

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный  
исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409  
Тел. (499) 324-87-66, факс (499) 324-21-11  
<http://www.mephi.ru>

«УТВЕРЖДАЮ»  
Первый проректор  
НИЯУ МИФИ

О.В.Нагорнов



«04» октября 2017 г.

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

– Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» на диссертацию Свечникова Николая Юрьевича «Углеродородные пленки в термоядерных установках: структура и свойства», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертация Свечникова Н.Ю. посвящена экспериментальным исследованиям аморфных гладких углеродородных пленок  $CD_x$  ( $x \sim 0,5$ ) с большим относительным содержанием изотопов водорода, образованных вследствие эрозии графитовых элементов вакуумной камеры под воздействием дейтериевых плазменных разрядов токамака Т-10 (НИЦ «Курчатовский институт») и осажденных на стенках камеры, в зависимости от плазменных процессов в токамаке Т-10. Проводится сравнение электронных структур углеродных пленок токамака Т-10 и пленок  $CH_x$ -Me из плазменных разрядов сильноточного плазменного ускорителя КСПУ-Т, образующихся в результате прямой бомбардировки мишеней пучками водородной плазмы с плотностью, близкой к условиям ИТЭР, и отличающейся на два-три порядка от плотности плазмы современных токамаков. Заявленной целью диссертации является построение концепции структуры и основных физических свойств данных напыленных углеродородных пленок.

Углеродные пленки, осажденные на стенках камеры вне прямого воздействия центральной плазмы при средней температуре стенок менее  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , способны эффективно адсорбировать изотопы водорода вплоть до максимально возможных относительных концентраций  $(H+D)/C = 1-2$ , и являются основным накопителем изотопов водорода и углеродородов во всех токамаках с углеродными стенками. Данная проблема является частью

общей **актуальной** физической проблемы взаимодействия плазмы со стенкой и распыления материалов стенки, включая графитовые, с сопутствующим захватом изотопов водорода (в том числе радиоактивного трития) из плазмы термоядерной установки. Продукты эрозии взаимодействующих с плазмой материалов в виде пленок и пыли играют основную роль в накоплении радиоактивного трития в реакторе, что является проблемой как для безопасности, так и для экономичности работы реактора (за счет высокой стоимости трития). Накопление трития приводит к необходимости регулярно проводить процедуру очистки камеры от пленок и пыли с тритием, согласно нормам радиационной безопасности. Кроме того, продукты эрозии представляют опасность при возможных аварийных ситуациях, связанных, в частности, с прорывом воды из системы охлаждения в горячую камеру реактора, т.е. могут служить катализатором для разложения воды и образования гремучего газа.

**Актуальность** темы диссертации также связана с развитием термоядерных проектов, токамака Т-15(Россия), нового термоядерного сверхпроводящего токамака JT-60SA (Япония) с участием углеродных материалов, токамака КТМ (Казахстан). Знание фундаментальных свойств продуктов эрозии, разработка надёжного *in situ* мониторинга пленок  $CD_x$  (которые сходны по физико-химическим свойствам с пленками  $CD_x$ ), а также выработка рекомендаций по уменьшению накопления в них изотопов водорода необходимы для работ данных установок.

Сопутствующей проблемой является увеличение содержания изотопов водорода Н/С в углеродных элементах приборов и устройств водородной энергетики и снижение температуры термодесорбции водорода из них.

**Новизна** проведенных исследований связана также с тем, что основной объем работ касался модельных аморфных пленок а-С:Н(D) из лабораторных установок низкотемпературной плазмы, а исследования на пленках из токамаков носили описательный характер для данных условий осаждения, который включал получение пленок как с большим отношением Н/С ~0.5, так и с Н/С на 1–3 порядка меньшим, без обобщения свойств, без выяснения структуры углеродной сетки, не выявлялись электронные структуры пленок, не выяснялись общности и различия с “модельными” аморфными пленками а-С:Н.

### **Основные научные результаты диссертации и их новизна**

При выполнении диссертационной работы были получены следующие основные научные результаты.

- 1) Получены тонкие пленки  $CD_x$  в контролируемых условиях осаждения в токамаке Т-10 и проведен их многогранный анализ, что является важным для понимания закономерностей осаждения и свойств углеродных пленок, формирующихся в термоядерных установках.
- 2) Предложен *in situ* мониторинг по колебательным модам С-Н, С-D процесса накопления и

термодесорбции изотопов водорода, изменения состава и толщины пленок  $CD_x$  в термоядерных установках.

3) Предложена концепция структуры и основных физических свойств гладких аморфных пленок  $CD_x$  ( $x \sim 0.5$ ), осажденных в токамаке Т-10 при дейтериевых разрядах.

4) Экспериментально показано, что гладкие пленки  $CD_x$  ( $x \sim 0.5$ ) имеют определенное сходство с модельными аморфными мягкими пленками а-С:Н(Д): по электронной структуре валентной зоны, разупорядоченной углеродной сетке из состояний  $sp^3+sp^2$ , колебательным модам и спиновым состояниям углерода.

