплавких материалов (вольфрама).

Помимо стационарной плазменно-тепловой нагрузки на пластины дивертора в токамаке-реакторе в срывах и ЭЛМах ожидаются импульсные кратковременные экстремально высокие нагрузки на диверторные пластины, которые уже в токамаке-реакторе масштаба ИТЭР достигают величины 0,6...3,5 ГВт·м⁻² [8]. Мощные импульсные нагрузки ведут к перегреву поверхности и даже к плавлению материала, в том числе, вольфрама, который предлагается к использованию в качестве материала пластин дивертора [9]. Повышенные плазменно-тепловые нагрузки приводят к значительной эрозии материала, изменению структуры поверхности и формированию переосажденных пленок и слоев из эродированного материала.

Изменение структуры поверхности, пленки и переосажденные слои.

В токамаках интенсивная эрозия материальных поверхностей первой стенки и дивертора, контактирующих с плазмой, приводит к изменению структуры поверхности и формированию значительного количества переосажденных пленок и слоев нерегулярной формы [9, 10]. В качестве материалов первой стенки в зоне контакта с плазмой в экспериментах использовали углеродные материалы (графит, CFC-композит), вольфрам, молибден, бериллий. В опытах на токамаках с первой стенкой из графитовых материалов (даже при невысокой плазменно-тепловой нагрузке на первую стенку) было обращено внимание на формирование пленок в результате эрозии графитовых лимитеров и диверторных пластин. Предполагалось, что структура переосажденных слоев и пленок определяется химической активностью углерода при его эрозии под действием плазмы и последующей агломерацией после переосаждения на поверхность. Ожидалось, что в полностью металлической камере ее эрозия и образование переосажденных пленок будут значительно снижены. Однако в проведенных экспериментах с металлической стенкой на токамаках JET (вольфрам и бериллий) [11], AUG (вольфрам) [12], Alcator-CMOD (вольфрам) [13], T-10 (вольфрамовая диафрагма) [14] выявлены эффекты значительной эрозии вольфрама в зонах контакта сепаратрисы (ПЗМП) с материальными поверхностями и образование неоднородных, в том числе пористых, слоев материала в этих зонах. Приведем краткое описание наблюдений свойств материаль-

ной поверхности в двух зонах — вблизи и вдали зоны контакта сепаратрисы (ПЗМП) с материальной поверхностью в токамаке.

Переосажденные пленки на стенках токамака вдали от зон максимальной плазменно-тепловой нагрузки.

Эродированные материалы из зон эрозии в камере токамака переосаждаются в виде ионов примеси на другие зоны стенки, при этом возможен захват в переосажденные слои и пленки основных ионов плазмы (дейтерия или водорода) [9, 10, 15]. В токамаках с графитовой первой стенкой при ее эрозии и переосаждении эродированного материала формируются углеродные и углеводородные пленки с нерегулярными формами, например, глобулярной, типа «цветная капуста», овоидальной, стратифицированной, колоннообразной [10]. Измерения в различных токамаках с материалами первой стенки из углеродных материалов показали, что скорость роста углеводородных пленок находится в пределах от 1,5 до 12 нм/с [10].

Классифицируют гранулированные («мягкие») и стратифицированные (гладкие или «твердые») микроструктуры переосажденных углеродных и углеводородных пленок. При эрозии металлов под действием плазмы в токамаках с металлической облицовкой первой стенки и/или дивертора наблюдаются металлические пленки различных форм и структур [9, 15, 16]. Измерения скорости роста металлических пленок (вольфрамовых и бериллиевых) в токамаках не проводили.

Множество образцов пленок и слоев из различных материалов (углерода, вольфрама), найденных в токамаках, имеют шероховатую поверхность со схожей иерархической структурой, что свидетельствует о доминирующем влиянии на рост пленок механизмов агломерации в условиях взаимодействия плазма-стенка, а не элементарных химических реакций [17, 18]. Пористость и шероховатость пленок приводит к эффекту захвата рабочего газа (изотопов водорода) в порах и на большой площади неоднородной (развитой) поверхности. Аморфные слои и пленки на поверхности легко отделяются от подложки и разрушаются.

Наблюдения в токамаках с графитовыми элементами первой стенки показали, что толщина отделенных (либо легко отделяемых со стенок камеры) углеродных и углеводородных пленок составляет 10...100 мкм. В токамаках наблюдаются также отделяемые металлические и композитные пленки. При эксплуатации вольфрамовых элементов первой стенки образуются переосажденные вольфрамовые пленки [14], детальные исследования их структуры еще не проведены. Инспекция вольфрамового лимитера в токамаке Т-10 после экспериментальной кампании выявила значительную эрозию вольфрамовой поверхности вблизи ПЗМП и формирование металлических переосажденных пленок, слоев и капель, осажденных в зоне СОЛ (рис. 2).

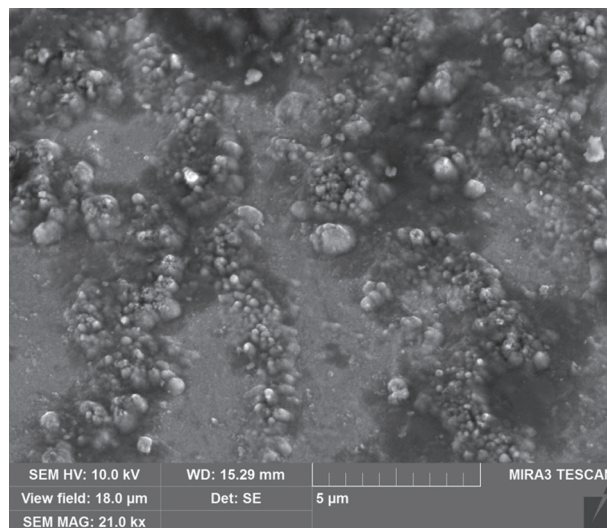


Рис. 2. Вольфрамовые переосажденные пленки, слои и капли на внутреннем обводе вольфрамового лимитера в зоне СОЛ в токамаке Т-10

Разрушение пленок приводит к формированию пыли, содержащей рабочий газ. Размер пылевых частиц может быть микронного и нанометрового масштабов (данные из токамака Т-10 [14, 19]). Поступление пыли в разряд может серьезно ухудшить свойства плазмы в токамаке-реакторе. Количество пыли в реакторе необходимо контролировать.

