

УДК 533.9;536.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЛИНИЙ С МАГНИТНОЙ САМОИЗОЛЯЦИЕЙ В РАМКАХ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТА ИМПУЛЬСНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА Z-ПИНЧАХ/С.С. Ананьев, Ю.Л. Бахшаев, А.В. Барто, П.И. Блинов, С.А. Данько, А.И. Жужунашвили, Е.Д. Казаков, Ю.Г. Калинин, А.С. Кингсеп, В.Д. Королев, В.И. Мижирицкий, В.П. Смирнов, Г.И. Устроев, А.С. Черненко, А.Ю. Шашков, С.И. Ткаченко. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 3—24.**

На установке С-300 (3 МА — амплитудное значение тока, 0,15 Ом — импеданс генератора, 100 нс — длительность импульса) выполнены исследования транспортирующих свойств отрезка вакуумной магнитоизолированной транспортирующей линии (МИТЛ) при протекании по ней тока плотности до 500 МА/см<sup>2</sup> и погонной плотности до 7 МА/см (параметры близки предполагаемым в проекте Лабораторий «Сандия» термоядерного реактора на быстрых Z-пинчах). При нагреве электрода магнитоизолированной транспортирующей линии протекающим током его поверхность взрывается, что сопровождается формированием плазменного слоя на поверхности. Это может привести к потере передающих свойств линии по причине перезакоротки вакуумного промежутка плазмой. В экспериментах исследовались динамика приэлектродной плазмы и зависимость транспортирующих свойств линий от материала и чистоты поверхности электродов. Экспериментально показано, что при пропускании тока с линейной плотностью до 7 МА/см по модели линии с магнитной самоизоляцией входной и выходной токи отличаются менее чем на 10% до 230 нс от момента начала тока для никелевых электродов и вплоть до 350 нс для линий, центральный электрод которых изготовлен из золота. В экспериментах не было обнаружено зависимости потери транспортирующих свойств линии от наличия масляной пленки на поверхности электрода. Показано также, что электронные утечки не вносят существенный вклад в потери передаваемой энергии. Экспериментальные результаты сравниваются с расчетами взрыва электродов и последующего разлета плазменного слоя. Сделан вывод, что время эффективного функционирования модели магнитоизолированной транспортирующей линии удовлетворяет требованиям к транспортирующим линиям, которые предъявляет концептуальный проект термоядерного реактора (33 рис., список лит. — 21 назв.).

УДК 621.039.6

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА МОДЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ/Б.И. Хрипунов, В.Б. Петров, С.Н. Корниенко, А.М. Муксун, А.С. Рупышев, В.В. Шапкин. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 24—31.**

В работе приведен краткий обзор исследований взаимодействия мощного стационарного потока плазмы с материалами термоядерного реактора. Исследования проведены на установках ЛЕНТА и СПРУТ-4 с прямым магнитным полем в Институте ядерного синтеза РНЦ «Курчатовский институт». Работа включает эксперименты с плазменным потоком, проходящим через газовую мишень (моделирование «отрыва» в диверторе), изучение эрозии, перепыления материалов, обращенных к плазме, а также новые решения по компонентам первой стенки (литиевой стенке). Плазма генерируется электронным пучком (пучково-плазменный разряд — ППР). Исследование физики явлений на краю плазмы и реакции материалов на высокие потоки частиц и тепла основано на больших потенциальных возможностях ППР для изучения материалов благодаря соответствию условий пристеночному слою токамака. Материалы изучались под воздействием дейтериевой плазмы. При больших ионных дозах (10<sup>26</sup> ион/м<sup>2</sup>) изучены эрозия, перепыление и смешивание углеродных материалов и вольфрама. Обнаружена повышенная эрозия вольфрама при высоких температурах в области энергии ионов, намного меньше порога распыления. На поверхности происходило образование субмикронных структур. Смешивание вольфрама и углерода приводило к образованию карбида вольфрама. Жидколитиевая поверхность была создана с помощью капиллярно-пористых структур. Изучена эмиссия лития с поверхности жидкого металла. Приведено сравнение полученных результатов с результатами других групп (PISCES, T-11M) (6 рис., список лит. — 6 назв.).

