

УДК 533.924

ОБЗОР РАБОТ В ИЯФ СО РАН ПО ТЕМАТИКЕ ПЛАЗМА—ПОВЕРХНОСТЬ

*А.А. Шошин^{1,2,3}, А.В. Бурдаков^{1,3}, И.В. Кандауров¹, А.А. Касатов^{1,2}, С.Р. Казанцев^{1,4,5}, И.И. Балаш^{1,4},
В.А. Попов^{1,2}, Г.А. Рыжков^{1,2}, Д.Е. Черепанов^{1,2}, Е.И. Кузьмин¹, С.В. Полосаткин^{1,2,3}, И.А. Иванов^{1,2},
А.С. Аракчеев¹, А.А. Васильев¹*

¹Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов», Новосибирск, Россия

С 1990-х гг. в ИЯФ СО РАН проводятся комплексные исследования взаимодействия мощных потоков плазмы, электронных пучков и лазеров с твёрдыми телами при нагрузках, которые ожидаются на первой стенке термоядерного реактора. Сначала эксперименты проводились на установке ГОЛ-3, затем на комплексе БЕТА. В настоящее время создаются новые экспериментальные установки, включая станцию «Плазма» на строящемся источнике синхротронного излучения СКИФ, а также проектируется реактор ГДМЛ на основе открытой ловушки нового поколения. С помощью развитого диагностического комплекса многопробочной ловушки ГОЛ-3 были исследованы свойства приповерхностной плазмы и её динамика (плотность, температура, скорость разлёта, зарядовый состав). Изучена модификация поверхности различных материалов (вольфрам, графит, керамики) при различных импульсных тепловых нагрузках. Использование электронного пучка на стенде БЕТА позволило *in situ* наблюдать процессы модификации поверхности во время теплового удара, что недоступно для установок с плазменным воздействием. Проведено сравнение с данными других исследователей, показано их соответствие. Получены пороги для трещинообразования и плавления вольфрама, взрывного (хрупкого) разрушения графита. Для исследований напряжений в материалах применено синхротронное излучение, с помощью которого с высоким временным разрешением измерено напряжение во время импульсного облучения. Экспериментальные работы дополняются теоретическими и расчётными исследованиями. Предложена модель разрушения вольфрама, согласно которой на стадии остывания возникает напряжение, приводящее к растрескиванию вольфрама. Появление трещин на стенде БЕТА впервые в мире наблюдали экспериментально существенно позже тепловой нагрузки.

Ключевые слова: первая стенка, термоядерный реактор, вольфрам, графит, керамика, импульсный нагрев, синхротронное излучение, мощные потоки энергии, тепловые удары.

REVIEW OF WORKS IN THE BUDKER INSTITUTE ON PLASMA-SURFACE INTERACTION

*A.A. Shoshin^{1,2,3}, A.V. Burdakov^{1,3}, I.V. Kandaurov¹, A.A. Kasatov^{1,2}, S.R. Kazantsev^{1,4,5}, I.I. Balash^{1,4},
V.A. Popov^{1,2}, G.A. Ryzhkov¹, D.E. Cherepanov^{1,2}, E.I. Kuzmin¹, S.V. Polosatkin^{1,2,3}, I.A. Ivanov^{1,2}, A.S. Arakcheev¹, A.A. Vasilyev¹*

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

⁴Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

⁵SKIF Synchrotron Radiation Facility, Novosibirsk, Russia

Since the 1990s, comprehensive studies of the interaction of powerful plasma flows, electron beams, and lasers with solid bodies have been conducted in BINP under the loads expected at the first wall of a fusion reactor. The experiments were first performed on the GOL-3 facility, then on the BETA bench. At the moment, new experimental facilities are being set up, including the Plasma Station at the under-construction SKIF synchrotron radiation source, and a new-generation open-trap GDMT reactor is being designed. The properties of near-surface plasma and its dynamics (density, temperature, velocity, charge composition) were investigated using the developed diagnostic complex of the GOL-3 multimirror trap. Surface modification of various materials (tungsten, graphite, ceramics) under different pulse thermal loads was studied. The use of electron beam on the BETA bench allowed *in situ* observation of surface modification processes during thermal shock, which is unavailable for plasma impact facilities. Comparison with the data of other researchers has been made and their consistency with each other has been shown. Thresholds for cracking and melting of tungsten, explosive (brittle) fracture of graphite were obtained. Synchrotron radiation was used to study stresses in materials, with which stresses during pulse irradiation are measured with high temporal resolution. Experimental work is supplemented by theoretical and computational studies. A model of tungsten fracture was proposed, according to which stresses leading to tungsten cracking occur at the cooling stage. Then, for the first time in the world, the appearance of cracks significantly later than the thermal load was observed experimentally on the BETA bench.

Key words: first wall, fusion reactor, tungsten, graphite, ceramics, pulse heating, synchrotron radiation, powerful energy flows, thermal shocks.

DOI: 10.21517/0202-3822-2023-47-1-65-75

ВВЕДЕНИЕ

В 1954 г. Г.И. Будкер предложил одну из первых в мире идей как удерживать заряженные частицы в магнитном поле — пробкотрон [1], а уже в 1958 г. был создан Институт ядерной физики СО РАН, который Будкер возглавил. С момента основания одной из задач института стало создание термоядерных реакторов, в первую очередь различных открытых ловушек, основой для которых стал пробкотрон Будкера—Поста.

Одной из важнейших задач для разработки термоядерных установок являются вопросы взаимодействия плазмы с первой стенкой. В ИЯФ СО РАН имени Г.И. Будкера с 1990-х гг. [2—4] проводятся исследования стойкости материалов первой стенки термоядерного реактора к мощным импульсным тепловым нагрузкам.

Изначально интенсивные исследования взаимодействия плазмы с поверхностью проводились на установке ГОЛ-3 [5], на которой плотность энергии на мишени в плазменном потоке с энергетичными электронами могла достигать рекордных 30 МДж/м². Исследовалась модификация поверхности вольфрама и углеродных материалов при различных нагрузках, характерных для ЭЛМов и срывов ИТЭР, а также параметры формирующейся поверхностной плазмы, такие как скорость расширения, плотность, температура, скорость химической эрозии [5].