Изменение структуры материала в зоне контакта сепаратрисы (ПЗМП) с материальной поверхностью первой стенки.

В токамаках изменение структуры поверхности материалов в зоне контакта сепаратрисы (ПЗМП) формируется в условиях комбинированного воздействия мощных потоков тепла и частиц плазмы [17, 18]. В реальных экспериментальных условиях морфология поверхности в этих зонах эволюционирует под влиянием нескольких механизмов, включая процессы эрозии, плавления и движения расплава по поверхности, переосаждения материалов эрозии, отверждения и рекристаллизации, растрескивания. Указанные механизмы могут повторяться в серии последовательных разрядов, вызывая значительные изменения поверхности. В последние годы на поверхности данных зон обнаружены формируемые под действием плазмы слои, которые на микро- и макро-масштабах имеют неоднородную стохастическую структуру, в том числе с уникальной иерархической гранулярностью, (токамаки Т-10 и JET [9, 20]). Слои с неоднородной и стохастической структурами при действии плазменных потоков в токамаке формируются на графитовых и вольфрамовых пластинах [17].

В крупномасштабном токамаке в результате действия множественных эффектов при повышенной плазменно-тепловой нагрузке (более 5 МВт/м² в стационарной стадии) в зоне контакта сепаратрисы происходят

значительные изменения структуры и физико-химических свойств поверхности, что влияет на параметры взаимодействия плазма – стенка. Образование стохастической развитой и высокопористой поверхности при экстремальной плазменно-тепловой нагрузке вызвано коллективными эффектами и известно в физике конденсированного состояния вещества [14, 17, 18]. В зоне экстремальной нагрузки плазмы на материал протекают эрозия и плавление поверхности, движение расплава и продуктов эрозии при кластеризации поверхности идет под влиянием стохастических электромагнитных полей, формируемых турбулентностью приповерхностной плазмой [4, 5]. При критической нагрузке на материальную поверхность вклад в процесс кластеризации вносят эффекты движения и релаксации материала по поверхности (модели в [21, 22]). Данные множественные эффекты приводят к механизму стохастической кластеризации на масштабах от нескольких десятков нанометров до сотен микрометров [17, 18].

Проблема формирования пористых слоев на поверхности вольфрама имеет значимую актуальность для токамака-реактора, поскольку в ИТЭР из вольфрама будет изготовлен дивертор, и вольфрам следует рассматривать как материал первой стенки и/или дивертора токамаков-реакторов следующего поколения.

Роль дуговых процессов.

Роль дуговых процессов в проблеме эрозии материалов первой стенки в токамаке и других термоядерных установок затрагивается последние десятилетия в большом количестве работ [23]. Рассматривается механизм электрического пробоя двойного слоя на поверхности контакта плазма – стенка с образованием униполярных дуг. Обсуждается связь возникновения таких дуг с образованием пленок на поверхности металлов [1], неоднородная поверхность которых меняет структуру электрических полей в плазменном слое над

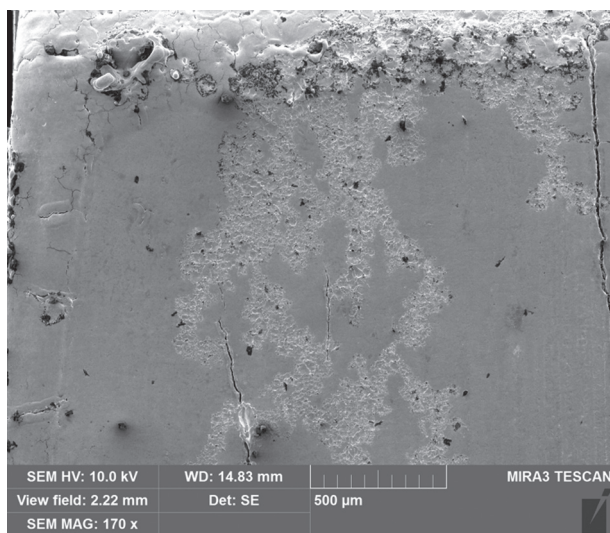
поверхностью и способствует пробоям. В особенности такому пробоя способствует развитая неоднородная поверхность (см. рис. 2). В экспериментах на токамаке Т-10 с вольфрамовыми лимитерами наблюдается интенсивная дуговая эрозия с образованием глубоких кратеров (рис. 3, 4). Дуговые процессы на пористых материалах — вольфрамовом пухе исследовали в опытах на токамаке COMPASS [24].

Важность исследования влияния неоднородных и пористых поверхностных слоев вольфрама (дугообразование, комбинированное воздействие импульсных тепловых нагрузок и повышенного потока частиц, восстановление пористых слоев после мощных импульсных нагрузок, накопление трития и др.) на производительность работы ИТЭР кратко рассмотрено и суммировано в обзоре [9]. Отмечается, что такие пористые слои могут значительно влиять на характеристики разрушения поверхности, в том числе, на пороговую энергию, что требует дополнительного внимательного изучения.