УДК 539.2

**НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В КАРБИДАХ ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ/В.Х. Алимов, В.Л. Гончаров, Д.А. Комаров, Ю.В. Лахоткин, В.П. Кузмин, И. Дорнер, И. Рот. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 31—36.**

В работе исследовалось накопление дейтерия в покрытиях из карбидов вольфрама W<sub>2</sub>C и WC с содержанием свободных атомов углерода (т.е. несвязанных химически с атомами вольфрама) около 10% ат., полученных методом химического осаждения из газовой фазы, в процессе облучения ионами дейтерия с энергией от нескольких сотен эВ (~200 эВ/D) с потоком ионов 1,1·10<sup>21</sup> D/(м<sup>2</sup>·с) и дозой ионного облучения 2·10<sup>24</sup> D/м<sup>2</sup> до нескольких кэВ (10 кэВ) при температуре 300—323 К и дозой ионного облучения 1·10<sup>23</sup> D/м<sup>2</sup>. Было показано, что в отличие от вольфрамовых материалов дейтерий накапливается только в виде атомов, удерживаемых, главным образом, включениями углерода. Использование метода ядерных реакций D(<sup>3</sup>He, p)<sup>4</sup>He с увеличивающейся энергией анализируемых ионов <sup>3</sup>He (от 0,69 до 4,0 МэВ) позволило определить профили дейтерия в объеме карбидных покрытий до глубин в несколько микрон. После выдержки в дейтериевой плазме при температуре ниже 400 К атомы дейтерия накапливаются в приповерхностных слоях с максимальной концентрацией в несколько ат. %, при температуре выше 400 К атомы дейтерия диффундируют в объем покрытия и накапливаются до концентрации около 2% ат. на глубине в несколько микрометров. При температуре выше 550 К концентрация дейтерия в объеме покрытия начинает снижаться. Анализ полученных профилей распределения концентрации атомов дейтерия по глубине позволил оценить коэффициент диффузии дейтерия как  $D = 1,33 \cdot 10^{-1} \exp \{-(123 \pm 10 \text{ кДж/мол.})/RT\} \text{ м}^2/\text{с}$  и показал, что коэффициент диффузии практически не зависит от стехиометрии карбида вольфрама (4 рис., 1 табл., список лит. — 19 назв.).

УДК 533.9:621.039.61

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВЫСОКООРИЕНТИРОВАННОГО ПИРОГРАФИТА ПРИ ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСАХ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ/Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов, В.С. Куликаускас, Е.С. Машкова, А.С. Немов, Ю.С. Виргильев, С.Я. Бецофен. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 37—48.**

Приводятся результаты исследования морфологии, элементного состава и структуры поверхностного слоя, формирующегося при падении ионов  $N_2^+$  энергией 30 кэВ под углом падения  $60^\circ$  на базисную плоскость высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т при температуре ниже и выше температуры  $T_a \approx 170^\circ C$  динамического отжига радиационных нарушений. Обсуждаются причины образования столбчато-игольчатой морфологии при  $T > T_a$ , вызывающей трехкратное падение распыления по сравнению с облучением при  $T < T_a$  (7 рис., список лит. — 33 назв.).

УДК 533.924

**ВЛИЯНИЕ АММИАКА НА ПЕРЕНОС И ОСАЖДЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ РАДИКАЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ/В.Л. Буховец, А.Е. Городецкий, Р.Х. Залавутдинов, А.П. Захаров. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 48—56.**

Рассмотрено влияние аммиака ( $NH_3$ ) на скорость осаждения аморфных углеводородных (а-С:Н) пленок в тлеющем разряде постоянного тока на основе проточной смеси водород—метан. Скорость осаждения измерялась ex-situ-методом рентгеноспектрального микроанализа. Добавление аммиака к потоку  $H_2$ — $CH_4$  в количестве, равном потоку метана, полностью подавляло осаждение а-С:Н-пленок в полном катоде, уменьшало скорость роста пленок в области положительного столба, но увеличивало скорость их осаждения в области послесвечения. Масс-спектрометрический анализ газовых потоков в тлеющем разряде, расчет массового баланса газообразных и твердых продуктов плазмолиза показали, что подавление осаждения а-С:Н-пленок в полном катоде вызвано последовательными реакциями осаждения и эрозии пленок с образованием синильной кислоты ( $HC\equiv N$ ) (5 рис., 2 табл., список лит. — 13 назв.).