В дальнейшем (после 2015 г.) исследования проводились на установке БЕТА с помощью электронного пучка большой мощности и лазерного излучения. Исследования проводились с различными марками вольфрама [6], затем добавились эксперименты с керамическими материалами.

На станции «Плазма» источника синхротронного излучения ВЭПП-4 и на станциях ВЭПП-3 [7] проводились исследования поведения материалов под импульсными тепловыми нагрузками, в настоящее время идёт создание аналогичной станции на строящемся в Новосибирске источнике синхротронного излучения СКИФ. В экспериментах измерялись напряжения в вольфраме во время и после облучения [8]. ИЯФ СО РАН является мировым лидером в области создания источников синхротронного излучения, в обзорной статье [7] читатель может ознакомиться с возможностями Новосибирского научного центра в области синхротронного излучения.

Также вопросы взаимодействия плазмы с поверхностью активно изучались теоретическими и расчётными методами.

В настоящее время в ИЯФ СО РАН проводятся исследования на нескольких плазменных установках: газодинамическая ловушка ГДЛ [9], многопробочная ловушка ГОЛ-НВ [10], ловушка с винтовым полем СМОЛА [11], компактный осесимметричный тороид КОТ [12], установки для исследования взаимодействия мощных электронных пучков с плазмой ГОЛ-ПЭТ [13] и ЭЛМИ [14], комплекс материаловедения БЕТА [6]. Проектируется открытая ловушка следующего поколения ГДМЛ (газодинамическая многопробочная ловушка) [15, 16], подготовлен эскизный проект установки. В ГДМЛ потоки плазмы на лимитеры и плазмоприёмники ожидаются весьма высокими, поэтому вопросы взаимодействия плазмы с поверхностью для неё также являются актуальными. Успешность и широта исследований в области плазма—поверхность в ИЯФ СО РАН тесно связаны с большим количеством действующих в институте уникальных электрофизических установок, многие из которых не имеют аналогов в мире, что позволяет подключать к работе специалистов высокой квалификации из самых разных областей.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ГОЛ-3

Многопробочная ловушка ГОЛ-3 общей длиной 15 м создавалась для нагрева и удержания плотной (10^{13} — 10^{15} см⁻³) водородной плазмы в многопробочном сильном магнитном поле (~5 Тл). Для нагрева плазмы использовался мощный релятивистский электронный пучок, создаваемый ускорителем У-2. Основные исследования на ГОЛ-3 были посвящены пучково-плазменному взаимодействию [17, 18], нагреву и удержанию горячей (0,1—5 кэВ) плазмы в многопробочном режиме [19—22], взаимодействию плазмы с поверхностью [23—34]. На установке был развитый диагностический комплекс для исследования свойств плазмы [35, 36], включающий оптические диагностики (в том числе в инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах), болометрические, диамагнитные, зондовые диагностики, интерферометрию, томсоновское рассеяние, анализаторы нейтральных атомов, анализаторы спектра электронов, пояса Рогов-

ского, инжекторы пеллет [23] и другие. Многие из этих диагностик применялись при проведении экспериментов по изучению взаимодействия плазмы с поверхностью [23—25].

Поток плазмы в выходном узле установки содержал электроны с широким спектром (от высокоэнергичных 1 МэВ до 1 эВ) и ионы водорода и/или дейтерия с энергией от 2 кэВ до 1 эВ. Энергетический спектр частиц в плазменном потоке формировался вследствие нескольких взаимосвязанных процессов взаимодействия электронного пучка с большим током и плотной (по сравнению с токамаками) плазмы [17, 18]. Высокая температура ионов является следствием экспериментально открытого на ГОЛ-3 быстрого неклассического нагрева ионов в многопробочном магнитном поле [19—21]. Плотность потока энергии на материалы в разных режимах могла варьироваться от 0,1 МДж/м² до рекордных 30 МДж/м² (в магнитном поле ~5 Тл). В отличие от плазменных пушек и ускорителей типа КСПУ практически весь поток энергии мог достигать поверхности твёрдых тел, так как быстрые электроны способны преодолеть возникающий у поверхности под воздействием плазмы паровой экран. На ГОЛ-3 можно было моделировать условия как ЭЛМов, так и срывов в ИТЭР. Энерговыделение по глубине мишеней на ГОЛ-3 лучше любых других установок в мире моделирует условия для убегающих электронов в ИТЭР, имеющих, согласно спецификации тепловых нагрузок в ИТЭР [37], энергию порядка 10 МэВ и энерговыделение до 25 МДж/м² в течение 10 мс при угле падения 1—1,5° (рис. 1).

При разлёте испаренного вещества с поверхности мишени возникает реактивная сила, направленная внутрь мишени, что создаёт внутри твёрдого вещества волну высокого давления. На ГОЛ-3 были проведены эксперименты по измерению импульсных высоких давлений в мишени по сдвигу линий флуоресценции рубина, которые показали, что давление достигает 1,1 кБар при длительности импульса 8 мкс [25].

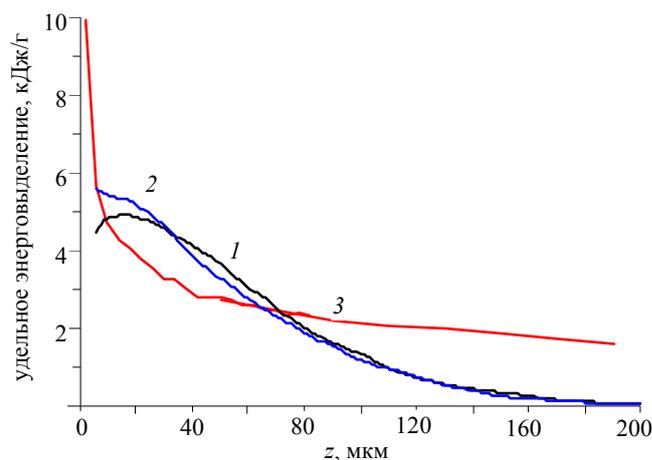


Рис. 1. Энерговыделение на единицу массы по глубине вольфрама в магнитном поле 5 Тл на ГОЛ-3 (1, плотность энергии 15 МДж/м²): 2 — мишень под 45° к потоку плазмы; 3 — от убегающих 10 МэВ-ных электронов в ИТЭР с углом падения 1° (30 МДж/м²)