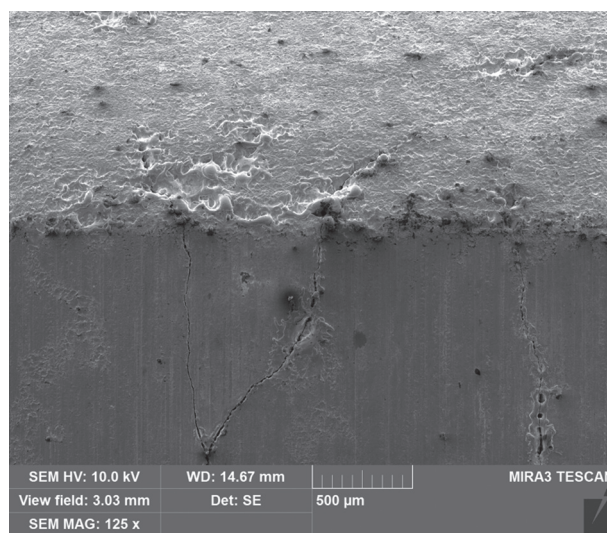
Взаимодействие плазмы с высокопористой неоднородной поверхностью.

Значительные изменения физико-химических свойств высокопористой (высокоразвитой) поверхности (в сравнении с гладкой) приводит к изменению влияния на параметры взаимодействия плазма – стенка. Рассматриваются как негативные последствия изменений структуры поверхности на удержание плазмы [1, 9], так и возможность использования таких поверхностей для управления свойствами плазмы и оптимизации параметров удержания плазмы в токамаках и других термоядерных установках [9].

В экспериментальных и теоретических исследованиях этой проблемы следует учитывать следующие моменты:



а



б

Рис. 3. Дуговые трэки (а) и кратеры (б) на поверхности вольфрамового лимитера вблизи ПЗМП в токамаке Т-10

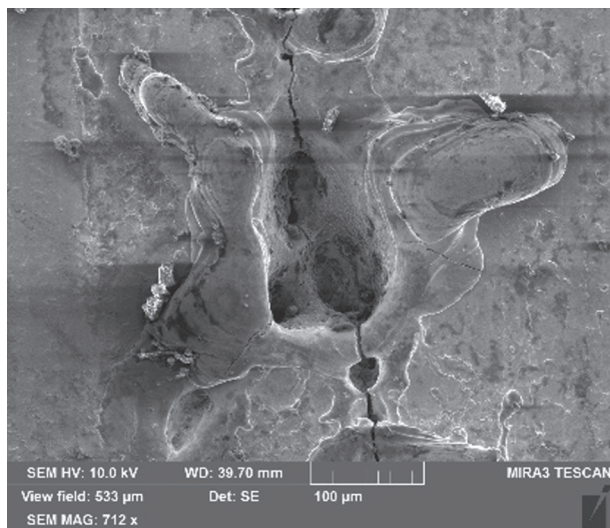


Рис. 4. Глубокий дуговой кратер — катодное пятно второго рода на краю вольфрамовой пластины лимитера в токамаке T-10

- коллективные эффекты множества процессов, в том числе кинетический подход для теоретического описания [17, 25];
- роль термоэмиссии и дуговых процессов на перегретой поверхности;
- рециклинг и влияние примесей, в том числе на зону «пьедестала» и транспортного барьера плазменного разряда в токамаке;
- роль неамбиполярного потока и турбулентности, которые могут обеспечить уширение зоны критической тепловой нагрузки в зоне контакта с сепаратрисой [26].

Наиболее детально процесс образования пористого вольфрама при облучении гелиевой плазмой исследован в плазменной установке AIPD [27, 28]. Были зарегистрированы параметры взаимодействия плазмы с пористой поверхностью, менялся профиль электрического потенциала в переходном слое между плазмой и поверхностью, что вызывало перенос плазмы и теплового потока из плазмы на поверхность. Можно предсказать, что в ИТЭР микроструктура вольфрамовой поверхности, измененной под действием гелиевой плазмы с образованием пористой вольфрамовой поверхности, обеспечит коэффициент передачи тепла на поверхность в 2 раза больше в сравнении с гладкой поверхностью металлического вольфрама при стандартных условиях распределения потенциала в приповерхностном переходном плазменном слое. Необходимо подробное экспериментальное и теоретическое исследование этого эффекта.

Для детального изучения следует проводить комбинированные испытания материалов первой стенки реактора (в том числе вольфрама) с применением стационарных и экстремальных импульсных плазменных и пучковых нагрузок. Наиболее перспективными элементами первой стенки и дивертора в зоне с макси-

мальной плазменно-тепловой нагрузкой в стационарном реакторе-токамаке представляются вольфрамовые пластины с высокопористой стохастической поверхностью. Их получение планируется в новой плазменной установке НИУ «МЭИ» [29] с целью дальнейших плазменно-тепловых испытаний, запланированных в токамаке WEST (Франция) с полностью вольфрамовой первой стенкой в стационарных разрядах большой длительности.

Критерий предельной плазменно-тепловой нагрузки в зоне контакта с сепаратрисой

Описан подход, детально учитывающий теплоперенос из плазмы на материальную первую стенку в проблеме предельной тепловой нагрузки на стенку в токамаке (в дополнение к описанному эмпирическому критерию существования предела P_{H}/S [1]). Рассмотрим существование предела переноса тепла из плазмы на стенку в стационарном разряде токамака-реактора.