УДК 536.242;661.85

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В ПОТОКЕ СВИНЕЦ-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ ВАРЬИРУЕМОМ СОДЕРЖАНИИ В НЁМ КИСЛОРОДА/А.В. Безносков, С.Ю. Савинов, О.О. Новожилова, М.А. Антоненков. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 56—61.**

В статье представлены результаты экспериментального исследования полей скоростей при течении эвтектики свинец—висмут в канале круглого сечения в поперечном магнитном поле при варьлируемых характеристиках электроизолирующих покрытий и содержании кислорода в эвтектике. Испытания проводились при следующих режимных параметрах: температуре эвтектики свинец—висмут  $T = 400$ — $420^\circ C$ ; термодинамической активности кислорода в теплоносителе  $a = 10^{-4}$ — $10^0$ ; расходе эвтектики через экспериментальный участок  $Q = 1,8$ — $3,0$  м<sup>3</sup>/ч; среднерасходной скорости теплоносителя в экспериментальном участке  $w = 1,0$ — $1,7$  м/с; величине магнитной индукции  $B = 0$ — $0,65$  Тл; числе Рейнольдса  $Re = (1,6$ — $2,7)10^5$  и числе Гартмана  $Na = 0$ — $365$  (9 рис., список лит. — 3 назв.).

УДК 533.951

**РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ УЧЕТА МАГНИТОПРОВОДА В КОДЕ ДИНА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАВНОВЕСНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА/** Р.Р. Х а й р у т д и н о в. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 62—67.

Рассматривается описание постановки задачи учета железного магнитопровода при моделировании равновесия плазмы токамака со свободной границей в приближении тороидальной симметрии совместно с решением уравнений диффузии полоидального магнитного потока, энергии и частиц в рамках плазмофизического кода ДИНА. Приводятся результаты моделирования сценария ввода тока в плазму токамака Т-15, модернизированного с учетом возможности получения диверторной магнитной конфигурации (7 рис., 1 табл., список лит. — 5 назв.).

УДК 621.039.623

**МАГНИТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХЗАХОДНОГО СТЕЛЛАРАТОРА СО СМЕЩЕННЫМИ ВИНТОВЫМИ ОБМОТКАМИ/** В.М. З а л к и н д, В.Г. К о т е н к о, С.С. Р о м а н о в. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 67—75.

В работе численным методом проведено изучение свойств конфигурации магнитных поверхностей в модели магнитной системы двухзаходного стелларатора со смещенными винтовыми обмотками. Смещение предпринято с целью улучшения доступа к объему удержания плазмы. Показано, что благоприятная для удержания плазмы смещенная внутрь тора конфигурация замкнутых магнитных поверхностей с плоской магнитной осью реализуется для двух из трех рассмотренных способов укладки витков проводника в однослойную винтовую обмотку. Так же, как и в обычном двухзаходном стеллараторе, в двухзаходном стеллараторе со смещенными винтовыми обмотками существование конфигурации замкнутых магнитных поверхностей не связано с необходимостью наложения поперечного (компенсирующего) магнитного поля (9 рис., список лит. — 15 назв.).

УДК 621.039.6

**25-й СИМПОЗИУМ ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ (SOFT-2008)** (Росток, Германия, 15—19 сентября 2008 г.)/Б.Н. К о л б а с о в. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 76—85.

Приводится краткий обзор приглашённых лекций и устных докладов, прочитанных на симпозиуме. Они были посвящены решению технологических проблем, связанных с сооружением ИТЭР, сооружению стелларатора Вендельштайн 7-ЭКС, организации работ в рамках «расширенного подхода», результатам исследований на токамаке Тор-Супра и стеллараторе LHD, китайской термоядерной программе, изменению требований при переходе от ИТЭР к реактору ДЕМО и другим актуальным проблемам (4 рис., список лит. — 17 назв.).

УДК 533.9:519.688

**КОД ДЛЯ РАСЧЕТА МГД-РАВНОВЕСИЯ ТОКАМЕQ (МОДУЛЬ БИБЛИОТЕКИ ПРОГРАММ «ВИРТУАЛЬНЫЙ ТОКАМАК»)/Д.Ю. Сычуг о в.** — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 85—89.

В статье приводится краткое описание стандартного кода ТОКАМЕQ (ТОКАМаk Equilibrium) для расчета МГД-равновесия плазменного шнура в установках токамак. Данный код является одним из модулей библиотеки «Виртуальный Токамак» (2 рис., список лит. — 5 назв.).