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЫ

На установке ГОЛ-3 проводились эксперименты по изучению свойств плазмы, возникающей при воздействии мощного плазменного потока на поверхность твёрдого тела. Эксперименты проводились в двух вариантах: плазменный поток налетал на закреплённую мишень, вблизи этого места располагались специализированные диагностики [24]; поперёк длинного шнура плазмы инжектировалась крупинка из углерода [23]. Размеры крупинки выбирались таким образом, чтобы масса испаряемого в процессе облучения вещества была существенно меньше массы крупинки. В этом случае процессы взаимодействия такой крупинки и массивной мишени с плазмой близки. Конфигурация установки позволяла проводить исследования распространения поверхностной плазмы на расстояния до 12 м и таким образом изучать диффузию примесей внутрь плазменного шнура и её влияние на энергобаланс плазмы.

В ходе экспериментов были изучены параметры мишенной плазмы на разных расстояниях от точки инъекции пеллет. Было показано [23], что скорость расширения плазмы на расстоянии 0,8—4,5 м составляет $(1—2)10^6$ см/с (тепловая скорость для углерода с температурой 10—50 эВ), плазма с $n_c \sim (2—10)10^{20}$ м⁻³ распространяется на расстояние ~5 м в гофрированном поле с небольшой потерей частиц, спектр излучения мишенной плазмы весьма похож на спектр диверторной плазмы крупных токамаков.

По спектрам молекулярных радикалов проведены измерения скорости химической эрозии графитовых мишеней при плазменном воздействии с нагрузкой 2 МДж/м². В исследуемом режиме химическая эрозия даёт около 1% от полного числа атомов, поступивших в плазму, при этом полная глубина эрозии (1 мкм за выстрел) определяется макроскопическим разрушением поверхностного слоя с образованием пыли [32].

КОМПЛЕКС БЕТА

Комплекс БЕТА состоит из источников мощной тепловой нагрузки и обширного диагностического комплекса, который позволяет производить измерения эрозии поверхности в течение импульсного воздействия и сразу после него [6, 38—45, 47, 48].

Мощная тепловая нагрузка может производиться импульсным электронным пучком, импульсным неодимовым лазером или же иттербиевым волоконным лазером, работающим в непрерывном или частотно-импульсном режиме. Использование лазерного нагрева позволило изучать керамические материалы, в частности, карбиды бора и кремния [47, 48].

Мощность импульсного электронного пучка может варьироваться в диапазоне 1—10 МВт, длительность 150 мкс—1 мс, энергия электронов может быть установлена в пределах 85—105 кэВ. Неодимовый лазер, выполненный на основе лазера ГОС-1001, способен производить импульсы длительностью 600—800 мкс, энергией до 200 Дж, длина волны излучения 1,06 мкм. Временная динамика мощности источников показана на рис. 2. Мощность иттербиевого волоконного лазера составляет 4 кВт, максимальная частота модуляции может достигать 5 кГц.

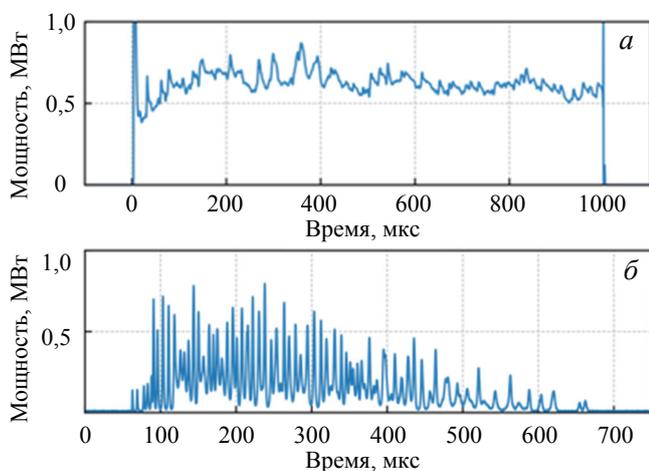


Рис. 2. Мощность электронного пучка на стенде БЕТА (а) и неодимового лазера (б), выполненного на основе лазера ГОС-1001, в зависимости от времени

на установке есть две реализации данных диагностик — в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Матрицы на основе кремния обладают лучшим разрешением, но не способны регистрировать температуру поверхности ниже 1100 К, в то время как детекторы на основе InGaAs позволяют расширить диапазон измерений вплоть до 700 К [6];

— системы малоуглового рассеяния непрерывного неодимового лазера, работающей на длине волны 532 нм, для определения размера микрочастиц и их количества. Использование узкополосных интерференционных фильтров ($\Delta\lambda \sim 1$ нм) позволяет регистрировать частицы даже при мощном фоновом излучении мишени [43, 44];

— спектрометрии абляционного факела с пространственным разрешением в видимом диапазоне, а также диагностики интенсивности свечения с высоким временным разрешением в нескольких пространственных каналах [43, 44].