Следует проанализировать критический слой максимальной нагрузки вблизи контакта сепаратрисы (ПЗМП) с поверхностью. В диверторном токамаке — это зона на диверторных пластинах, а в лимитерном токамаке — это край лимитера, ограничивающего плазменный разряд. Следует обратить внимание, что тепловой поток, выносимый плазмой из центральной зоны через ПЗМП, преимущественно поглощается в узком λ_q слое на диверторных пластинах вблизи контакта с сепаратрисой. Это отличает приведенное ниже описание от ранней модели, в которой изучается площадь всей первой стенки в [1].

Дальнейший анализ имеет цель лишь качественно наметить пути рассмотрения проблемы. Пока не учитываются эффекты, связанные с продольной проводимостью в СОЛ, изменением условий в плазменном пограничном слое (в англ., Sheath-layer) вдоль магнитного поля, полоидальной асимметрией ларморовского радиуса, асимметрией между внешним и внутренним обводами тора, включая проблему конвекции Пфирша–Шлютера. Все эти вопросы качественно изложены в литературе [6, 7]. В то же время, окончательные выводы о степени влияния каждого такого эффекта все еще отсутствуют в литературе. Рассмотрение таких эффектов, возможно, внесет значительные коррективы в предлагаемые ниже критерии. Вместе с тем, изложенные основные положения помогут определить подходы к оценке расширенных критериев предельной тепловой нагрузки на первую стенку в стационарном токамаке-реакторе.

Если предположить на основании [1], что существует предельное значение плотности тепловой нагрузки на стенки для всех токамаков $W_s = 0,2$ МВт/м², то следует рассмотреть преимущественно вклад в такой эффект от условий в зоне контакта сепаратрисы (или ПЗМП) с материальной поверхностью.

Предположим, что есть предел поглощения мощности (на единицу площади) материалом в зоне контакта с сепаратрисой (ПЗМП). Это соотносится с условиями ограничения теплового потока энергии W_{\max} из плазмы на поверхность [30]:

$$W_{\max} = \delta_w \Gamma T_e, \quad (4),$$

где Γ — поток ионов; $W_{\max} \sim nT_e$ [7, 30]; δ_w — коэффициент теплопереноса, зависящий от условий на материальной поверхности и в приповерхностном (пограничном) плазменном слое.

В классическом представлении задачи о дебаевских слоях над поверхностью $\delta_w \approx 10$ при условии гладкой, плоской металлической поверхности и ее идеальной проводимости [30]. Величина δ_w также зависит от условий вторичной электронной и ионной эмиссий. В реальных условиях тепловой поток из плазмы на стенку подчиняется геометрии поверхности, в том числе, наличию острых вершин на рельефе. При значительной коррозии поверхности такой поток обусловлен степенью шероховатости и неоднородности рельефа, который способен существенно увеличить вторичную электронную эмиссию и изменить условия неамбиполярной диффузии. Значительное увеличение теплопередачи следует ожидать за счет дугообразования на шероховатой и пористой металлической поверхностях [23].

Наибольшая часть мощности, выносимая из центральной зоны разряда токамака через ПЗМП, должна распределиться на слой площадью $2\pi R\lambda_q$ (в случае диверторной конфигурации). Для токамака с полоидальным либо другим локальным лимитером площадь выхода энергии будет равна $(2\pi k_d)\lambda_q$, где коэффициент $k_d = 1 \dots 0,1$ учитывает геометрию полоидального лимитера (например, $k_d \approx 0,1$ для грибового лимитера токамака Т-10, занимающего 1/10 часть полоидального обхода).

Следует учитывать угол α между магнитными силовыми линиями и поверхностью диверторной пластины, используя замену $\lambda'_q = \lambda_q \sin(\alpha)$. Приведем качественные оценки без учета этого эффекта.

Следует оценить общий поток из центральной зоны разряда через площадь ПЗМП, равную $2\pi R^2\pi a$, с плотностью потока $W_{\perp} \sim 2n_{sep} T_{sep}$ [6] (n_{sep} , T_{sep} — плотность плазмы и температура электронов на сепаратрисе). Пусть на сепаратрисе температура электронов равна температуре ионов.

Если предположить, что наибольшая часть теплового потока из плазмы вдоль магнитного поля выносится на поверхность диверторных пластин в слой шириной λ_q , и он не может превысить предельную величину, определяемую предельной $W_{\max} = \text{const}$ и площадью поверхности $2\pi R\lambda_q$, т. е. $W_{\max} 2\pi R\lambda_q = \text{const}$, то:

$$W_{\perp} (2\pi R^2\pi a) / (2\pi R\lambda_q) = \text{const},$$

$$\text{или } (2n_{sep} T_{sep}) 2\pi a / \lambda_q = \text{const};$$

$$n_{sep} T_{sep} a / \lambda_q = \text{const}.$$

Если допустить скейлинг, рассматриваемый в модели (3) $\lambda_q \approx 2(a/R)\rho_{Li} \sim T_{sep}^{1/2}$ ($\rho_{Li} \sim T_{sep}^{1/2}$), то для стационарной нагрузки:

$$n_{sep} T_{sep}^{1/2} a = \text{const}. \quad (5).$$

Данный скейлинг следует проверить на имеющейся экспериментальной базе данных токамаков.

Рассмотрим эмпирическое наблюдение универсального порогового уровня теплового потока $A = P_H/S = 0,2 \dots 0,4$ МВт/м²; $P_H = W_{\perp}$ [1].