5) Указаны отличия от пленок а-С:Н(Д), обусловленные влиянием рабочих разрядов высокотемпературной плазмы токамака: способность в большей степени аккумулировать изотопы водорода в результате большей доли  $sp^3$  состояний, присутствия примесей d-металлов и большей концентрации дефектных состояний; различия поверхностной электронной структуры обеих сторон пленок  $CD_x$ ; пленки  $CD_x$  являются очень слабо упорядоченной аморфной структурой и имеют фрактальное (афинное) строение углеродной сетки.

6) Исследована электронная структура, химический состав и примеси тонких углеводородных пленок  $CN_x$  сильноточного плазменного ускорителя КСПУ-Т, образующихся в результате осаждения углеродных частиц распыленных с мишеней при их прямой бомбардировке пучками водородной плазмы с плотностью плазмы близкой к условиям ИТЭР, и получены заметные отличия от электронной структуры пленок  $CD_x$ .

7) Предложена методология исследования свойств пленок с привлечением различных экспериментальных методик, в т.ч., не применявшихся ранее другими авторами.

**Достоверность полученных результатов** не вызывает сомнений, поскольку она обусловлена точностью и повторяемостью выполненных экспериментов, учетом возможных паразитных факторов при проведении экспериментов, сравнением с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов. Достоверность результатов также обусловлена широким набором использованных экспериментальных ов.

Диссертация состоит из Введения, Глав 1–4 и Заключения, с объемом основного текста 233 стр. и общим объемом 265 стр., списка ЛИТЕРАТУРЫ из 364 наименований, 132 рисунков и 15 таблиц.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК.

Материалы диссертации опубликованы в 24-х статьях в реферируемых отечественных и зарубежных журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации докладывались на 26-и всероссийских и зарубежных конференциях.

## **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные в диссертации материалы представляют интерес для специалистов, связанных с исследованиями по взаимодействию плазмы с поверхностью с образованием продуктов эрозии в виде пленок и пыли в термоядерных установках и с эксплуатацией термоядерных установок с углеродными контактирующими с плазмой элементами. Рассмотренная методика исследования продуктов эрозии может быть также использована в установках с другим типом покрытия стенок камеры.

Полученные физические результаты и методология исследований могут быть использованы при аналогичных комплексных исследованиях тонких слоёв новых материалов, например, разрабатываемых для хранения изотопов водорода, для термоядерных и плазменных установок, для целей химической и электрохимической техники и технологий.

**Оценка содержания диссертации.** Диссертация написана четко и ясно с большим количеством графического материала, поясняющего и иллюстрирующего соответствующие результаты решений. По содержанию работы можно сделать следующие замечания.

- 1) Многие детальные практические рекомендации, которые могут быть использованы в работе термоядерных установок и в методах исследования продуктов эрозии, размещены в отдельных параграфах Глав 2–4: 2.5.3, 2.6.11, 3.8, 3.10.6, 3.12, 3.12.4, 4.4.11, помимо более общих рекомендаций в основных выводах диссертации. Было бы полезно повторить эти детальные практические рекомендации в одном параграфе.
- 2) В актуальности работы и в тексте самой диссертации неоднократно говорится о применении графитовых материалов в качестве контактирующих с плазмой в ИТЭР. Однако, от этой концепции было решено отойти и на текущий момент в ИТЭРе не предполагается использовать графитовые материалы в качестве контактирующих с плазмой. Этот факт, однако, не умаляет актуальности работы, ввиду наличия ряда токамаков с графитовыми материалами.
- 3) Ряд выводов диссертации является слишком категоричными (Например, «Предлагаемый анализ электронной структуры дает представление обо всех процессах, приводящих к образованию пленок в токамаках, поскольку углеводородные гладкие пленки, по существу, являются паспортом этих процессов.», гл. 3.12.4.)
- 4) В тексте диссертации присутствуют опечатки в оформлении (например, «жесткими», НИЦ — Курчатовский институт»), также применяется нестандартное «Г» сокращение для грамма.

Сделанные замечания не отражаются, однако, на общем положительном заключении по работе.

## Заключение

Диссертационная работа Свечникова Н.Ю. является завершенной научно-квалификационной работой на актуальную тему, содержит новые научные результаты в области исследования структуры и свойств аморфных углеводородных систем с большим содержанием изотопов водорода, образованных в условиях работы термоядерных установок. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, является самостоятельным исследованием, имеет большое практическое значение для развития методов контроля *in situ* за процессом захвата изотопов водорода в формируемых в токамаках углеродных слоях, методики исследования продуктов эрозии графитовых элементов первой стенки. Полученные результаты являются обоснованными и достоверными, имеют существенное значение для науки и техники.

Диссертационная работа Свечникова Н.Ю. по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям пп.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Свечников Николай Юрьевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв составлен на основании знакомства с текстом диссертации, автореферата и доклада Свечникова Н.Ю. на расширенном заседании Кафедры физики плазмы с приглашением специалистов с Кафедры физики твердого тела и наносистем Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (присутствовало 20 сотрудников, включая 5 докторов физ-мат. наук и 7 кандидатов физ-мат. наук), протокол № 5 от 20.09.2017 г.

Отзыв составил

Профессор, д.ф.-м.н.

Ученый секретарь,  
Доцент, к. ф.-м. н.

Л.Б.Беграмбеков

Ю.М.Гаспарян

«03» октября 2017 г.