СТОЙКОСТЬ ВОЛЬФРАМА К ТЕПЛОВЫМ УДАРАМ

Под импульсным тепловым воздействием поверхность вольфрама разогревается, плавится и испаряется. Вблизи поверхности может сформироваться расширяющийся плотный паровой экран, с поверхности могут вылетать капли. При остывании мишени расплав застывает, верхний слой рекристаллизуется, возникают напряжения, которые могут привести к формированию трещин, в том числе через значительное время после импульсного нагрева. Все эти процессы теоретически и экспериментально изучались на различных установках (ГОЛ-3, БЕТА, станция «Плазма»). В ходе многочисленных

Эксперименты с электронным пучком проводятся в вакуумной камере с двумя рядами диагностических портов со стеклянными окнами. Диагностический комплекс состоит из:

— системы быстрой трёхкадровой фотографии для наблюдения треков микрочастиц и мест их появления [44]. Данная диагностика позволяет также вычислять компоненты скорости микрочастиц;

— системы лазерного рассеяния от поверхности для определения изгиба образца и изменения шероховатости его поверхности. Диагностика способна определять моменты появления трещин на поверхности и их эволюцию в ходе теплового воздействия [6, 45];

— системы пирометрии с высоким пространственным и временным разрешением. На уста-

экспериментов, в том числе в сотрудничестве с зарубежными коллегами [26, 27, 30—32], была определена зависимость модификации поверхности вольфрама от плотности тепловой нагрузки на поверхность [5, 6, 26, 27, 29—34, 40—42]:

— малая плотность потока энергии (менее пяти выстрелов по 0,5 МДж/м² в каждом выстреле): переплавление поверхности не происходит, меняется шероховатость;

— при увеличении нагрузки: переплавление поверхности, возникают кратеры диаметром 50—300 мкм и сеть трещин 0,3 мкм в виде гранул;

— средняя плотность потока энергии (пять выстрелов по 2,1 МДж/м²): переплавление слоя, возникают сети трещин с характерными размерами 1000, 10, 0,3 мкм, образуются кратеры диаметром 50—300 мкм и глубиной 20 мкм [26, 27, 29—32];

— значительная плотность потока энергии (девять выстрелов по 4 МДж/м²): вместо сети трещин 1000 мкм образуется волнообразная поверхность застывшего расплава, сеть ячеек 10 мкм остаётся, сеть ячеек 0,3 мкм исчезает [29];

— большая плотность потока (12 МДж/м²): эрозия свыше 150 мкм за выстрел, формируется глубокий кратер с высокими краями от движения расплава [2].

Экспериментально и теоретически было установлено, что на поверхности вольфрама после импульсных тепловых воздействий, соответствующих ЭЛМам в ИТЭР, начинается формирование вертикальных трещин глубиной до 350 мкм [5, 34, 42]. Следом за вертикальными трещинами могут формироваться горизонтальные трещины, которые ведут к потере теплоотвода и перегреву поверхности при последующих тепловых импульсах [5, 42].

Были проведены сравнительные эксперименты, в которых одинаковые мишени были облучены плазменными потоками с близкими удельными потоками энергии на образцы на различных установках, в которых было показано, что, несмотря на различие в энергии и типе падающих частиц, модификация поверхности и пороги трещинообразования одинаковы на разных установках [5, 33]: ГОЛ-3 и КСПУ X-50 [26, 27]; JUDITH-1, Nd:YAG-лазер и ГОЛ-3 [30].

На стенде БЕТА регистрировались вылетающие с нагретой поверхности вольфрама капли, которые имели скорость сотни метров в секунду [5], намного превышающую скорость капель, регистрируемую на плазменных пушках и ускорителях типа КСПУ.

СТОЙКОСТЬ ГРАФИТА И КЕРАМИКИ К ТЕПЛОВЫМ УДАРАМ

На установке ГОЛ-3 более 20 лет проводились исследования эрозии углеродных материалов, в первую очередь, графита под воздействием импульсных нагрузок [2—5, 24, 28]. Было обнаружено, что при больших нагрузках происходит взрывное (хрупкое) разрушение графита, и в 1990-х гг. был экспериментально определён его порог 8—10 кДж/г [2—5]. Эрозия за выстрел может достигать 0,5—1 мм при 20—60 МДж/м² [2, 3], что соответствовало оценкам потоков энергии при срывах в ИТЭР [46].

При нагрузках 0,5—2,5 МДж/м², соответствующих ЭЛМам в ИТЭР, эрозия углеродных материалов невелика (менее 1 мкм) и в некоторых случаях определяется отколом отдельных гранул [5, 28]. Поверхность углеродных материалов модифицируется, происходит её графитизация [5, 28].

Недавно на стенде БЕТА начались испытания керамических материалов и покрытий. Были испытаны образцы горячепрессованной керамики карбида бора, для которой определена критическая температура для начала разрушения 1200—1400 К [47]. Свойства керамик из карбида бора, произведённых российскими предприятиями различными методами [49—52], изучались для использования в качестве внутривакуумной нейтронной защиты в диагностических портах ИТЭР, которые ИЯФ СО РАН разрабатывает и изготавливает [53]. Также были проведены эксперименты по изучению стойкости тонкого слоя карбида бора, нанесённого на вольфрам различными методами [48].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И РАСЧЁТНЫЕ РАБОТЫ

В ИЯФ СО РАН была создана теоретическая модель образования трещин в вольфраме при импульсной поверхностной тепловой нагрузке [54—56]. Модель базируется на нескольких ключевых

особенностях материала и режима нагрева: во-первых, вольфрам при низких температурах хрупкий, а при высоких — вязкий; во-вторых, глубина прогрева мала по сравнению с полной толщиной образца и размером нагреваемой области. При достаточно высоких температурах вязкий вольфрам необратимо деформируется под действием стягивающих сил непрогретой подложки. При остывании хрупкий вольфрам испытывает растягивающие напряжения недеформированной подложки и трескается.

При разогреве до температуры выше температуры плавления может образоваться сложный рельеф, и была сделана теоретическая оценка капиллярных волн в застывающем вольфраме. В работе [57] показано, что мелкомасштабные колебания должны быстро затухать без подпитки на этапе застывания.

Построены физическая, математическая и численная модели для расчёта импульсного поверхностного и приповерхностного нагрева в одномерном и двумерном приближении с учётом охлаждения поверхности испарением и излучением [58—60]. Было показано, что испарение играет важную роль в динамике температуры [61].

Для нагрева выше порога плавления проводились исследования течения газа после испарения в вакуум. При разработке модели термодинамики испарившегося газа было показано, что над поверхностью во время облучения образуется плотная плазма, создающая собственную картину токов, превосходящих плотностью ток пучка, с помощью которого грели расплав, откуда следует, что проводящая жидкость может двигаться и без электрического контакта с плазмой [62].