В таком случае предельный поток пропорционален общей площади ПЗМП:

$$W_{\perp} = A 2\pi R 2\pi a \sim Ra.$$

Исходя из предположений описанного подхода, этот поток должен поглощаться в слое $2\pi R\lambda_q$ для диверторного токамака или в слое $2\pi a\lambda_q$ для лимитерного токамака. Баланс мощности выглядит как:

$$A 2\pi R 2\pi a = W_{\max} 2\pi a\lambda_q.$$

Таким образом, для токамака с дивертором

$$A = W_{\max} a\lambda_q / 2\pi, \quad (6)$$

а для токамака с полоидальным лимитером:

$$A = W_{\max} R\lambda_q / 2\pi. \quad (7)$$

Полученные зависимости можно использовать для сравнительного анализа данных из различных токамаков.

Эффекты многомасштабности в проблеме взаимодействия плазма – стенка

Экспериментальные измерения, проведенные на многих токамаках показали, что характеристики периферийной плазмы зависят от геометрических размеров, тока плазмы и магнитного поля, содержания примесей, условий на поверхности первой стенки и других эффектов [30]. Попытки построить упрощенные модели периферийной плазмы с целью поиска решения на основе анализа одного из параметров не привели к успеху. Теоретическая модель, удовлетворительно объясняющая все экспериментальные данные о периферийной плазме токамаков, отсутствует. Следует отметить, что процесс взаимодействия плазма – стенка развивается в широком диапазоне пространственно-временных масштабов — от субмикронных до метровых (определяемых, в том числе дебаевским слоем и крупномасштабными МГД-эффектами), от микросекундных и субмикросекундных до часовых (включая временные микромасштабы развития дрейфовых неустойчивостей, дуговых процессов и часовые масштабы роста пленок и эрозионных процессов).

В целом такие процессы развиваются:

- на пространственных масштабах, изменяющихся на 6...8 порядках величины;

• на временных масштабах, изменяющихся на 8...12 порядках величины.

Учитывая взаимовлияние различных механизмов в периферийной плазме (при эрозии — влияние поступления в плазму примесей на уменьшение теплового потока плазмы на стенку) и признаки условий критичности для многих эффектов (большие градиенты в плазме и экстремальные плазменные нагрузки на материал, приводящие к эрозии и изменению поверхностных свойств и др.), это типичный пример сложной системы, в которой важны все масштабы и нет доминирующего влияния какого-либо одного механизма на процесс, если он наблюдается длительное время.

Таким образом, для анализа процессов в стационарном токамаке-реакторе необходимо рассматривать взаимовлияние процессов, развивающихся на различных пространственно-временных масштабах. Для стационарного токамака-реактора следует ожидать, что в доминирующей степени процесс взаимодействия плазма-стенка определяют коллективные эффекты.

Многомасштабность процесса взаимодействия плазма — стенка в токамаке предполагает необходимость применения методов, развитых для анализа сложных многомасштабных систем. Например, теоретические модели описания процессов сильной турбулентности предлагают эффективные подходы анализа многомасштабного процесса. В таких системах отсутствует единственный «главный масштаб», т. е. все масштабы вовлечены в процесс, для их описания необходимо определить из эксперимента характеристики взаимовлияния процессов на различных масштабах. Известный пример — каскадный механизм передачи энергии между вихрями разных размеров в турбулентности, в том числе в турбулентной плазме. Для систем с доминированием коллективных эффектов характерным являются степенные законы, описывающие явление (степенные зависимости характеристик плазмы от масштабов), что отражает свойство многомасштабности, поэтому необходимо получать такие законы из эксперимента и анализировать их [15, 18].

Для обсуждаемой проблемы стационарного токамака-реактора следует выявить такие степенные законы из имеющихся экспериментальных данных. Они позволят продвинуться в обоснованном описании скейлингов удержания в стационарном режиме реактора.

Критерий (5) для токамака (при фиксированных a и R) равен

$$T_{sep} \sim n_{sep}^{-2}, \quad (8)$$

т.е., предполагается степенная взаимозависимость параметров плазмы вблизи сепаратрисы при предельных (экстремальных) параметрах разряда.

Исходя из обобщенных представлений о многомасштабности процесса (предполагающих степенные функциональные зависимости, а не экспоненциальные или другие), обобщим степенной закон (8) взаимозависимости:

$$T_{sep} \sim n_{sep}^{-\alpha}. \quad (9)$$

Для критерия (5) $\alpha = 2$. При зависимости параметра δ_w в (4) от параметров плазмы, что может быть связано с эффектами дугообразования [23], можно ожидать вариации индекса α , $\alpha \approx 2$.

Степенная зависимость (9) может наблюдаться в H-режимах с предельными параметрами разряда, когда значительно меняются рельеф и свойства поверхности, что ведет к изменению переноса тепла через приповерхностный плазменный слой (Sheath-layer).

Зависимость (9) предполагает уменьшение температуры электронов с увеличением плотности, это отражает наблюдаемые в экспериментах эффекты падения электронной температуры с увеличением плотности плазмы или потоков частиц плазмы на сепаратрисе (наблюдения в токамаке DIII-D [31]). В экспериментах на токамаках JET, D-III-D [31] наблюдалась такая зависимость температуры электронов T_e на сепаратрисе от радиального потока частиц на сепаратрисе (он пропорционален плотности плазмы), которая может быть описана зависимостью (9) с $\alpha \approx 2$ [32, рис. 3]. Степенная зависимость (с отрицательным показателем) электронной температуры от плотности плазмы на сепаратрисе наблюдалась также на токамаке T-10 [33].

Следует изучить эффекты, приводящие к неустойчивостям разряда при превышении предела нагрузки на первую стенку в стационарном токамаке-реакторе, исходя из изложенных расширенных критериев. Стоит задача расширения базы экспериментальных данных, полученных в различных токамаках, для обобщающего анализа взаимозависимости параметров плазмы типа (9). Они позволят приступить к выработке подходов к управлению взаимодействию плазма — стенка с целью достижения оптимальных условий поддержания стационарного разряда в токамаке-реакторе. В частности, рассматриваются перспективные предложения использования вольфрамовых пластин с высокопористой стохастической поверхностью в качестве элемента облицовки диверторной пластины в зоне с максимальной плазменно-тепловой нагрузкой в стационарном реакторе-токамаке [34].

Заключение

Выявленная ранее эмпирическая закономерность существования верхнего предела для усредненной тепловой нагрузки P_H/S на первую стенку токамака ставит проблемные вопросы обеспечения устойчивости стационарного разряда в реакторе-токамаке. Все механизмы, ограничивающие предел длительности стационарного разряда в токамаке, в экспериментах не исследованы. Обсуждаются лишь несколько механизмов, в том числе, влияние пленок, сформированных из материалов эрозии на поверхности первой стенки токамака [1].

Рассмотрена тепловая нагрузка на критическую область контакта материальной поверхности с плаз-

менной сепаратрисой (или последней замкнутой магнитной поверхности). Это позволяет выработать дополнительные критерии (6), (7) оценки предельной плазменно-тепловой нагрузки на стенки в стационарном режиме токамака-реактора. Преимущественный вклад в данный эффект обеспечивается пределом потока тепла на диверторные пластины в узкой (миллиметрового масштаба) зоне взаимодействия сепаратрисы с материальной поверхностью. Предельный поток тепла на диверторные пластины зависит от условий на поверхности, в том числе от степени ее шероховатости, пористости и эффектов дугообразования.

Для стационарного токамака-реактора следует ожидать, что в доминирующей степени процесс взаимодействия плазма – стенка определяют коллективные эффекты, развивающиеся на пространственно-вре-

менных масштабах, изменяющихся на 6...12 порядках величины. Многомасштабность процесса взаимодействия плазма – стенка в токамаке предполагает необходимость применения степенных законов для описания эффектов.

Предложен степенной закон взаимозависимости электронной температуры и плотности плазмы вблизи сепаратрисы $T_{sep} \sim n_{sep}^{-\alpha}$, $\alpha \approx 2$, при предельных тепловых нагрузках на материальную стенку. Такую степенную зависимость следует ожидать в H-режимах стационарного токамака-реактора с предельными параметрами разряда, когда происходит значительное изменение рельефа и свойств поверхности диверторных пластин, влияющих на перенос тепла через приповерхностный плазменный слой, в том числе с эффектами дугообразования.

Литература

1. **Mirnov S.V.** P H/S—tokamak's Limit as a Result of the Plasma Sheath Breakdown // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2016. V. 58. P. 022001.
2. **Deng G.Z. e. a.** Study of Plasma Current Effect on Divertor Power Footprint Widths Through Experiments and Modeling In East L-Mode Plasmas // *Phys. Plasmas*. 2017. V. 24. No. 4. P. 042508.
3. **Oha Y.-K. e. a.** Status of the High Performance and Long Pulse Operation in KSTAR and Exploring the Issues in ITER and K-DEMO // *Proc. IX IAEA Techn. Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices*. Vienna, 2017.
4. **Будаев В.П.** Обобщенная масштабная инвариантность и лог-пуассоновская статистика турбулентности краевой плазмы в токамаке T-10 // *Физика плазмы*. 2008. Т. 34. № 10. С. 867—884.
5. **Будаев В.П., Савин С.П., Зеленый Л.М.** Наблюдения перемежаемости и обобщенного самоподобия в турбулентных пограничных слоях лабораторной и магнитосферной плазмы: на пути к определению количественных характеристик переноса // *УФН*. 2011. Т. 181. С. 905—952.
6. **Makowski M.A. e. a.** Scaling of the Tokamak Near the Scrape-off Layer H-mode Power Width and Implications for ITER // *Nuclear Fusion*. 2013. V. 53. No. 9. P. 093031.
7. **Goldston R.J.** Heuristic Drift-based Model of the Power Scrape-off Width in Low-gas-puff H-mode Tokamaks // *Nuclear Fusion*. 2012. V. 52. No. 1. P. 013009.
8. **Loarte A. e a.** Progress on the Application of Elm Control Schemes to ITER Scenarios from the Non-active Phase to DT Operation // *Nuclear Fusion*. 2014. V. 54. No. 3. P. 033007.
9. **Будаев В.П.** Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба (обзор) // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез»*. 2015. Т. 38. № 4. С. 5—33.

References

1. **Mirnov S.V.** P H/S—tokamak's Limit as a Result of the Plasma Sheath Breakdown. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2016;58:022001.
2. **Deng G.Z. e. a.** Study of Plasma Current Effect on Divertor Power Footprint Widths Through Experiments and Modeling In East L-Mode Plasmas. *Phys. Plasmas*. 2017;24;4:042508.
3. **Oha Y.-K. e. a.** Status of the High Performance and Long Pulse Operation in KSTAR and Exploring the Issues in ITER and K-DEMO. *Proc. IX IAEA Techn. Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices*. Vienna, 2017.
4. **Budaev V.P.** Obobshchennaya Masshtabnaya Invariantnost' I Log-puassonovskaya Statistika Turbulentnosti Kraevoy Plazmy v Tokamake T-10. *Fizika Plazmy*. 2008; 34;10:867—884. (in Russian).
5. **Budaev V.P., Savin S.P., Zelenyy L.M.** Nablyudeniya Peremezhhaemosti i Obobshchennogo Samopodobiya v Turbulentnyh Pogranichnyh Sloyah Laboratornoy i Magnitosfernoy Plazmy: na Puti k Opredeleniyu Kolichestvennyh Harakteristik Perenosa. *UFN*. 2011;181:905—952. (in Russian).
6. **Makowski M.A. e. a.** Scaling of the Tokamak Near the Scrape-off Layer H-mode Power Width and Implications for ITER. *Nuclear Fusion*. 2013;53;9:093031.
7. **Goldston R.J.** Heuristic Drift-based Model of the Power Scrape-off Width in Low-gas-puff H-mode Tokamaks. *Nuclear Fusion*. 2012;52.;1:013009.
8. **Loarte A. e a.** Progress on the Application of Elm Control Schemes to ITER Scenarios from the Non-active Phase to DT Operation. *Nuclear Fusion*. 2014;54;3:033007.
9. **Budaev V.P.** Rezultaty Ispytaniy Vol'framovykh Misheney Divertora pri Moshchnykh Plazmenno-teplovyykh Nagruzkah, Ozhidaemykh v ITER i Tokamakah Reaktornogo Masshtaba (Obzor). *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Termoyadernyy Sintez»*. 2015;38;4:5—33. (in Russian).