В последнее время внимание теоретического исследования переключилось с нагрева вольфрама до температур больше плавления на нагрев хрупких материалов. Удалось успешно описать пределы стойкости к импульсной тепловой нагрузке до разрушения для чистых хрупких веществ, описанию чего посвящена часть статьи [47].

ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На источниках синхротронного излучения (СИ) ВЭПП-3 и ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН [7] проведены эксперименты по измерению напряжений в вольфраме [8, 63—68]. Эксперименты проводились как после теплового воздействия на образцы (*ex situ*), так и непосредственно во время облучения (*in situ*). На станции «Плазма» источника СИ ВЭПП-4 было исследовано изменение формы дифракционного пика на монокристаллическом вольфраме во время облучения образца лазером [8, 65]. Были продемонстрированы рекристаллизация после облучения электронным пучком и появление текстуры после облучения плазмой на вольфрамовых образцах [63]. Были измерены остаточные напряжения на облучённом электронным пучком

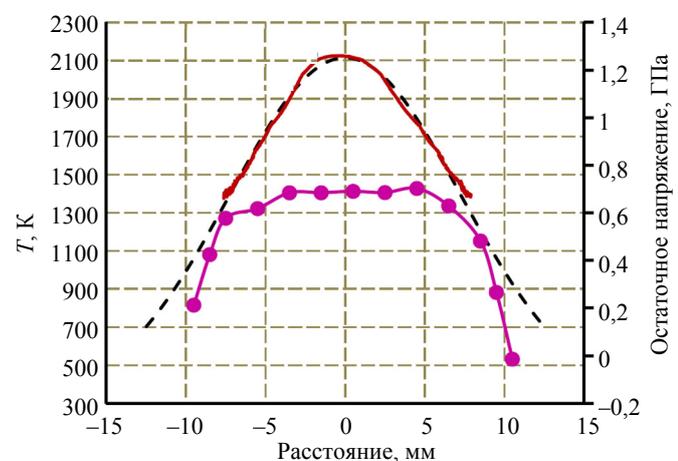


Рис. 3. Пространственное распределение T и остаточных напряжений на облучённом вольфрамовом образце: — — — — приближительная T ; — — — — средняя T ; ● — максимальная T [67]

на облучённом электронным пучком вольфраме вдоль и поперёк направления прокатки [64]. На поликристаллических вольфрамовых образцах, облучённых электронным пучком на установке БЕТА, было измерено пространственное распределение остаточных напряжений по поверхности, а также динамика остаточных напряжений при нагреве образца [67]. Данные по пространственному распределению сравнивались с данными о распределении температуры T на поверхности во время облучения на установке БЕТА (рис. 3). Нагрев облучённого образца до 500 °С привёл к уменьшению остаточных напряжений на ~75 МПа.

Было исследовано влияние трещин на поверхности вольфрамового образца на пространственное распределение остаточных напряжений [68]. По сравнению с результатами на образце без трещин наблюдается проседание напряжений в центральной области поверхности до уровня около 200 МПа (рис. 4).

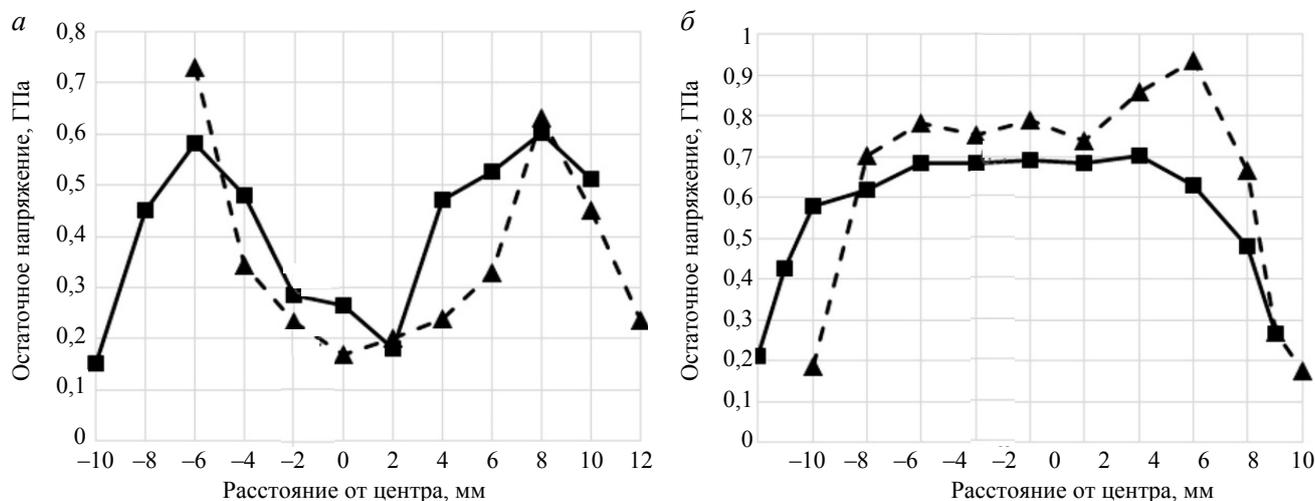


Рис. 4. Пространственные распределения остаточных напряжений вдоль (■, —) и поперёк (▲, - - -) направления прокатки на облучённых вольфрамовых образцах с образованием трещин (а) и без трещин (б) [68]

Разрабатывается станция «Плазма» для строящегося источника СИ СКИФ. Станция представляет собой дифрактометр с возможностью проведения широкого спектра работ. Станция даёт возможность проводить эксперименты как на белом, так и на монохроматическом пучке СИ. Прецизионная механика станции имеет достаточно степеней свободы для проведения измерений с пространственным разрешением, в режимах на просвет и на отражение, в различных режимах сканирования. Подразумевается использование трёх различных детекторов для выполнения специфических задач.

ПЛАНЫ РАБОТ

Продолжаются работы на комплексе БЕТА по изучению процессов при импульсном тепловом нагреве образцов из вольфрама, различных типов керамики, а также вольфрама и других металлов с керамическим покрытием.

Для комплекса БЕТА планируется создание новой вакуумной камеры для лазерного стенда. Новая камера будет обладать большим количеством портов, что позволит увеличить число одновременно работающих диагностик, а также улучшить вакуумные условия.

Кроме существующего оборудования для создания тепловых нагрузок, проводятся испытания нового источника электронов с катодом из LaB_6 , имеющего частоту 10—20 Гц, что позволит провести эксперименты с воздействием до 10^7 импульсов на мишень для моделирования многократного воздействия ЭЛМов на первую стенку. С использованием электронных пучков эксперименты с таким большим числом импульсов на мишень в мире ещё не проводились.

Для испытания образцов планируется использовать также геликонный источник плазмы, который уже разработан и в настоящее время испытывается [69]. Создаваемый поток водородной плазмы позволит провести комплексные эксперименты по модификации поверхностей материалов ионами и насыщению мишеней водородом. С помощью геликонного источника планируется достижение высокого суммарного потока частиц на мишень до 10^{26} м^{-2} в импульсном режиме в серии выстрелов.

На источниках СИ ВЭПП-3 и ВЭПП-4 продолжаются работы по изучению деформаций в вольфраме, разработан проект и закупается оборудование для станции «Плазма» на СКИФ. Новое оборудование и схемы экспериментов позволят проводить эксперименты не только с монокристаллами вольфрама, но и с поликристаллами и другими материалами.

Продолжаются теоретические и расчётные исследования нагрева твёрдых тел, возникающего парового экрана, выброса капель, механизмов и условий для разрушения материалов.

Для ловушки следующего поколения ГДМЛ [15] идёт обсуждение конструкции и материалов для лимитеров и плазмодриёмников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН более 30 лет ведутся теоретические и экспериментальные работы по исследованию взаимодействия плазмы с материалами термоядерных реакторов.

Исследована стойкость различных материалов к импульсным тепловым потокам, соответствующим срывам и ЭЛМам в ИТЭР (ГОЛ-3, БЕТА, лазеры, станция СИ «Плазма» и т.д.). Как на ГОЛ-3, так и на электронном пучке стенда БЕТА при импульсном воздействии на материал паровое экранирование не защищает основной материал от налетающего потока энергии, так как энергичные электроны имеют большой пробег.

Ведутся эксперименты *in situ* и *ex situ* по исследованию динамики упругих напряжений в вольфраме при импульсном нагреве с помощью синхротронного излучения на источниках СИ ВЭПП-3 и ВЭПП-4, а также создаётся станция «Плазма» для строящегося источника СКИФ.

Ведутся теоретические и численные исследования динамики нагрева вещества, образования трещин, формирования парового экрана и т.д.

Коллектив института имеет опыт и возможности для исследования любых материалов для первой стенки. Для этого используются разные методы нагрева — лазеры, электронные пучки, потоки плазмы и применяются различные диагностические системы, в том числе уникальные и не имеющие аналогов в мире.

Работа по подготовке системы лазерного нагрева для испытания керамик была частично поддержана грантом РФФИ № 23-19-00212.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г.И. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Т. 3. — М.: Изд-во АН СССР, 1958, с. 3—31.
2. Astrelin V.T. et al. Hot electron target interaction experiments at the GOL-3 facility. — Nuclear Fusion, 1997, vol. 37, № 11, p. 1541—1558.
3. Burdakov A.V. et al. Test of divertor materials under simulated ITER plasma disruption conditions at the GOL-3 facility. — J. of Nuclear Materials, 1994, vol. 212—215, Part B, p. 1345—1348.
4. Arzhannikov A.V. et al. Interaction of hot electron plasma with solids at the GOL-3 facility. — Fusion Technology, 1999, vol. 35, № 1T, p. 146—150.
5. Shoshin A. et al. Study of plasma-surface interaction at the GOL-3 facility. — Fusion Eng. and Des., 2017, vol. 114, p. 157.
6. Vyacheslavov L. et al. In situ study of the processes of damage to the tungsten surface under transient heat loads possible in ITER. — J. of Nuclear Materials, 2021, vol. 544, p. 152669.
7. Золотарев К.В. и др. Работы с использованием синхротронного излучения в Новосибирском научном центре. — Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2023, т. 87, № 5, с. 614—626.
8. Arakcheev A.S. et al. Dynamic observation of X-ray Laue diffraction on single-crystal tungsten during pulsed heat load. — J. of Synchrotron Radiation, 2019, vol. 26, p. 1644.
9. Bagryansky P.A. et al. Studies of plasma confinement and stability in a Gas dynamic trap: results of 2016—2018. — Plasma and Fusion Research, 2019, vol. 14, № 1, p. 2402030.
10. Поступаев В.В. и др. Изучение захвата и накопления быстрых ионов в предварительных экспериментах с атомарной инжекцией на установке ГОЛ-NB. — Физика плазмы, 2022, т. 48, № 11, с. 1005—1009.
11. Sudnikov A.V. et al. Plasma flow suppression by the linear helical mirror system. — J. of Plasma Physics, 2022, vol. 88, № 1, p. 905880102.
12. Bagryansky P. A. et al. Status of the experiment on magnetic field reversal at BINP. — AIP Conference Proceedings, 2016, vol. 1771, p. 030015.
13. Аржаников А.В. и др. Энергосодержание и спектральный состав потока субмиллиметрового излучения с длительностью 5 мкс, генерируемого в плазме при релаксации РЭП. — Физика плазмы, 2022, т. 48, № 106, с. 929—936.
14. Аржаников А.В. и др. Планарные ЛЭС терагерцового диапазона, основанные на использовании интенсивных параллельных ленточных пучков и внутрирезонаторного рассеяния волн. — Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2019, т. 83, № 2, с. 187—193.
15. Сковородин Д.И. и др. Газодинамическая многопробочная ловушка ГДМЛ. — Физика плазмы, 2023, т. 49, № 9, с. 831—884.
16. Beklemishev A. et al. Novosibirsk Project of Gas-dynamic Multiple-Mirror Trap. — Fusion Science and Technology, 2013, vol. 63, № 1T, p. 46—51.
17. Postupaev V.V. et al. Dynamics of electron distribution function in multiple mirror trap GOL-3. — Ibid., 2009, vol. 55, № 2T, p. 144—146.
18. Postupaev V.V. et al. Experiments with «Thin» electron beam at GOL-3. — Ibid., 2011, vol. 59, № 1T, p. 144—149.
19. Koidan V.S. et al. Multimirror open trap GOL-3: recent results. — Ibid., 2003, vol. 43, № 1T, p. 30—36.
20. Аржаников А.В. и др. Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3. — Физика плазмы, 2005, т. 31, № 6, с. 506—520.
21. Burdakov A. et al. Plasma heating and confinement in GOL-3 multimirror trap. — Fusion Science and Technology, 2007, vol. 51, № 2T, p. 106—111.