10. **Будаев В.П., Химченко Л.Н.** Фрактальная нано-микроструктура осаждённых плёнок в термоядерных установках // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». 2008. № 3. С. 34—61.
11. **Brezinsek S.** Plasma-surface Interaction in the Be/W Environment: Conclusions Drawn from the JET-ILW for ITER // J. Nuclear Materials. 2015. V. 463. Pp. 11—21.
12. **Balden M. e. a.** Blistering and Re-deposition on Tungsten Exposed to ASDEX Upgrade Divertor Plasma // J. Nuclear Materials. 2013. V. 438. Pp. 220—223.
13. **Labombard B. e. a.** Divertor Heat Flux Footprints in EDA H-mode Discharges on Alcator C-mod // J. Nuclear Materials. 2011. V. 415. Pp. 349—352.
14. **Budaev V.P. e. a.** Tungsten Recrystallization and Cracking under ITER-Relevant Heat Loads // J. Nuclear Materials. 2015. V. 463. Pp. 237—240.
15. **Будаев В.П., Химченко Л.Н.** О фрактальной структуре осаждённых плёнок в токамаке // ЖЭТФ. 2007. Т. 131. Вып. 4. С. 711—728.
16. **Budaev V.P., Khimchenko L.N.** Fractal Growth of Deposited Films in Tokamaks // Physica A. 2007. V. 382. No. 2. Pp. 359—377.
17. **Budaev V.P.** Stochastic Clustering of the Surface at the Interaction of a Plasma with Materials // JETP Letters. 2017. V. 105. No. 5. Pp. 307—313.
18. **Budaev V.P.** Stochastic Clustering of Material Surface under High-heat Plasma Load // Phys. Letters A. 2017. V. 381. No. 43. Pp. 3706—3713.
19. **Мартыненко Ю.В., Будаев В.П., Грашин С.А., Шестаков Е.А.** Эрозия вольфрама в токамаке при срыве тока // Краткие сообщения по физике. 2017. Т. 44. № 6. С. 45—52.
20. **Likonen J. e. a.** Structural Studies of Deposited Layers on Jet MKII-SRP Inner Divertor Tiles // J. Nuclear Materials. 2007. V. 363—365. Pp. 190—195.
21. **Мартыненко Ю.В.** Движение расплавленного слоя металла и капельная эрозия при воздействии плазменных потоков, характерных для переходных режимов ИТЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». 2014. Т. 37. № 2. С. 53—59.
22. **Barabasi A.L., Stanley H.E.** Fractal Concepts in Surface Growth. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995.
23. **Barengolts S., Mesyats G., Tsvetoukh M.** The Ecton Mechanism of Unipolar Arcing in Magnetic Confinement Fusion Devices // Nucl. Fusion. 2010. V. 50. No. 12. P. 125004.
24. **Matějček J. e. a.** ELM-induced Arcing on Tungsten Fuzz in the COMPASS Divertor Region // J. Nuclear Materials. 2017. V. 492. Pp. 204—212.
25. **Budaev V.P.** Innovative Potential of Plasma Technology // J. Physics. Conf. Series. 2017. V. 891. No. 1. P. 012301.
26. **Khimchenko L. e. a.** // Proc. 27th IEEE Symp. Fusion Eng. Shanghai, 2017. P. 153.
27. **Takamura S.** Initial Stage of Fiber-form Nanostructure Growth on Refractory Metal Surfaces with Helium Plasma Irradiation // Plasma and Fusion Research. 2014. V. 9. P. 1302007.
10. **Budaev V.P., Himchenko L.N.** Fraktal'naya Nano-i Mikrostruktura Osazhdennyh Plenok v Termoyadernyh Ustanovkah. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Termoyadernyy Sintez». 2008;3:34—61. (in Russian).
11. **Brezinsek S.** Plasma-surface Interaction in the Be/W Environment: Conclusions Drawn from the JET-ILW for ITER. J. Nuclear Materials. 2015;463:11—21.
12. **Balden M. e. a.** Blistering and Re-deposition on Tungsten Exposed to ASDEX Upgrade Divertor Plasma. J. Nuclear Materials. 2013;438:220—223.
13. **Labombard B. e. a.** Divertor Heat Flux Footprints in EDA H-mode Discharges on Alcator C-mod. J. Nuclear Materials. 2011;415:349—352.
14. **Budaev V.P. e. a.** Tungsten Recrystallization and Cracking under ITER-Relevant Heat Loads. J. Nuclear Materials. 2015;463:237—240. (in Russian).
15. **Budaev V.P., Himchenko L.N.** O Fraktal'noy Strukture Osazhdennyh Plenok v Tokamake. ZHETF. 2007;131;4:711—728. (in Russian).
16. **Budaev V.P., Khimchenko L.N.** Fractal Growth of Deposited Films in Tokamaks. Physica A. 2007;382;2:359—377.
17. **Budaev V.P.** Stochastic Clustering of the Surface at the Interaction of a Plasma with Materials. JETP Letters. 2017;105;5:307—313.
18. **Budaev V.P.** Stochastic Clustering of Material Surface under High-heat Plasma Load. Phys. Letters A. 2017;381;43:3706—3713.
19. **Martynenko Yu.V., Budaev V.P., Grashin S.A., Shestakov E.A.** Eroziya Vol'frama v Tokamake pri Sryve Toka. Kratkie Soobshcheniya po Fizike. 2017;44;6:45—52. (in Russian).
20. **Likonen J. e. a.** Structural Studies of Deposited Layers on Jet MKII-SRP Inner Divertor Tiles. J. Nuclear Materials. 2007;363—365:190—195.
21. **Martynenko Yu.V.** Dvizhenie Rasplavlennogo Sloya Metalla i Kapel'naya Eroziya pri Vozdeystvii Plazmennyyh Potokov, Harakternyyh dlya Perekhodnyh Rezhimov ITER. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Termoyadernyy Sintez». 2014;37;2:53—59. (in Russian).
22. **Barabasi A.L., Stanley H.E.** Fractal Concepts in Surface Growth. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995.
23. **Barengolts S., Mesyats G., Tsvetoukh M.** The Ecton Mechanism of Unipolar Arcing in Magnetic Confinement Fusion Devices. Nucl. Fusion. 2010;50;12:125004.
24. **Matějček J. e. a.** ELM-induced Arcing on Tungsten Fuzz in the COMPASS Divertor Region. J. Nuclear Materials. 2017;492:204—212.
25. **Budaev V.P.** Innovative Potential of Plasma Technology. J. Physics. Conf. Series. 2017; 891;1: 012301.
26. **Khimchenko L. e. a.** Proc. 27th IEEE Symp. Fusion Eng. Shanghai, 2017:153.
27. **Takamura S.** Initial Stage of Fiber-form Nanostructure Growth on Refractory Metal Surfaces with Helium Plasma Irradiation. Plasma and Fusion Research. 2014;9:1302007.