22. **Burdakov A. et al.** Status and prospects of GOL-3 multiple mirror trap. — *Ibid.*, 2009, vol. 55, № 2Т, p. 63—70.
23. **Burdakov A.V. et al.** Use of pellet injection technology at GOL-3 for plasma fueling and plasma-surface interaction research. — *Ibid.*, 2007, vol. 51, № 2Т, p. 355—357.
24. **Полосаткин С.В. и др.** Спектроскопические исследования на установке ГОЛ-3 взаимодействия мощного плазменного потока с твердым телом. — *Приборы и техника эксперимента*, 2008, № 2, с. 100—107.
25. **Аржанников А.В. и др.** Измерение импульсных высоких давлений по сдвигу линий флуоресценции рубина. — *Там же*, 2006, № 2, с. 157—161.
26. **Garkusha I.E. et al.** Plasma-surface interaction during ITER transient events: simulation with QSPA Kh-50 and GOL-3 facilities. — *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*, 2008, № 6, p. 58—60.
27. **Shoshin A.A. et al.** Plasma-Surface interaction during ITER type I ELMs: comparison of simulation with QSPA Kh-50 and the GOL-3 facilities. — *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 59, № 1Т, p. 57—60.
28. **Shoshin A.A. et al.** Structure modification of different graphite and glassy carbon surfaces under high power action by hydrogen plasma. — *Ibid.*, p. 268—270.
29. **Arzhannikov A.V. et al.** Surface modification and droplet formation of tungsten under hot plasma irradiation at the GOL-3. — *J. of Nuclear Materials*, 2013, vol. 438, p. S677—S680.
30. **Huber A. et al.** Investigation of the impact on tungsten of transient heat loads induced by laser irradiation, electron beams and plasma guns. — *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63, № 1Т, p. 197—200.
31. **Huber A. et al.** Combined impact of transient heat loads and steady-state plasma exposure on tungsten. — *Fusion Eng. and Des.*, 2015, vol. 98—99, p. 1328—1332.
32. **Huber A. et al.** Impact on the deuterium retention of simultaneous exposure of tungsten to a steady state plasma and transient heat cycling loads. — *Physica Scripta*, 2016, vol. T167, p. 014046.
33. **Shoshin A.A. et al.** Comparison of tungsten modification after irradiation at different facilities for PSI studies. — *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1771, p. 060012.
34. **Shoshin A.A. et al.** Modification of preheated tungsten surface after irradiation at the GOL-3 facility. — *Fusion Eng. and Des.*, 2016, vol. 113, p. 66—70.
35. **Акентьев Р.Ю. и др.** Спектроскопический комплекс для исследования плазмы на установке ГОЛ-3. — *Приборы и техника эксперимента*, 2004, № 2, с. 98—104.
36. **Сорокина Н.В. и др.** Исследование состава примесей и эффективного заряда плазмы на установке ГОЛ-3. — *Физика плазмы*, 2015, т. 41, № 7, с. 573—579.
37. **Heat and Nuclear Load Specifications.** ITER_D_2LULDH, 2009.
38. **Vyacheslavov L. et al.** Novel electron beam based test facility for observation of dynamics of tungsten erosion under intense ELM-like heat loads. — *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1771, p. 060004.
39. **Kasatov A.A. et al.** Observation of dust particles ejected from tungsten surface under impact of intense transient heat load. — *Ibid.*, p. 060007.
40. **Vasilyev A.A. et al.** Observation of the tungsten surface damage under ITER-relevant transient heat loads during and after electron beam pulse. — *Ibid.*, p. 060013.
41. **Trunev Yu.A. et al.** Heating of tungsten target by intense pulse electron beam. — *Ibid.*, p. 060016.
42. **Vasilyev A.A. et al.** In-situ imaging of tungsten surface modification under ITER-like transient heat loads. — *Nuclear Materials and Energy*, 2017, vol. 12, p. 553—558.
43. **Vyacheslavov L.N. et al.** Observation of dust particles ejected from the tungsten surface by transient heat flux with small-angle scattering of cw laser light. — *Ibid.*, p. 494—498.
44. **Vyacheslavov L.N. et al.** Diagnostics of the dynamics of material damage by thermal shocks with the intensity possible in the ITER divertor. — *Physica Scripta*, 2018, vol. 93, p. 035602.
45. **Vasilyev A.A. et al.** Continuous laser illumination for in situ investigation of tungsten erosion under transient thermal loads. — *Fusion Eng. and Des.*, 2019, vol. 146, Part B, p. 2366—2370.
46. **Parker R. et al.** Plasma-wall interactions in ITER. — *J. of Nuclear Materials*, 1997, vol. 241—243, p. 1—26.
47. **Cherepanov D.E. et al.** In situ study of thermal shock damage to high-temperature ceramics. — *Nuclear Materials and Energy*, 2023, vol. 36, p. 101495.
48. **Черепанов Д.Е. и др.** Испытания покрытий из карбида бора импульсной тепловой нагрузкой, возможной в диверторной зоне токамака ИТЭР. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2024, т. 47, вып. 1, с. 89—98.
49. **Shoshin A. et al.** Properties of boron carbide ceramics made by various methods for use in ITER. — *Fusion Eng. and Des.*, 2019, vol. 146, part B, p. 2007—2010.
50. **Shoshin A. et al.** Qualification of boron carbide ceramics for use in ITER ports. — *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, is. 6, p. 1474—1478.
51. **Бурдаков А.В. и др.** Изучение термического газовыделения материалов, используемых в высоковакуумных системах. — *Приборы и техника эксперимента*, 2022, № 3, с. 146—151.
52. **Shoshin A. et al.** Test results of boron carbide ceramics for ITER port protection. — *Fusion Eng. and Des.*, 2021, vol. 168, p. 112426.
53. **Sulyaev Yu.S. et al.** Engineering calculations and preparation for manufacturing of ITER equatorial port № 11. — *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, is. 6, p. 1631—1636.
54. **Arakcheev A.S. et al.** Theoretical investigation of cracks formation in tungsten after heat loads. — *J. of Nuclear Materials*, 2015, vol. 463, p. 246—249.

55. **Arakcheev A.S. et al.** Calculation of cracking under pulsed heat loads in tungsten manufactured according to ITER specifications. — *Ibid.*, vol. 467, part 1, p. 165—171.
56. **Arakcheev A.S. et al.** Modeling of crack formation after pulse heat load in ITER-grade tungsten. — *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1771, p. 060010.
57. **Arakcheev A.S. et al.** Shape evolution of surface molten by electron beam during cooling stage. — *Fusion Eng. and Des.*, 2018, vol. 128, p. 154—157.
58. **Lazareva G.G. et al.** Calculation of heat sink around cracks formed under pulsed heat load. — *J. of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, p. 012120.
59. **Lazareva G.G. et al.** Numerical model of high-power transient heating of tungsten with considering of various erosion effects. — *Ibid.*, 2018, vol. 1103, p. 012001.
60. **Popov V.A. et al.** Theoretical modeling of shielding for plasma flow and electron beam heating. — *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1771, p. 060009.
61. **Arakcheev A.S. et al.** Two-dimensional numerical simulation of tungsten melting in exposure to pulsed electron beam. — *Fusion Eng. and Des.*, 2018, vol. 132, p. 13—17.
62. **Popov V.A. et al.** Theoretical simulation of the closed currents near non-uniformly strongly heated surface of tungsten due to thermomf. — *Physics of Plasmas*, 2022, vol. 29, № 3, p. 033503.
63. **Arakcheev A.S. et al.** Applications of synchrotron radiation scattering to studies of plasma facing components at Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Centre. — *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1771, p. 060003.
64. **Аракчеев А.С. и др.** Моделирование взаимодействия плазмы с первой стенкой термоядерного реактора — измерения остаточных механических напряжений в вольфраме после облучения на установке ГОЛ-3. — *Журнал структурной химии*, 2016, т. 57, № 7, с. 1389.
65. **Arakcheev A.S. et al.** Status of dynamic diagnostics of plasma material interaction based on synchrotron radiation scattering at the VEPP-4 beamline 8. — *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 184—188.
66. **Tolochko B.P. et al.** X-Ray diffractometry with synchrotron radiation for exploration of fast processes in solids with nanosecond time resolution. — *Журнал прикладной спектроскопии*, 2016, т. 83, № 6—16, с. 683—684.
67. **Balash I. et al.** Measurement of the residual stresses dynamics in tungsten during heating. — *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2299, p. 040006.
68. **Балаш И.И. и др.** Влияние поверхностных трещин и текстуры на остаточные напряжения в вольфраме после воздействия плазмы. — *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 2023, т. 87, № 5, с. 692—695.
69. **Кузьмин Е.И., Шиховцев И.В.** Геликонный источник плотной плазмы для линейных плазменных установок. — *Физика плазмы*, 2021, т. 47, № 6, с. 507—517.



Андрей Алексеевич Шошин, с.н.с., к.ф.-м.н.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; НГУ, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова 1, Россия; НГТУ, 630073 Новосибирск, пр-т К Маркса 20, Россия
A.A.Shoshin@inp.nsk.su



Александр Владимирович Бурдаков, г.н.с., д.ф.-м.н.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; НГТУ, 630073 Новосибирск, пр-т К. Маркса 20, Россия
A.V.Burdakov@inp.nsk.su



Игорь Васильевич Кандауров, н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия
I.V.Kandaurov@inp.nsk.su



Александр Александрович Касатов, н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; НГУ, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова 1, Россия
A.A.Kasatov@inp.nsk.su



Сергей Романович Казанцев, м.н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; ИХТТМ СО РАН, 630090 Новосибирск, ул. Кутателадзе 18, Россия; ЦКП «СКИФ», 630559 Новосибирская область, р.п. Кольцово, пр-т Никольский 1, Россия
s.kazantsev@alumni.nsu.ru



Илья Ильич Балаш, инженер-исследователь; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; ИХТТМ СО РАН, 630090 Новосибирск, ул. Кутателадзе 18, Россия
ilyabalash@yandex.ru



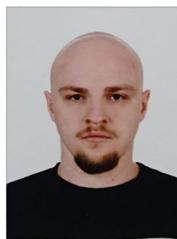
Владимир Андреевич Попов, м.н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия
V.A.Popov@inp.nsk.su



Георгий Андреевич Рыжков, инженер-исследователь; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; НГУ, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова 1, Россия
ryzhkov.george98@gmail.com



Дмитрий Евгеньевич Черепанов, инженер-исследователь; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; НГУ, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова 1, Россия
PD.E.Cherepanov@inp.nsk.su



Евгений Игоревич Кузьмин, н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия
E.I.Kuzmin@inp.nsk.su



Сергей Викторович Полосаткин, с.н.с., к.ф.-м.н.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; НГУ, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова 1, Россия; НГТУ, 630073 Новосибирск, пр-т К. Маркса 20, Россия
S.V.Polosatkin@inp.nsk.su



Иван Анатольевич Иванов, с.н.с., к.ф.-м.н.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; НГУ, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова 1, Россия
I.A.Ivanov@inp.nsk.su



Алексей Сергеевич Аракчеев, с.н.с., к.ф.-м.н.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия
asarakcheev@gmail.com



Александр Александрович Васильев, м.н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия

Статья поступила в редакцию 15 января 2024 г.

После доработки 16 января 2024 г.

Принята к публикации 17 января 2024 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 1, с. 65—75.