28. **Takamura S.** Power Transmission Factor Through the Sheath in Deuterium Plasmas for Virgin as Well as Nanostructured Tungsten // *J. Nuclear Materials*. 2015. V. 463. Pp. 325—328.

29. **Будаев В.П. и др.** Плазменная установка НИУ «МЭИ» для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез»*. 2017. Т. 40. Вып. 3. С. 23—36.

30. **Stangeby P.C.** *The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices*. Bristol: Institute of Physics, 2000.

31. **Porter G.D.** The Role of Radial Particle Flow on Power Balance in DIII-D // *Phys. Plasmas*. 1998. V. 5. No. 12. Pp. 4311—4320.

32. **Porter G.D. e. a.** Analysis of Separatrix Plasma Parameters Using Local And Multi-machine Databases // *J. Nuclear Materials*. 1999. V. 266—269. Pp. 917—921.

33. **Budaev V.P. e. a.** Power Laws in a Problem of Plasma-surface Interaction // *Proc. 33rd EPS Conf. Plasma Phys. Rome, 2006*. V. 30I. P. 4.108.

34. **Будаев В.П.** Применение новых материалов со стохастической нано- и микроструктурой поверхности: управление турбулентными потоками в плазме и аэродинамике // *Взаимодействие плазмы с поверхностью: Сб. науч. трудов. XXI конф. М.: НИЯУ «МИФИ», 2018*. С. 126—129.

28. **Takamura S.** Power Transmission Factor Through the Sheath in Deuterium Plasmas for Virgin as Well as Nanostructured Tungsten. *J. Nuclear Materials*. 2015;463:325—328.

29. **Budaev V.P. i dr.** Plazmennaya Ustanovka NIU «MEI» dlya Ispytaniy Tugoplavkikh Metallov i Sozdaniya Vysokoporistykh Materialov Novogo Pokoleniya. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Termoyadernyy Sintez»*. 2017;40;3:23—36. (in Russian).

30. **Stangeby P.C.** *The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices*. Bristol: Institute of Physics, 2000.

31. **Porter G.D.** The Role of Radial Particle Flow on Power Balance in DIII-D. *Phys. Plasmas*. 1998;5;12:4311—4320.

32. **Porter G.D. e. a.** Analysis of Separatrix Plasma Parameters Using Local And Multi-machine Databases. *J. Nuclear Materials*. 1999;266—269:917—921.

33. **Budaev V.P. e. a.** Power Laws in a Problem of Plasma-surface Interaction. *Proc. 33rd EPS Conf. Plasma Phys. Rome, 2006*;30I:4.108.

34. **Budaev V.P.** Primenenie Novykh Materialov so Stokhasticheskoy Nano- i Mikrostrukuroy Poverhnosti: Upravlenie Turbulentnymi Potokami v Plazme i Aerodinamike. *Vzaimodeystvie Plazmy s Poverhnost'yu: Sb. Nauch. Trudov. XXI Konf. М.: NIYAU «MIFI», 2018*: 126—129. (in Russian).

Сведения об авторе:

Будаев Вячеслав Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: budaev@mail.ru

Information about author:

Budaev Vyacheslav P. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: budaev@mail.ru

Работа выполнена при поддержке: Российского научного фонда (грант № 17-19-01469)

The work is executed at support: Russian Science Foundation (grants No. 17-19-01469)

Статья поступила в редакцию: 14.09.2018

The article received to the editor: 14.09.2018